

UNIVERSITÄT LEIPZIG

**Institut für Produktionswirtschaft
und Industrielle Informationswirtschaft**

Marschnerstraße 31, 04109 Leipzig

Tel.: 0341/4941-182, Fax: -125

Arbeitsbericht Nr. 14

**Petrinetzbasierte Modellierung
komplexer Produktionssysteme**

Band 9: Beurteilung des Petrinetz-Konzepts

von

Univ.-Prof. Dr. Stephan Zelewski

<zelewski@hpswifa.wifa.uni-leipzig.de>

Leipzig 1995

Alle Rechte vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis zu Band 9

	Seite
9	Beurteilung des Petrinetz-Konzepts 1
9.1	Einschränkungen des Beurteilungsrahmens 1
9.2	Entfaltung eines Stärken-/Schwächen-Profiles 16
9.2.1	Beurteilung der Modellierungsfähigkeit 16
9.2.1.1	Allgemeine Modellierungsfähigkeit 16
9.2.1.2	Spezielle Modellierungsfähigkeiten 21
9.2.2	Beurteilung der Modellierungsgüte 41
9.2.2.1	Überblick 41
9.2.2.2	Praktisch orientierte Gütedeterminanten 44
9.2.2.2.1	Modellierungsphasen 44
9.2.2.2.1.1	Modellkonstruktion 44
9.2.2.2.1.2	Modellauswertung 63
9.2.2.2.2	Modellierungsträger 70
9.2.2.2.2.1	Benutzerfreundlichkeit 70
9.2.2.2.2.2	Effizienz 90
9.2.2.2.2.3	Implementierbarkeit 110
9.2.2.3	Theoretisch orientierte Gütedeterminanten 124
9.2.2.3.1	Konsistenz 124
9.2.2.3.2	Eindeutigkeit 131
9.2.2.3.3	Formalisierung 136
9.2.2.3.4	Interpretierbarkeit 143
9.2.2.3.5	Operationalität 149
9.2.2.3.6	Realitätsadäquanz 154
9.2.2.3.7	Einfachheit 160
9.2.2.3.8	Einheitlichkeit 165
9.2.2.3.9	Vollständigkeit 173

9.2.2.3.10	Adaptivität	177
9.2.2.3.11	Integrationsqualität	190
9.2.2.3.12	Fruchtbarkeit	196
9.3	Darstellung des Stärken/Schwächen-Profiles	202
9.4	Zusammenfassung und Ausblick	214
	Literaturverzeichnis zu Band 9	215

9 Beurteilung des Petrinetz-Konzepts

9.1 Einschränkungen des Beurteilungsrahmens

Die Beurteilung eines Modellierungskonzepts kann sich sowohl auf dessen absolute als auch auf dessen relative Vorteilhaftigkeit erstrecken¹⁾. Der Aspekt der absoluten Vorteilhaftigkeit wird nicht weiter beachtet. Denn der Verf. sieht keine überzeugenden Kriterien, mit deren Hilfe sich *absolute* Urteile darüber treffen ließen, ob ein Konzept für die Modellierung von Prozeßkoordinationen in komplexen Produktionssystemen *insgesamt* vorteilhaft ist oder nicht. Daher wird die Beurteilung des Petrinetz-Konzepts von vornherein auf den Gesichtspunkt seiner relativen Vorteilhaftigkeit eingeschränkt.

Die relative Vorteilhaftigkeit eines Modellierungskonzepts läßt sich einerseits konzeptexogen und andererseits konzeptendogen ausleuchten. Die konzeptexogene Variante stellt den Normalfall von relativen Vorteilhaftigkeitsanalysen dar. Dabei wird das zu beurteilende Konzept anhand gemeinsamer Kriterien mit Alternativkonzepten verglichen. Ein solcher Vergleich setzt aber voraus, daß die Alternativkonzepte bezüglich ihrer Kriterienerfüllung genauso detailliert untersucht werden wie das zu beurteilende Modellierungskonzept. Dies schließt jedoch der thematische Rahmen aus, der für die hier vorgelegte Ausarbeitung eingangs entfaltet wurde. Dort wurde das detaillierte und systematische Studium alternativer Modellierungskonzepte von vornherein ausgegrenzt. Deshalb muß ebenso von der Option abgesehen werden, die relative Vorteilhaftigkeit des Petrinetz-Konzepts auf konzeptexogene Weise zu beurteilen²⁾.

Statt dessen erfolgt hier nur eine konzeptendogene Beurteilung³⁾. Sie zeichnet sich dadurch aus, daß verschiedenartige Ausformungen des Petrinetz-Konzepts hinsichtlich ihrer relativen Vorteilhaftigkeit untereinander verglichen werden. Als Vergleichsobjekte dienen die drei Netzklassen, denen in den vorangehenden Ausführungen die größte Aufmerksamkeit zuteil wurde:

- Stelle/Transition-Netze,
- Synthetische Netze, sofern sie durch das Kernkonzept Synthetischer Netze definiert sind (Synthetische Kernnetze),
- Synthetische Netze, die alle vorgestellten Erweiterungen des Kernkonzepts umfassen (Erweiterte Synthetische Netze).

Bezüglich dieser drei Netzklassen⁴⁾ werden im folgenden die Stärken und Schwächen des Petrinetz-Konzepts herausgearbeitet⁵⁾. Dabei werden die Erkenntnisse, die in den voranstehenden Kapiteln gesammelt wurden, als bekannt vorausgesetzt⁶⁾. Für die systematische Beurteilung der Stärken und Schwächen wird ein Katalog von Beurteilungskriterien⁷⁾ vorgestellt⁸⁾.

Der Kriterienkatalog knüpft zunächst an die prinzipielle Unterscheidung zwischen Modellierungsfähigkeit und Modellierungsgüte an. Sie lag schon dem Vergleich zwischen Petrinetz-Konzept und Netzplantechnik zugrunde⁹⁾. Weiterführende Ausdifferenzierungen des Kriterienkatalogs werden erläutert, wenn die jeweils betroffenen Beurteilungsaspekte behandelt werden. Einen Überblick über die insgesamt berücksichtigten Beurteilungskriterien gewährt das "Beurteilungsnetz", das in Abb. 206 bis 210 am Ende dieses Kapitels präsentiert wird¹⁰⁾. Es gibt zugleich den systematischen Kriterienzusammenhang wieder. Das Beurteilungsnetz lehnt sich an die Konstruktion terminologischer Netze an, die in dieser Arbeit schon an früherer Stelle für die Repräsentation komplexer Zusammenhänge benutzt wurden.

In Abb. 211 bis 213 werden die Beurteilungskriterien aus den Teilnetzen in einer Übersichtsliste zusammengefaßt. Um eine kompakte Darstellung zu ermöglichen, enthält die Beurteilungsliste nur noch die wichtigsten Differenzierungsgesichtspunkte¹¹⁾ aus dem voranstehenden Beurteilungsnetz. Darüber hinaus verdeutlicht die Beurteilungsliste die Reihenfolge, in der die

Beurteilungskriterien im folgenden erörtert werden¹²⁾. Diese Auflistung wird später wiederaufgegriffen, wenn für das Petrinetz-Konzept ein Stärken/Schwächen-Profil vorgelegt wird. Das Profil wird die Beurteilungsaspekte, die in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert werden, abschließend zusammenfassen. Dabei wird die konzeptendogene Unterscheidung zwischen den drei o.a. Netzklassen durchgehend aufrechterhalten.

Einzelne Stärken oder Schwächen des Petrinetz-Konzepts werden durchaus in einer Weise behandelt werden, die absolute Positionierungen anklingen läßt¹³⁾. Dies schließt auch *punktueller* relative Leistungsvergleiche mit Alternativkonzepten ein¹⁴⁾. Aber es wird unterstellt, daß die Meßskalen für die einzelnen Beurteilungskriterien nicht dasjenige Niveau erreichen, das für die Aggregation aller Teilurteile zu einem Gesamturteil erforderlich wäre¹⁵⁾. Daher eignet sich das Stärken/Schwächen-Profil nicht dazu, eindimensionale *Gesamturteile* über die Vorteilhaftigkeit der drei betrachteten Netzklassen zu fällen. Ebenso wenig gestattet das Beurteilungsprofil, die drei Netzklassen jeweils *als Ganzes* mit anderen Modellierungskonzepten zu vergleichen. Infolge dieses doppelten Vorbehalts wird nur ein erster explorativer¹⁶⁾ Ansatz für die Beurteilung des Petrinetz-Konzepts vorgelegt.

Der zugrundegelegte Kriterienkatalog kann aber in anderen Arbeiten herangezogen werden, um alternative Modellierungskonzepte dem gleichen Beurteilungsschema zu unterwerfen¹⁷⁾. Erst wenn solche Alternativbeurteilungen vorliegen, läßt sich die relative Vorteilhaftigkeit des Petrinetz-Konzepts auch auf konzeptexogene Weise beurteilen¹⁸⁾. Dies bleibt jedoch späteren Untersuchungen vorbehalten. Denn die Thematik dieser Arbeit wurde von vornherein auf das Studium von Petrinetzen beschränkt.

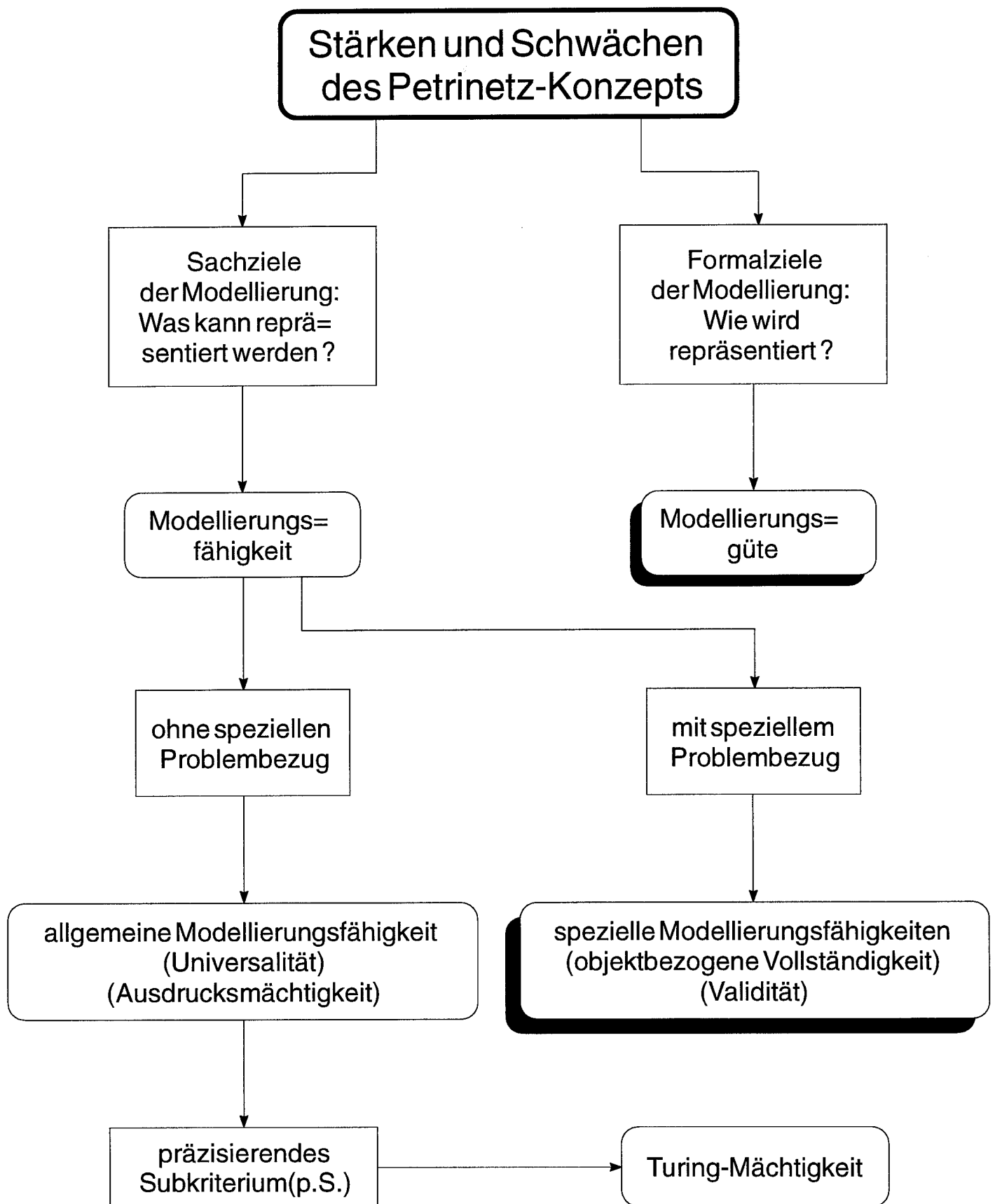


Abb. 206: Beurteilungsnetz - erster Teil

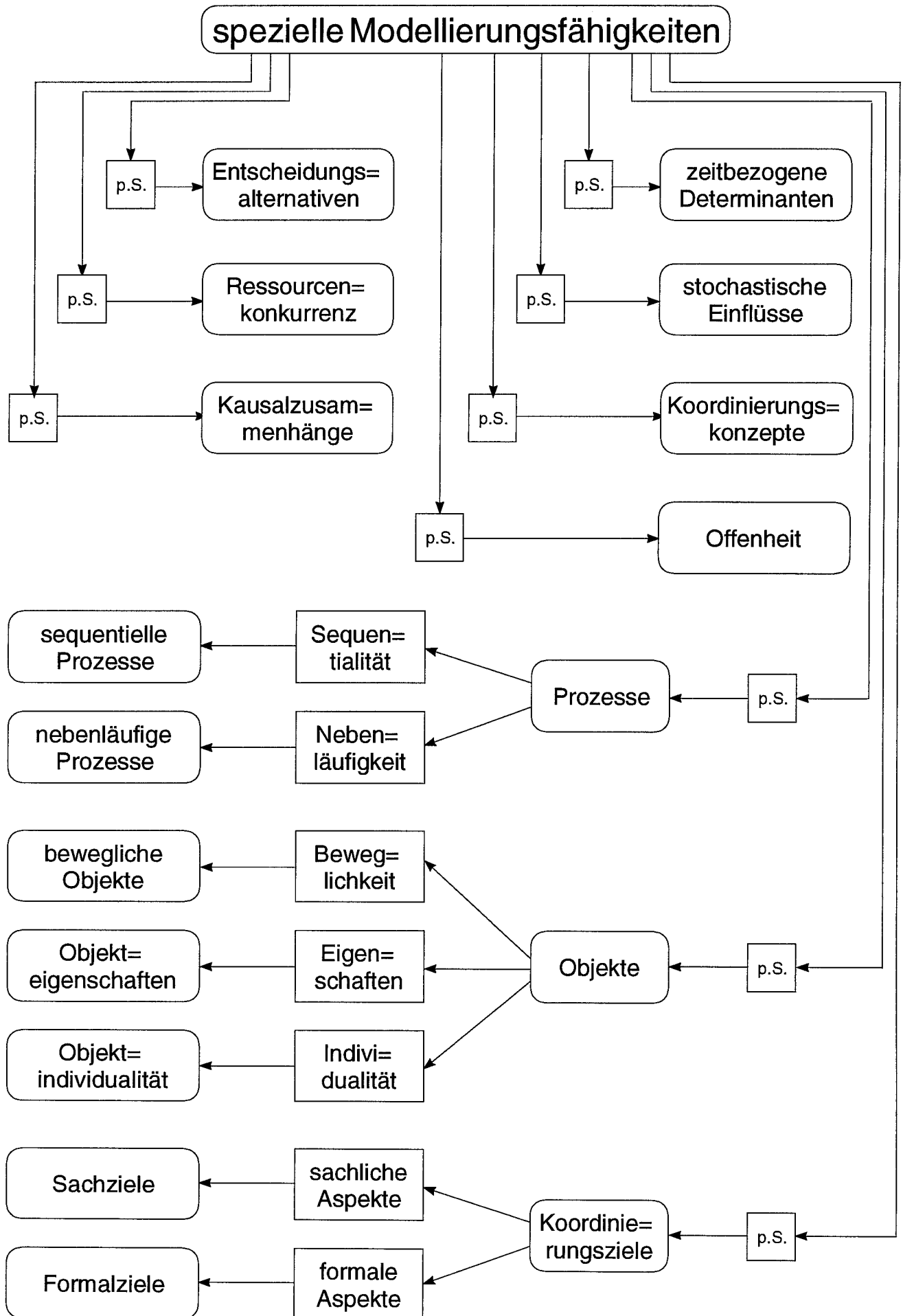


Abb. 207: Beurteilungsnetz - zweiter Teil

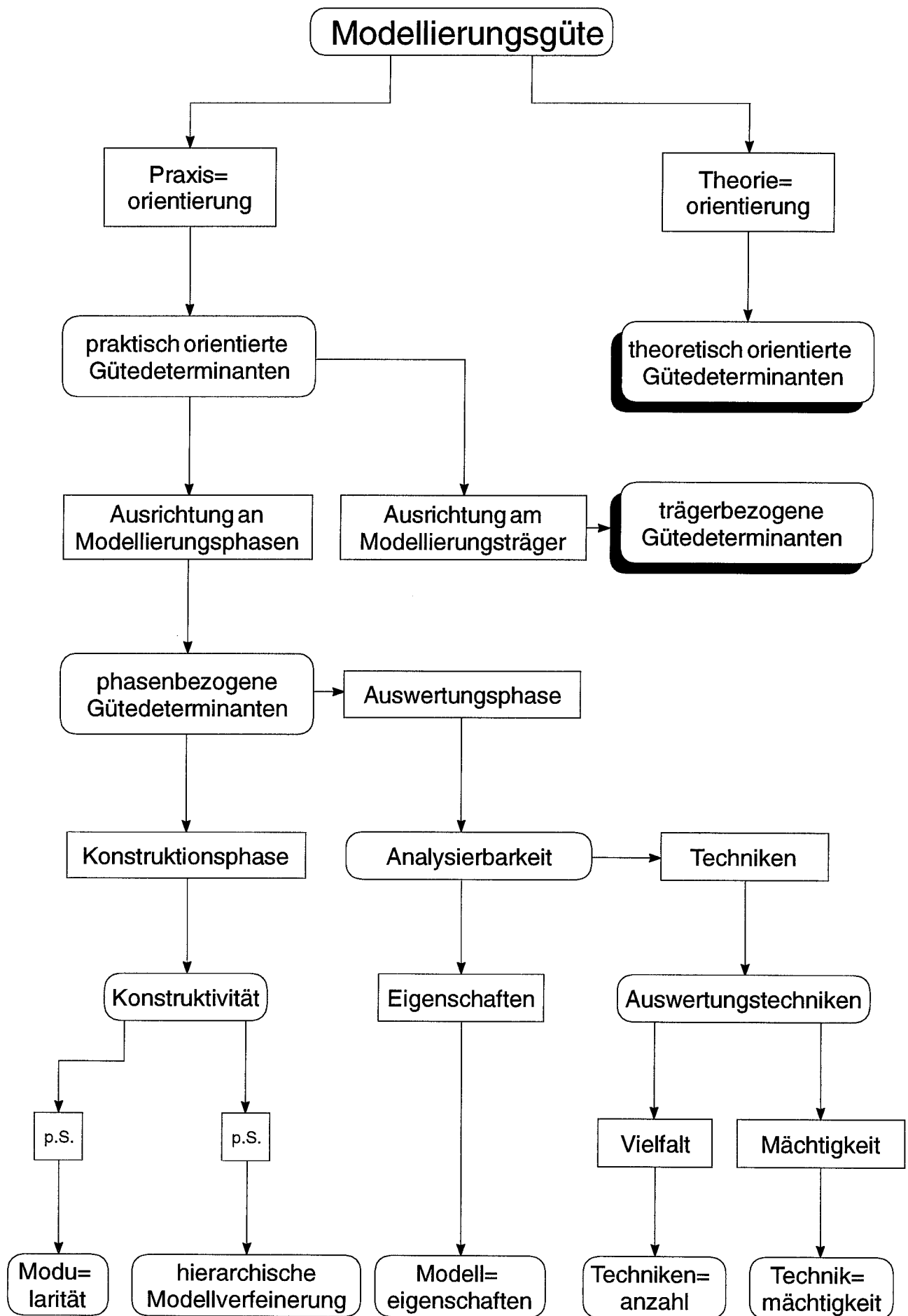


Abb. 208: Beurteilungsnetz - dritter Teil

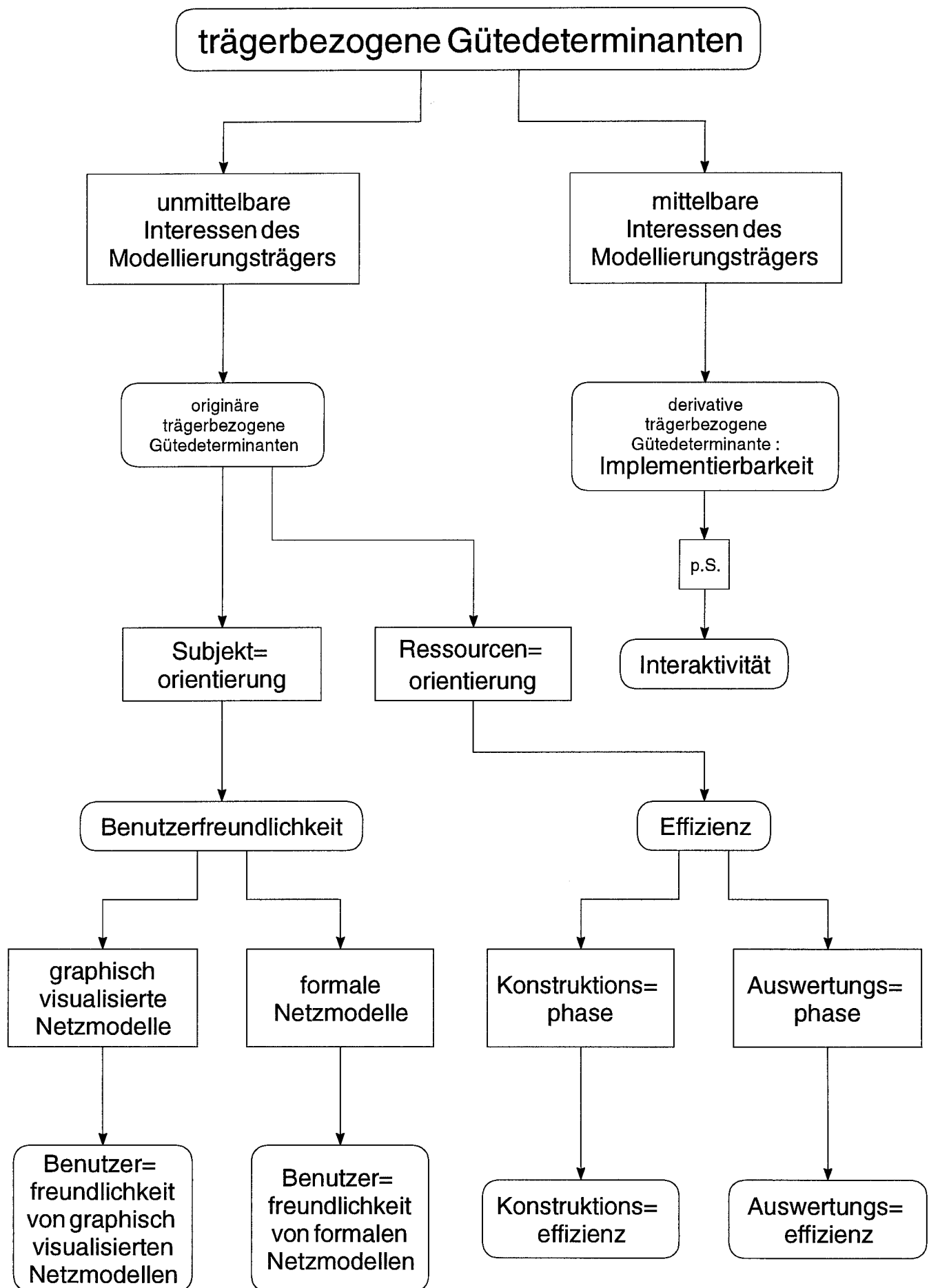


Abb. 209: Beurteilungsnetz - vierter Teil

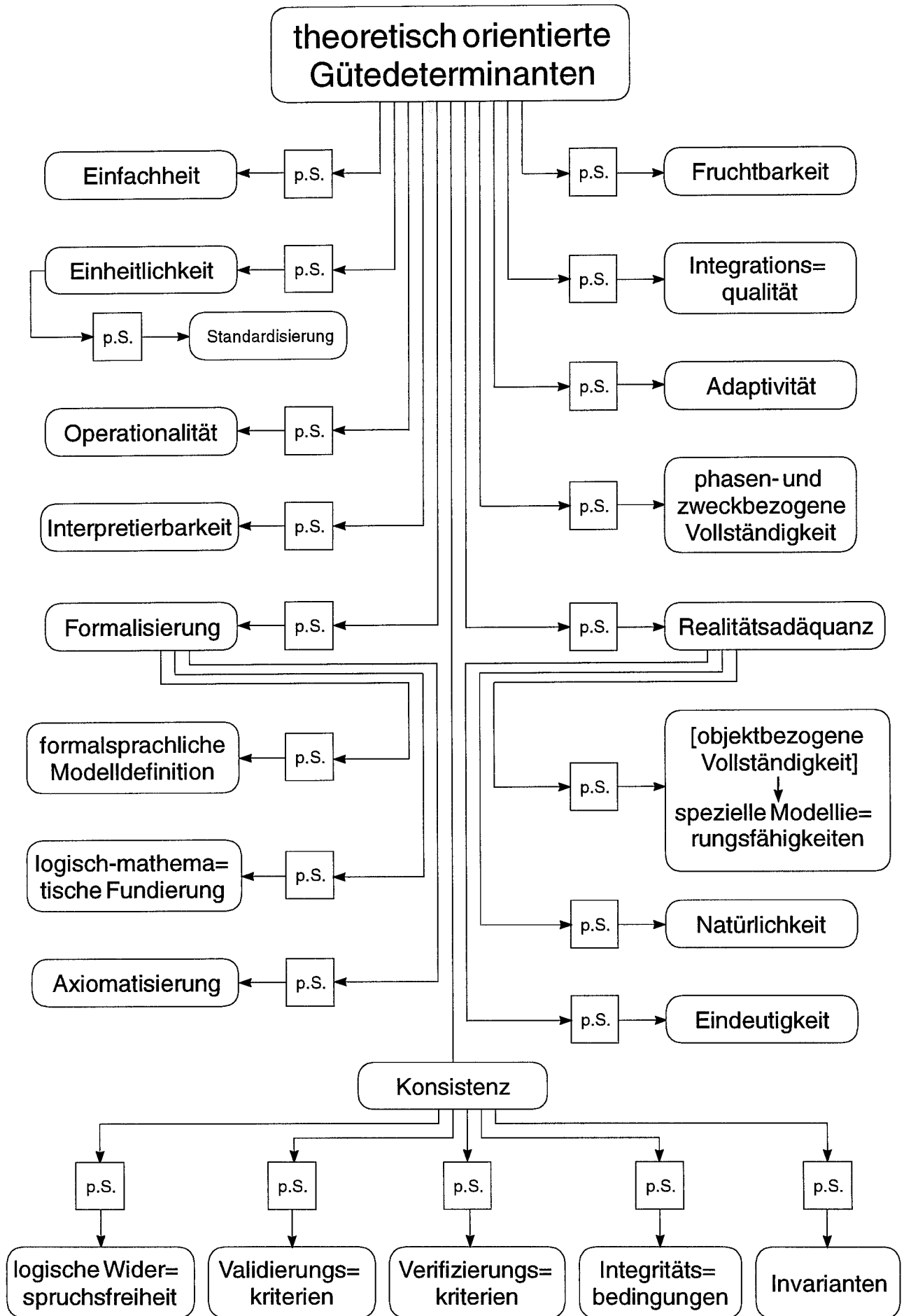


Abb. 210: Beurteilungsnetz - fünfter Teil

Beurteilungskriterien für ein Modellierungskonzept

1 Modellierungsfähigkeit

1.1 allgemeine Modellierungsfähigkeit

- * Turing - Mächtigkeit

1.2 spezielle Modellierungsfähigkeiten

- * sequentielle Prozesse
- * nebenläufige Prozesse
- * Entscheidungsalternativen
- * Ressourcenkonkurrenz
- * Kausalzusammenhänge
- * bewegliche Objekte
- * Objekteigenschaften
- * Objektindividualität
- * zeitbezogene Determinanten
- * stochastische Einflüsse
- * Koordinierungskonzepte
- * Sachziele
- * Formalziele
- * Offenheit



Abb. 211: Beurteilungsliste - erster Teil

2 Modellierungsgüte

2.1 praktisch orientierte Gütedeterminanten

2.1.1 Modellierungsphasen

2.1.1.1 Konstruktivität

- * Modularität
- * hierarchische Modellverfeinerung

2.1.1.2 Analysierbarkeit

- * Modelleigenschaften
- * Technikenanzahl
- * Technikmächtigkeit

2.1.2 Modellierungsträger

2.1.2.1 Benutzerfreundlichkeit

- * graphisch visualisierte Netzmodelle
- * formale Netzmodelle

2.1.2.2 Effizienz

- * Konstruktionseffizienz
- * Auswertungseffizienz

2.1.2.3 Implementierbarkeit

- * Interaktivität



2.2 Theoretisch orientierte Gütedeterminanten

2.2.1 Konsistenz

- * logische Widerspruchsfreiheit
- * Validierungskriterien
- * Verifizierungskriterien
- * Integritätsbedingungen
- * Invarianten

2.2.2 Eindeutigkeit

2.2.3 Formalisierung

- * formalsprachliche Modelldefinition
- * logisch-mathematische Fundierung
- * Axiomatisierung

2.2.4 Interpretierbarkeit

2.2.5 Operationalität

2.2.6 Realitätsadäquanz

- * objektbezogene Vollständigkeit
→ spezielle Modellierungsfähigkeiten
- * Natürlichkeit

2.2.7 Einfachheit

2.2.8 Einheitlichkeit

2.2.9 phasen- und zweckbezogene Vollständigkeit

2.2.10 Adaptivität

2.2.11 Integrationsqualität

2.2.12 Fruchtbarkeit

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. auch die analoge Differenzierung zwischen absoluten und relationalen Beurteilungsansätzen bei OPP,K. (1977), S. 123.

2) Zwar wurde das Petrinetz-Konzept zuvor schon mit der Netzplantechnik bzw. mit dem Konzept der OR-Programme verglichen. Doch erstreckte sich dieser Vergleich nur darauf, die *wesentlichen* Unterschiede der Modellierungskonzepte herauszustellen. Weder die Netzplantechnik noch das Konzept der OR-Programme wurden so detailliert und so systematisch betrachtet, wie es für die Überprüfung der nachfolgend thematisierten Beurteilungskriterien erforderlich wäre. Beispielsweise wurden für die beiden vorgenannten Modellierungskonzepte Aspekte der Axiomatisierung oder der Benutzerfreundlichkeit nicht behandelt. Um auch diese - und alle weiteren nicht beachteten - Gesichtspunkte beurteilen zu können, müßten Netzpläne und OR-Programme mit ähnlicher Intensität erforscht werden, wie es in dieser Arbeit für Petrinetze geschah. Davon hat der Verf. aber von vornherein Abstand genommen, indem er seine Untersuchungen auf das Petrinetz-Konzept fokussierte.

3) Die konzeptendogene Beurteilung läßt sich wegen ihres Außerachtlassens alternativer Modellierungskonzepte anhand einer metaphorischen Umschreibung verdeutlichen. Sie wurde von HERRMANN,T. (1976), S. 34, im Hinblick auf wissenschaftliche Forschungsprogramme plastisch formuliert: "... der sozusagen 'natürliche' Fall liegt dann vor, wenn man für etwas Problematisiertes Lösungen, Erklärungen, Rechtfertigungen ... sucht, nicht aber wenn man eine invariante Konzeption (Theoriekonstruktion o.ä.) daraufhin überprüft, was alles aus ihr zu machen ist oder was alles man mit ihr bewältigen kann. Zumindest mag diese letztere '*Strategie des Werkzeugmachers*', der für ein von ihm hergestelltes Werkzeug Verwendungszwecke sucht und ausprobiert, gegenüber der '*Strategie des Handwerkers*', der für die Herstellung einer Sache das jeweils beste Werkzeug sucht und verwendet, als die weniger allgemeine, als eine Sonderform gelten können." (kursive Hervorhebungen im Original). Vgl. auch die Rezeption dieser Strategiedifferenzierung im betriebswirtschaftlichen Kontext durch SIKORA,K. (1986), S. 11f.; WENKEL (1988), S. 83, 88 u. 99ff., und SIKORA,K. (1989), Sp. 1958. Eine inhaltlich ähnliche, aber anders formulierte Unterscheidung findet sich bei SCHNEIDER,D. (1972), S. 461.

Die Strategie des Handwerkers wird von HERRMANN,T. (1976), S. 29ff., als Forschungsprogramm vom Typ A (im Original: "Typ a") präzisiert. Bei einem solchen Forschungsprogramm werden auf einen invarianten Gegenstandsbereich (domain) unterschiedliche Konzepte als "Werkzeuge" angewendet. Es handelt sich daher um den Typ einer "Domainforschung". Vgl. zu diesem Forschungstyp auch HERRMANN,T. (1979), S. 200ff., 204ff. u. 211ff.

Die Strategie des Werkzeugmachers kennzeichnet HERRMANN,T. (1976), S. 29ff., dagegen als Forschungsprogramm vom Typ B (im Original: "Typ b"). Dort wird versucht, ein invariantes Konzept - das "Werkzeug" oder "Quasi-Paradigma" - auf unterschiedliche Gegenstandsbereiche anzuwenden. Folglich liegt ein "quasiparadigmatischer" Forschungstyp vor. Vgl. dazu auch HERRMANN,T. (1979), S. 200, 202f. u. 205f. Vgl. des weiteren die Ausführungen zur "Paradigmaforschung" bei SIKORA,K. (1986), S. 11; WENKEL (1988), S. 83 u. 88; SIKORA,K. (1989), Sp. 1958. Die Strategie des Werkzeugmachers klingt auch im Vorwurf von HOLUB (1990), S. 269, an, "daß die Aufgabe des formal orientierten Ökonomen nicht mehr lautet: 'Finde zu einer Problemstellung die adäquate Formulierung', sondern: 'Finde zu einer mathematischen Technik, die Du gelernt hast oder für die Du wenigstens ein Computerprogramm besitzt, die passende ökonomische Fragestellung.'" (Orthographie gemäß Original). In eine ähnliche Richtung zielt der Vorwurf von SCHNEIDER,D. (1972), S. 461, gegenüber der "Unternehmensforschung ... : Man übernimmt oder entwickelt eine Rechentechnik, für die dann Anwendungsfälle gesucht werden." Die eng verwandte Vorstellung, bereits vorhandene Theorien suchten auf betrieblichen Handlungsarenen nach ihren Problemen, zu deren Lösung die Theorien geeignet wären, thematisieren COHEN,M. (1976), S. 25ff.; KIRSCH (1981a), S. 663; KIRSCH (1984), S. 343; KIRSCH (1988), S. 162; COHEN,M. (1990), S. 330ff.

Der Verf. erkennt zwar die "Strategie des Handwerkers" als idealtypisch erstrebenswert an. Doch werden die Untersuchungen dieser Arbeit aufgrund ihrer Rahmensezung realtypisch von der "Strategie des Werkzeugmachers" beherrscht. Vgl. dazu auch die subtil abwägende Argumentation von HERRMANN,T. (1976), S. 35ff. Er belegt mit Plausibilitätsargumenten die realtypische Dominanz des quasiparadigmatischen Forschungstyps B. Abweichender Ansicht sind dagegen SIKORA,K. (1986), S. 12; WENKEL (1988), S. 83 u. 99ff., sowie SIKORA,K. (1989), Sp. 1958. Sie empfehlen für den betriebswirtschaftlichen Bereich inexakter Planungen den Typ der "multiparadigmatischen" Domainforschung.

4) Der Einfachheit halber wird zugelassen, die beiden Netzklassen der Synthetischen Kernnetze und der Erweiterten Synthetischen Netze zur (Super-)Klasse der Synthetischen Netze zusammenzufassen, wenn sich die beiden Netzklassen hinsichtlich eines Beurteilungskriteriums nicht wesentlich unterscheiden.

5) Strenggenommen werden nicht die Modellierungsstärken und -schwächen des Petrinetz-Konzepts an sich beurteilt. Vielmehr wird nur ein Urteil über dasjenige Koordinierungskonzept abgegeben, das in dieser Arbeit auf der Basis von Petrinetzen für die Modellierung von Prozeßkoordinierungen entwickelt worden ist. Dieses Koordinierungskonzept umfaßt über das Petrinetz-Konzept hinaus weitere konzeptionelle Bestandteile, die in die Konzeptualisierung der Koordinierungsprobleme eingeflossen sind. Hierzu gehören beispielsweise die zeitbezogene Strukturierung der Prozesse in dynamischen Systemen und die prädikatenlogische Beschreibung von Koordinierungsproble-

men. Alle diese konzeptionellen Einflüsse gehören zu dem hier untersuchten netzbasierten Modellierungskonzept. Das zu beurteilende Modellierungskonzept ist also ein Amalgam aus verschiedenartigen, miteinander verwobenen Teilkonzepten. Wenn von einer Beurteilung "des" Petrinetz-Konzepts gesprochen wird, so ist dies stets als sprachliche Vereinfachung der tatsächlich gemeinten Beurteilung des netzbasierten Konzeptamalgams gemeint. Dies wird besonders deutlich, wenn die Fähigkeit zur Modellierung stochastischer Einflußgrößen beurteilt wird.

Die gleiche Amalgamproblematik besteht für alternative Modellierungskonzepte. Auch deren Beurteilung hängt von allen konzeptionellen Beiträgen ab, die in ein betrachtetes Modellierungskonzept für gleichartige Koordinierungsprobleme tatsächlich eingeflossen sind. Die Konzeptamalgame der alternativen Modellierungskonzepte brauchen - abgesehen von der ohnehin nicht geteilten Komponente des Petrinetz-Konzepts - keineswegs mit dem Amalgam des netzbasierten Modellierungskonzepts übereinzustimmen. Daher ist die Validität eines Vergleichs zwischen dem Petrinetz-Konzept einerseits und alternativen Modellierungskonzepten andererseits grundsätzlich in Frage gestellt. Denn vermeintlich erkannte Unterschiede zwischen Petrinetz-Konzept und Alternativkonzepten könnten tatsächlich auf Devianzen hinsichtlich solcher Konzeptkomponenten beruhen, um die das Petrinetz-Konzept bei der netzbasierten Modellierung von Koordinierungsproblemen ergänzt wurde. Diese Validitätsproblematik kann in der vorliegenden Arbeit nicht überwunden werden. Dies ist aber auch nicht notwendig, weil kein konzeptexogener relativer Vorteilhaftigkeitsvergleich erfolgt. Darauf wurde schon hingewiesen. Darüber hinaus wäre es infolge des Konzeptverbunds ohnehin schwierig, unter Umständen sogar unmöglich, einzelne Beurteilungsergebnisse jeweils einer bestimmten Komponente eines Modellierungskonzepts verursachungsgerecht zuzuordnen. Daher muß auf der grundsätzlichen Feststellung bestanden werden, daß - ungeachtet sprachlicher Vereinfachungen - im allgemeinen keine reinen Konzepte, sondern nur Konzeptamalgame beurteilt werden. Vgl. dazu auch die Diskussion partieller Paradigmenvergleiche bei OPP, K. (1977), S. 124f. Allerdings vertritt die OPP die Ansicht, die isolierte Beurteilung einzelner Paradigmenbestandteile sei grundsätzlich möglich. Dabei entsprechen seine Paradigmenbestandteile den zuvor erwähnten Konzeptkomponenten.

6) Es wird darauf verzichtet, jedes einzelne Urteil mit den entsprechenden Passagen aus der hier vorgelegten Ausarbeitung zu belegen. Im Zweifelsfall kann das ausführliche Inhaltsverzeichnis benutzt werden. Lediglich auf einige herausragende Punkte wird ausdrücklich verwiesen. Falls ein Urteil jedoch von Aspekten abhängt, die für die Thematik dieser Arbeit bis dahin noch keine Rolle spielten, werden sie explizit behandelt.

7) Dieser Kriterienkatalog kann nur zum Teil auf bereits ausgearbeitete Beurteilungsschemata zurückgreifen. Denn diese Vorlagen wurden überwiegend zur *allgemeinen* Beurteilung von Modellen, Methoden oder (Automatischen) Informationsverarbeitungssystemen konzipiert. Vgl. zu solchen allgemeinen Kriterienkatalogen YOUNG, S. (1966), S. 220ff.; SOUDER (1972), S. B-527ff.; FRANK, J. (1976), S. 39ff.; PFOHL (1977), S. 274ff.; SZYPERSKI (1978), S. 210ff.; SCHNEIDER, H.-J. (1978), S. 53ff.; WINAND (1978), S. 73f. u. 129ff.; KEEN (1978), S. 215ff.; SZYPERSKI (1979a), S. 121ff.; SZYPERSKI (1980a), S. 132ff.; CZERANOWSKY (1980), S. 53ff.; STEINKE (1980), S. 115ff.; FISCHER, J. (1981), S. 273ff.; VIEFHUES (1982), S. 144ff.; JÄGER, P. (1982), S. 145ff.; SEIBT (1983), S. 18ff.; GROCHLA (1984), S. 118f.; SCHAEFER, R. (1985), S. 216ff.; SCHWEIZERISCHE VEREINIGUNG DATENVERARBEITUNG (1985), S. 101ff.; DWORATSCHEK (1985), S. 186f.; LIEBOWITZ (1985), S. 567f.; STELLMACHER (1985), S. 29 u. V.; LOVELACE (1987), S. 244ff.; HASENKAMP (1987), S. 57ff.

Die speziellen Eigenarten von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen finden in den vorgenannten Quellen keine besondere Beachtung. Sie müssen aber berücksichtigt werden, um eine problemangemessene Beurteilung des Petrinetz-Konzepts zu erlauben. Gleicher Ansicht ist EEKHOFF (1981a), S. 52: "Voraussetzung ... ist ein umfassender, auf das Entscheidungsproblem bezogener Katalog von Zielkriterien, mit dem die relevanten Zielwirkungen beschrieben werden können." Zu den wenigen Ausnahmen, die sich ausdrücklich mit Beurteilungskriterien für Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme beschäftigen, zählen die Werke ELLINGER (1977a), S. 23ff., und ELLINGER (1985), S. 79ff. u. 197ff. Doch erstrecken sich die Kriterienkataloge, die dort präsentiert werden, auf die Bewertung konkreter PPS-Systeme. Sie enthalten kaum Hinweise darauf, wie sich jene Modellierungskonzepte beurteilen lassen, die solchen Systemen zugrundeliegen.

Im folgenden wird bei der Belegung von Beurteilungskriterien nicht mehr hinsichtlich ihres Bezugsobjekts differenziert. Sie werden stets auf hier interessierende Thematik bezogen, Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen zu modellieren. Dies gilt auch dann, wenn die Kriterien in den jeweils angeführten Quellen auf andere Kontexte - wie z.B. die Beurteilung von Softwaresystemen - bezogen werden.

8) Die Beurteilungskriterien dienen als Instrumente der Komplexitätsbewältigung. Ausgangspunkt ist die allgemeine Beurteilungsaufgabe, den "Nutzen" eines Modellierungskonzepts zu bestimmen. Dies wird z.B. von ZAVE (1976), S. 35, explizit gefordert. Der Nutzenbegriff wird inhaltlich unbestimmt gelassen, um ihn gegenüber unterschiedlichen Nutzenvorstellungen von verschiedenen Modellierungsträgern offenzuhalten. Diese begriffliche Offenheit gilt insbesondere auch für die Konzeption des "Nettonutzens", der Aspekte der "Konzeptkosten" umgreift. Die Beurteilung des Konzeptnutzens stellt jedoch eine hochkomplexe Aufgabe dar, deren Erfüllung auf vielfache Weise behindert wird. Vgl. zu den mannigfaltigen Schwierigkeiten solcher Nutzenbestimmungen PFOHL (1977), S. 276 u. 280; BRETZKE (1980), S. 199 u. 202; VIEFHUES (1982), S. 149f. Aufgrund dieser Beurteilungsprobleme wird die schwer zu durchdringende Gesamtaufgabe der Konzeptbeurteilung in leichter zu handhabende Teilaufgaben zerlegt. Jede Teilaufgabe erstreckt sich nur noch auf die Untersuchung eines überschaubaren Beurteilungskriteriums.

Es könnte nach den "Kriterien" gefragt werden, nach deren Maßgabe die Auswahl der hier zugrundegelegten Beurteilungskriterien erfolgt ist. Eine solche Frage nach den auswahlbestimmenden Metakriterien betrachtet der Verf. jedoch als grundsätzlich verfehlt. Denn sie verfängt sich notwendig im MÜNCHHAUSEN-Trilemma, das bereits in einer früheren Anmerkung vorgestellt wurde. Es ist offensichtlich, daß sich jede Angabe von Metakriterien sofort wieder hinterfragen läßt, warum eben diese - und keine anderen - Metakriterien verwendet worden seien. Dies impliziert die Suche nach begründenden Meta-Metakriterien usw. Aufgrund der Ausführungen zum MÜNCHHAUSEN-Trilemma wird hier grundsätzlich davon Abstand genommen, die Auswahl der Beurteilungskriterien durch Metakriterien nochmals rechtfertigen zu wollen. Vgl. dazu auch die Quellen, auf die zur Vertiefung des MÜNCHHAUSEN-Trilemma verwiesen wurde. Anstelle einer fruchtlosen Suche nach Metakriterien wird die Demarkationsfunktion des Kriterienkatalogs herausgestellt, der nachfolgend entwickelt wird. Er grenzt jenen Bereich von gemeinsam geteilten Voraussetzungen ein, der ausreicht, um die Beurteilungen des Petrinetz-Konzepts akzeptieren zu können. Vgl. dazu die Erläuterungen zur Demarkationsfunktion von Prämissensetzungen. Darüber hinaus wird auf die Quellen aufmerksam gemacht, die in der voranstehenden Anmerkung aufgelistet wurden. auch dort werden die vorgestellten Kriterienkataloge nicht durch "dahinterliegende" Metakriterien gerechtfertigt. Schließlich wird an einzelnen Stellen verdeutlicht, warum einzelne Kriterien in die Konzeptbeurteilung nicht eingeflossen sind. Dabei handelt es sich aber nur um erhellende Plausibilitätsargumente. Übergeordnete Rechtfertigungskriterien werden dadurch nicht eingeführt.

9) Vgl. die entsprechenden Erläuterungen anlässlich der modelltheoretischen Rahmenlegung.

10) Wegen seines Umfangs mußte das Beurteilungsnetz in mehrere Teilnetze zerlegt werden. Den Zusammenhang der Teilnetze stiften Schnittstellen, in denen jeweils mindestens zwei Teilnetze übereinstimmen. Um sie von den Synchronisationsstellen aus dem Netzmodell der Fallstudie abzuheben, werden die Schnittstellen bei ihrem erstmaligen Auftreten schattiert dargestellt. Diese Schattierung dient aber nur der Anschaulichkeit. Sie besitzt keinen Bezug zu der früher benutzten Schattierung für Makroknoten.

Da sich die Teilnetze aufgrund ihrer Beschriftungen selbsterklärend verhalten, werden sie hier nicht näher erläutert. Darüber hinaus werden Erklärungen einzelner Aspekte als bekannt vorausgesetzt, die in dieser Arbeit schon in anderen Zusammenhängen vorgetragen wurden. Dies gilt z.B. für den Sach- und Formalzielcharakter von Modellierungsfähigkeit bzw. -güte.

11) Als wichtigste Differenzierungsaspekte werden genau diejenigen angesehen, die in der Gliederung dieser Arbeit als eigenständige Gliederungspunkte aufgeführt sind. Diese Gesichtspunkte sind in der Beurteilungsliste durch eine Dezimalklassifizierung hervorgehoben. Weiterführende Ausdifferenzierungen der "wichtigsten" Beurteilungskriterien werden durch vorangestellte "*" gekennzeichnet. Die zugehörigen Beurteilungskriterien sind in dieser Arbeit nicht als eigenständige Gliederungspunkte enthalten. Statt dessen werden sie innerhalb einzelner Kapitel als präzisierende Subkriterien (p.S.) behandelt.

12) Bei der Visualisierung des graphisch repräsentierten Beurteilungsnetzes wurden hingegen die Kriterien so angeordnet, daß sich eine "gefällig" anmutende Netzgraphik erzielen ließ.

13) Zu diesem Zweck werden für die grobe ordinale Skalierung der konzeptendogenen Vergleichsurteile Kriterienausprägungen verwendet, die eine absolute Positionierung der Netzklassen *andedeut*. Beispielsweise drücken die beiden Kriterienausprägungen "niedrig erfüllt" und "hoch erfüllt" nicht nur eine relative Anordnung der betroffenen Netzklassen aus. Vielmehr klingt in ihnen ebenso ein deutlicher Hinweis auf das absolute Ausmaß der Kriterien-erfüllung an. Jedoch wird dieses absolute Erfüllungsausmaß nicht präzise bestimmt. Weder werden Maßstäbe oder Skalennullpunkte für die absolute Kriterienerfüllung unterbreitet. Noch werden diejenigen Schwellenwerte festgelegt, deren Unter- oder Überschreiten z.B. eine "geringe" von einer "ausgezeichneten" Kriterienerfüllung trennt. Daher kann nicht von einer Beurteilung der absoluten Vorteilhaftigkeit der Netzklassen gesprochen werden. Statt dessen werden die verglichenen Netzklassen nur vor dem Hintergrund solcher Positionsandeutungen relativ zueinander angeordnet. Vgl. dazu die späteren Erläuterungen zu quasi-ordinalen Skalenniveaus.

Mitunter werden die Andeutungen von absoluten Positionierungen durch die Angabe von Referenzpunkten verdeutlicht. Dies betrifft z.B. den Referenzpunkt "TURING-Mächtigkeit". Dabei wird die allgemeinen Modellierungsfähigkeit der Netzklassen relativ zur Ausdrucksmächtigkeit von TURING-Automaten beurteilt. Aus dieser Perspektive stellt die TURING-Mächtigkeit einen Fixpunkt an. Er wird dazu benutzt, um die absolute Vorstellung von einer "ausgezeichneten" allgemeinen Modellierungsfähigkeit zu konkretisieren. Modellierungskonzepte, welche die Ausdrucksmächtigkeit von TURING-Automaten erreichen, kann daher die gleiche absolute Positionierung einer "ausgezeichneten" allgemeinen Modellierungsfähigkeit zugemessen werden. Alle anderen Modellierungskonzepte, denen die TURING-Mächtigkeit fehlt, müssen dagegen eine geringere als die ausgezeichnete allgemeine Modellierungsfähigkeit besitzen.

14) Solche relativen Leistungsvergleiche erfolgen vornehmlich mit Bezug auf Netzpläne oder OR-Programme. Dabei wird auf die Ausführungen zurückgegriffen, die im achten Teilband erfolgten.

15) Das kann erst nachvollzogen werden, wenn die Beurteilungskriterien im einzelnen vorgestellt worden sind. Daher wird dies erst an späterer Stelle näher erläutert werden. Vgl. dazu auch die späteren Ausführungen zur Quasi-Ordinalität.

16) Vgl. zum Erkenntnistyp explorativer Forschung KUBICEK (1977), S. 13 u. 16; WOLLNIK (1977), S. 42ff.; KIRSCH (1977c), S. 241f.; KIRSCH (1984), S. 761ff., 765 u. 1092; WOLLNIK (1986), S. 16f. u. 237f.; THOM (1987), S. 71ff., insbesondere S. 73f.; WOHLGEMUTH (1989a), S. 94f.; HILTZ (1990), S. 743(ff.), 755 u. 757.

Die vorgenannten Quellen betreffen die ursprüngliche Einbettung explorativer Forschung in einen empirischen Argumentationszusammenhang. Dieser wird hier auf einen konzeptionellen Ansatz übertragen.

17) In dieser Hinsicht wäre es vor allem wünschenswert, die Netzplantechnik und das Konzept der OR-Programme in das nachfolgend vorgelegte Beurteilungsschema einzubetten. Auf diese Weise ließen sich die partikulären Hinweise auf Netzpläne und OR-Programme, die bei der Erarbeitung des Stärken/Schwächen-Profiles anfallen werden, zu einem vollständigen relativen Vorteilhaftigkeitsvergleich ausbauen. Er erstreckte sich zwischen dem Petrinetz-Konzept einerseits und der Netzplantechnik oder dem Konzept der OR-Programme andererseits.

18) Erst dann kann die relative Vorteilhaftigkeit des Petrinetz-Konzepts so untersucht werden, wie es die idealtypische "Strategie des Handwerkers" im Rahmen einer multiparadigmatischen Domainforschung erfordert. Die Beurteilung der absoluten Vorteilhaftigkeit hält der Verf. dagegen aus den Gründen, die er bereits an früherer Stelle erwähnte, für ausgeschlossen.

9.2 Entfaltung eines Stärken/Schwächen-Profiles

9.2.1 Beurteilung der Modellierungsfähigkeit

9.2.1.1 Allgemeine Modellierungsfähigkeit

Die Universalität¹⁾ eines Modellierungskonzepts beleuchtet seine Ausdrucksmächtigkeit oder allgemeine Modellierungsfähigkeit. Petrinetze werden weithin als überaus ausdrucksmächtige Modellierungsmittel geschätzt²⁾. Doch bleibt oftmals unklar, auf welcher Grundlage oder anhand welcher Bezugspunkte solche Urteile abgegeben werden. Daher wird im folgenden der Aspekt der Ausdrucksmächtigkeit inhaltlich ausdifferenziert³⁾.

Um die Universalität eines Konzepts zu beurteilen, bieten sich zwei alternative Ansätze an⁴⁾. Einerseits können Klassen gleichartiger Ausdrücke als feste Bezugspunkte vorgegeben werden. Es wird dann untersucht, ob die Ausdrucksmächtigkeit eines Modellierungskonzepts diese Ausdrucksklassen überdeckt. Auf diese Weise läßt sich ein einzelnes Modellierungskonzept beurteilen. Die festgelegten Ausdrucksklassen erlauben dabei eine absolute Positionierung⁵⁾ des beurteilten Modellierungskonzepts. Andererseits ist es möglich, auf eine abstrakte⁶⁾ zweistellige Simulationsrelation zurückzugreifen. Diese Relation wird von zwei Netzklassen⁷⁾ genau dann erfüllt, wenn es gelingt, jedes Konstrukt aus der ersten Netzklasse durch ein Konstrukt aus der zweiten Netzklasse äquivalent⁸⁾ wiederzugeben⁹⁾. Falls diese Voraussetzung zutrifft, läßt sich die erste Netzklasse durch die zweite Netzklasse "simulieren". Die simulierende Netzklasse ist dann qua Voraussetzung mindestens so ausdrucksmächtig wie die simulierte Netzklasse.

Zunächst wird auf den ersten Beurteilungsansatz eingegangen, der auf festen Bezugspunkten beruht. Für die Vorgabe von Ausdrucksklassen bestehen in der einschlägigen Literatur keine übereinstimmenden Konventionen. Lediglich der Vergleich mit der Ausdrucksmächtigkeit von TURING-Automaten ist weithin etabliert. Die "Skalierung" der Ausdrucksmächtigkeit eines Modellierungskonzepts wird hier jedoch breiter angelegt. Sie erstreckt sich auf folgende Ausdrucksklassen:

- einfache arithmetische Ausdrücke, die ausschließlich die Addition und Subtraktion im Bereich der nicht-negativen Ganzzahlen zulassen (nicht-negative PRESBURGER-Arithmetik);
- beliebige arithmetische Ausdrücke;
- beliebige Ausdrücke aus einer sortierten Algebra;
- beliebige Ausdrücke der konventionellen Prädikatenlogik 1. Stufe;
- beliebige Ausdrücke aus einer sortierten Prädikatenlogik 1. Stufe;
- alle Ausdrücke, die sich von TURING-Automaten bewältigen lassen¹⁰⁾.

Die Modellierungsfähigkeit nimmt - mit einer Ausnahme - von der ersten zur letzten Ausdrucksklasse zu. Lediglich beim Übergang von Ausdrücken aus einer sortierten Algebra zu Ausdrücken, die aus der konventionellen Prädikatenlogik 1. Stufe stammen, geschieht weder eine echte Vergrößerung noch eine echte Verminderung der Ausdrucksmächtigkeit. Denn einerseits fehlt den erstgenannten algebraischen Ausdrücken noch der Formulationsreichtum von Prädikaten. Andererseits kennt die konventionelle Prädikatenlogik keine Sortierung ihrer Ausdrücke.

Vor dem Hintergrund der oben aufgelisteten 6 Ausdrucksklassen fällt die Universalität von Stelle/Transition-Netzen gering aus. Sie überdecken nur die Ausdrucksmächtigkeit der nicht-negativen PRESBURGER-Arithmetik. Einen deutlichen Sprung macht die allgemeine Modellierungsfähigkeit von Synthetischen Kernnetzen. Ihr Ausdrucksvermögen umschließt die ersten 5 Ausdrucksklassen. Damit überdecken sie die gesamte Prädikatenlogik 1. Stufe¹¹⁾ einschließlich ihrer arithmetischen und algebraischen Erweiterungen. Aber erst die Erweiterten Synthetischen

Netze zeichnen sich durch den höchsten Universalitätsgrad aus, der auch die Ausdrucksmächtigkeit von TURING-Automaten umfaßt.

Die TURING-Mächtigkeit läßt sich auch als ein selbständiges Subkriterium für die Modellierungsfähigkeit eines Konzepts verwenden. Es kann dann nur auf einer ordinalen Skala festgestellt werden, ob diese Ausdrucksmächtigkeit entweder vorliegt oder aber nicht erfüllt ist. Aufgrund des Vorhergesagten gilt: Stelle/Transition-Netze und Synthetische Kernnetze besitzen keine TURING-Mächtigkeit. Erweiterte Synthetische Netze besitzen dagegen die gleiche Universalität wie TURING-Automaten.

Wenn der alternative Beurteilungsansatz der abstrakten Simulationsrelation gewählt wird, ergibt sich ein analoges Bild: Jedes Stelle/Transition-Netz kann durch ein Synthetisches Kernnetz simuliert werden und jedes Synthetische Kernnetz durch ein Erweitertes Synthetisches Netz. Die beiden Umkehrungen treffen jedoch nicht zu. Beispielsweise lassen sich weder die Obliganten noch die Schaltprioritäten von Erweiterten Synthetischen Netzen in Synthetischen Kernnetzen wiedergeben. Ebenso wenig ist es möglich, die Attributmarken von Synthetischen Kernnetzen in Stelle/Transition-Netzen zu erfassen. Folglich verhalten sich Synthetische Kernnetze ausdrucksmächtiger als Stelle/Transition-Netze und Erweiterte Synthetische Netze ausdrucksmächtiger als Synthetische Kernnetze.

Die abstrakte Simulationsrelation kann auch auf den früheren Vergleich von Netzplantechnik und Petrinetz-Konzept übertragen werden¹²⁾. Dort wurde aufgezeigt, daß sich alle Konstrukte aus Netzplänen durch äquivalente Konstrukte aus Petrinetzen wiedergeben lassen. Dazu reichen schon Synthetische Kernnetze aus. Folglich ist es möglich, durch Synthetische Kernnetze alle Netzpläne zu "simulieren". Die umgekehrte Simulationsrichtung besteht jedoch nicht. Denn es existieren Konstrukte aus Erweiterten Synthetischen Netzen, die sich in Netzplänen nicht darstellen lassen. Dazu gehören vor allem negativ-bedingte Aktionsanweisungen. Dieser Simulationsaspekt wird hier aber nicht weiter vertieft, weil das intendierte Stärken/Schwächen-Profil keinen systematischen Vergleich des Petrinetz-Konzepts mit alternativen Modellierungskonzepten umfaßt.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. zum Kriterium der Universalität (Allgemeinheit, Allgemeingültigkeit, Ausdrucksmächtigkeit u.ä.) NEWELL (1969), S. 371; POPPER (1972a), S. 31; ALBERT, H. (1976a), Sp. 4680; ZAVE (1976), S. 35; PFOHL (1977), S. 274; MAYR, H. (1977), S. 255 u. 257; CZERANOWSKY (1980), S. 54; VIEFHUES (1982), S. 147; VALETTE (1982c), S. 2; ALBERT, H. (1987), S. 96, 105, 147 u. 161; RESCHER (1987a), S. 188 u. 195; RESCHER (1987b), S. 15; HINTZ (1987), S. 83f.; ESTER (1989), S. 12, 41, 60, 72 u. 127f.

Vgl. auch inhaltlich übereinstimmende, aber anders formulierte Kriterien bei HOLT, A. (1976), S. 139; PETERSON, J. (1977), S. 245f.; MELDMAN (1977), S. 32; SCHUMACHER (1978), S. 1 u. 18; VALETTE (1978a), S. 378; AYACHE (1979a), S. 1050; HURA (1982c), S. 433.

2) Dabei spielt die Unterscheidung dieser Arbeit zwischen einer allgemeinen Modellierungsfähigkeit (in diesem Kapitel) und mehreren speziellen Modellierungsfähigkeiten (im nächsten Kapitel) keine Rolle. Ebenso wird die bemerkenswerte Ausdrucksmächtigkeit des Petrinetz-Konzepts unter vielfach variierenden Bezeichnungen - wie z.B. seiner großen "deskriptiven Kraft" - angesprochen. Schließlich werden zumeist nur "globale" Urteile gefällt, ohne sie hinsichtlich ihrer Bezugspunkte oder ihrer Urteilskriterien zu qualifizieren. Vgl. zu solchen Würdigungen der hohen Ausdrucksmächtigkeit von Petrinetzen PETRI, C. (1963), S. 386; PATIL (1971), S. 1; HACK, M. (1972), S. 2 u. 7; MILLER, R.E. (1972), S. 460; HERZOG, O. (1973), S. 3; LAUTENBACH (1974a), S. 187; ULLRICH (1974), S. 150; CAVARROC (1974), S. 95; COURVOISIER (1974c), S. 142; LOCKEMANN (1975), S. 11; HACK, M. (1975a), S. 13; AGERWALA (1975), S. 11; HOLT, A. (1975d), S. 162; SCHUMACHER (1975), S. 409; DADDA (1976a), S. 38; BERTHELOT (1976), S. 202; MOALLA (1976b), S. 117; MURATA, TA. (1976c), S. 36; PETRI, C. (1977a), S. 132; PETERSON, J. (1977), S. 237f.; MELDMAN (1977), S. 32f. u. 36; TRIER (1977), S. 48; SIFAKIS (1977a), S. 75; COURVOISIER (1977a), S. 167; BAUMERS (1977), S. 3; KRIEG, B. (1977), S. 1; SCHIFFERS (1977), S. II; COTRONIS (1977), S. 198 u. 206; THIELER-MEVISSEN (1977), S. 2; KWAN (1977b), S. 44; CRESPI-REGHIZZI (1977), S. 177; PETERSON, J. (1978a), S. 144; AGERWALA (1978a), S. 149; EGGERT (1978), S. 39; QUÄCK (1978), S. 77; MOALLA (1978b), S. 374; JENSEN (1979a), S. 349; OBERUELLE (1979a), S. A.1; AGERWALA (1979), S. 85; GRIESE, W. (1979), S. 1; SIFAKIS (1979b), S. 93; MURATA, TA. (1979a), S. 807; PAKAS-SKEWES (1979), S. 9; HEINEMANN (1980), S. 3; JENSEN (1980b), S. 1; PERL (1980), S. 11.1; PETERSON, J. (1981), S. 1 u. 5; KUPKA (1981), S. 14; EBERT, J. (1981), S. 327; JENSEN (1981a), S. 1; ROUCAIROL (1982a), S. 1; JOHNSON, R.R. (1982), S. 77; SCHESCHONK (1982a), S. 104; HEINEMANN (1982), S. 187; GIRAULT (1982a), S. 0.1; VIDAL-NAQUET (1982b), S. 41; NELSON, R.A. (1982), S. 53; CARSTENSEN (1982), S. 3; HURA (1982c), S. 438; KRÄMER (1983a), S. 231; o.V. (1983c), S. 1.

Abweichende Ansichten vertreten dagegen BERNSTEIN (1973), S. 53f.; CRESPI-REGHIZZI (1974), S. 1.1; WINKOWSKI (1976b), S. 1; HANSEN, N. (1983), S. 132. Sie halten dem Petrinetz-Konzept vor, seine Ausdruckskraft reiche für den speziellen Modellierungsbereich Automatischer Informationsverarbeitungssysteme nicht aus. Dieser Einschätzung vermag sich der Verf. jedoch nicht anzuschließen. Denn die vorgenannten Autoren schöpfen den Ausdrucksreichtum des Petrinetz-Konzepts bei weitem nicht aus. Statt dessen beschränken sie sich - sofern es aus ihren Ausführungen überhaupt entnommen werden kann - auf die relativ ausdrucksarme Klasse der Stelle/Transition-Netze. Diesbezüglich eine geringe Modellierungsfähigkeit festzustellen, überrascht zwar nicht. Vgl. dazu die anschließenden Erläuterungen. Doch es ist unzulässig, die Ausdrucksmächtigkeit des gesamten Petrinetz-Konzepts allein anhand von Stelle/Transition-Netzen beurteilen zu wollen. Allerdings wird eingeräumt, daß die meisten der o.a. Quellen in der siebziger Jahren erschienen sind, in denen Höhere Netze noch kaum Beachtung gefunden haben. Seit Beginn der achtziger Jahre erlangten aber Höhere Netze zumindest in der Gestalt von Prädikat/Transition-Netzen weitere Verbreitung. Spätestens seitdem mutet es fragwürdig an, bei der Beurteilung der Modellierungsfähigkeit von Petrinetzen den beträchtlichen Ausdrucksreichtum Höherer Netze zu ignorieren.

3) Die speziellen Modellierungsfähigkeiten, die im nächsten Kapitel behandelt werden, rechnen inhaltlich noch zu dieser Ausdifferenzierung. Sie werden lediglich aufgrund ihrer Themenspezifität separat behandelt.

4) Darüber hinaus läßt sich noch ein dritter Ansatz vorstellen: Er stuft die allgemeine Modellierungsfähigkeit eines Konzepts um so höher ein, je weniger konkrete Eigenschaften das Modellierungskonzept aufweist, die sich auf die Repräsentation von Aspekten der zu modellierenden Objekte restriktiv auswirken könnten. Dieser Beurteilungsansatz klingt z.B. an bei SCHUMACHER (1978), S. 18. Dieser Beurteilungsansatz knüpft in negativer Weise an *fehlenden* konkreten Konzepteigenschaften an. Der Verf. bevorzugt jedoch *konstruktive* Ansätze. Daher zieht er es vor, diejenigen Aspekte positiv zu benennen, welche die Modellierungsfähigkeit eines Konzepts auszeichnen. Dies leistet vor allem die nachstehende Auflistung von unterschiedlich mächtigen Ausdrucksklassen. Hinzu kommen die Aspekte spezieller Modellierungsfähigkeiten, die im nächsten Kapitel behandelt werden.

5) Die Positionierung verhält sich "absolut" in dem Sinne, daß keine Bezugnahme auf ein anderes Modellierungskonzept erfolgt. Dagegen besitzt sie insofern einen relativen Charakter, als die Positionsangabe stets auf die fixierten Ausdrucksklassen bezogen wird. Die absolute Positionierung läßt auch kein absolutes Vorteilhaftigkeitsurteil zu. Denn mit der Vorgabe einer Ausdrucksklasse ist noch kein Urteil darüber gefällt, ob die Überdeckung dieser Ausdrucksklasse für die absolute Konzeptvorteilhaftigkeit als notwendig oder hinreichend betrachtet wird. Daher dienen

die Ausdrucksklassen lediglich zur Skalierung der Ausdrucksmächtigkeit, nicht aber zur Beurteilung der absoluten Vorteilhaftigkeit.

6) Es wird hier von einer "abstrakten" Simulationsrelation gesprochen, um sie von der früher thematisierten Simulation des Verhaltens "konkreter" Systeme abzugrenzen.

7) Die abstrakte Simulationsrelation kann ebenso auf jeweils zwei verglichene Modellierungskonzepte bezogen werden. Aufgrund der Vereinbarungen, die im voranstehenden Kapitel getroffen wurden, erfolgt hier jedoch kein Vergleich des Petrinetz-Konzepts mit anderen Modellierungskonzepten. Statt dessen werden auf konzeptendogene Weise die relativen Vorteilhaftigkeiten von drei ausgezeichneten Netzklassen beurteilt.

8) Die Festlegung des Äquivalenzkriteriums stellt keineswegs eine triviale Aufgabe dar. Je nachdem, wie es inhaltlich ausgestaltet wird, können zwei verglichene Modellierungskonzepte die abstrakte Simulationsrelation erfüllen oder auch nicht. Für die hier vorgelegten Untersuchungen reicht es aus, das Äquivalenzkriterium auf Erreichbarkeitsgraphen zu beziehen: Zwei Konstrukte, die im Rahmen zweier unterschiedlicher Netzklassen modelliert worden sind, gelten genau dann als äquivalent, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind. Erstens müssen die beiden Konstrukte vollständige Netze darstellen. Zweitens müssen zu den beiden Netzen zwei Erreichbarkeitsgraphen gehören, deren Knoten- und deren Kantenmengen jeweils übereinstimmen. Da die Erreichbarkeitsgraphen die Verhaltenspotentiale der Netze repräsentieren, folgt daraus: Zwei Konstrukte werden genau dann als äquivalent behandelt, wenn sie Netze mit gleichen Verhaltenspotentialen darstellen. Im Rahmen des Petrinetz-Konzepts existieren aber auch andere Äquivalenzauffassungen.

9) Die Umkehrung braucht jedoch nicht zu gelten.

10) Die "Skalierung" endet mit dem Bezugspunkt der TURING-Automaten, weil sie weithin als das ausdrucks mächtigste formalsprachliche Modellierungskonzept anerkannt sind. Vgl. zu dieser Einschätzung z.B. HURA (1982c), S. 433. Der Verf. hat dies an anderer Stelle ausführlicher dargelegt; vgl. ZELEWSKI (1989a), S. 19, 29 und - im Rahmen der Thesen von CHURCH, POST und TURING - S. 30ff.

11) Synthetische Kernnetze erschließen zumindest als deklarative Netzmodelle das gesamte Ausdrucksvermögen der Prädikatenlogik 1. Stufe. Das wurde an früherer Stelle nachgewiesen. Operationale Netzmodelle sind dagegen zunächst weniger ausdrucks mächtig. Sie können aber durch die zusätzlichen Netzkonstrukte von Erweiterten Synthetischen Netzen so weit ausgebaut werden, daß sie ebenso den Formulierungsreichtum der Prädikatenlogik 1. Stufe weitgehend abdecken.

Allerdings ist auf eine Besonderheit aufmerksam zu machen. Sie erstreckt sich sowohl auf deklarative als auch auf operationale Netzmodelle: Jede Variable aus einer prädikatenlogischen Formel, die in einem Netzmodell repräsentiert wird, gilt implizit als allquantifiziert. Daher lassen sich Existenzquantifizierungen in Netzmodellen nicht unmittelbar ausdrücken. Statt dessen wird in der Regel vorausgesetzt, daß zunächst alle Existenzquantoren mit der Hilfe von SKOLEM-Funktionen durch Allquantoren ersetzt worden sind. In wenigen Ausnahmen können Existenzquantoren auch durch faktische Transitionen wiedergegeben werden. Daher werden Existenzquantoren in Netzmodellen zwar berücksichtigt, aber nur auf mittelbare Weise. Darüber hinaus werden offene Formeln, die mindestens eine Variable enthalten, die von keinem Quantor gebunden ist, überhaupt nicht erfaßt. Dies gilt zumindest so lange, wie die implizite Allquantifizierung aller Variablen vorausgesetzt wird. Erst wenn diese Präsupposition entfällt, lassen sich auch prädikatenlogische Formeln mit ungebundenen Variablen in Netzmodellen repräsentieren.

12) Weitere Anwendungen der Simulationsrelation auf andere Konzepte lassen sich ebenso vorstellen. Sie spielen aber für die hier betrachteten Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen keine Rolle. Daher wird nur ein Alternativkonzept aus dem Bereich der Automatischen Informationsverarbeitung kurz erwähnt, um die große allgemeine Modellierungsfähigkeit des Petrinetz-Konzepts zu unterstreichen. Es erstreckt sich auf die Repräsentation der Ablaufstrukturen von (Software-)Programmen durch Programmablaufpläne. Die gleichen Ablaufstrukturen können ebenso als Petrinetze wiedergegeben werden; vgl. PETERSON, J. (1981), S. 57ff.; BAUER, F. (1981), S. 411f.; ZUSE, K. (1982), S. 31 u. 41; BAER, J. (1982), S. 78f.; HACKMANN (1982), S. 21f.; HURA (1982c), S. 437. Dabei haben Petrinetze besondere Beachtung gefunden, um die Semantik nebenläufiger Sprachkonstrukte aus der Echtzeit-Programmiersprache PEARL - und ihrem Ableger BASIC PEARL - zu repräsentieren; vgl. EGGERT (1978), S. 21ff.; DIN 66252 (1978), S. 21ff.; HRUSCHKA (1980a), S. 268ff.; HRUSCHKA (1980c), S. 8; WEGNER, E. (1982a), S. 32ff. Besonders interessant ist, daß Petrinetze zwar alle Programmablaufpläne zu simulieren vermögen, aber die umgekehrte Simulationsrichtung nicht zutrifft. Denn Programmablaufpläne sind nicht in der Lage, die Ablaufstrukturen von rekursiven Programmen darzustellen; vgl. WENDT (1980b), S. 935. Im Rahmen des Petrinetz-Konzepts ist dies dagegen durchaus möglich; vgl. ZERVOS (1977), S. 255ff. (mit Gefärbten Netzen); WENDT (1980b), S. 935ff. (mit Schulprioritäten). Vgl. auch zur allgemeinen Charakterisierung rekursiver Programme, auf deren präzise Definition hier verzichtet wird, ZERVOS (1977), S. 260; WENDT (1980b), S. 936f. Darüber hinaus wird mitunter hervorgehoben, daß die Modellierung von Programmablaufstrukturen durch Petrinetze zu qualitativ besseren Programm-entwürfen führe. In dieser Hinsicht werden z.B. genannt:

- die Unterstützung eines disziplinierten Programmwurfes; vgl. SCHNUPP (1981), S. 61;

- die Erzeugung systematischer und übersichtlicher Repräsentationen von Ablaufstrukturen; vgl. BRETSCHNEIDER (1980a), S. 24.
- die Absicherung von Ablaufstrukturen durch eine wohldefinierte formale Semantik für den Kontrollfluß der Programmausführung; vgl. HRUSCHKA (1980a), S. 271; SCHNUPP (1981), S. 61;
- Verifizierungen der Programmsemantik durch prädikatenlogische Konsistenzprüfungen; vgl. HRUSCHKA (1980a), S. 268f.

Ebenso wird Petrinetze eine mittlere Komplexität bei der Repräsentation von Ablaufstrukturen zugesprochen, die einen "ausgewogenen" Mittelweg zwischen Programmablaufplänen und Schaltdiagrammen ermöglicht; vgl. MURATA,TA. (1979a), S. 807; MURATA,TA. (1980a), S. 525; SUZUKI,I. (1980a), S. 620. Denn die Netzkomplexität reicht einerseits aus, um das tatsächliche Programmverhalten vorherzusagen; vgl. dazu auch EGGERT (1978), S. 38f. Die zu groben Programmablaufpläne eignen sich dazu oftmals nicht, insbesondere wenn es um die Ausführung nebenläufiger Programme geht. Andererseits fallen Schaltdiagramme zumeist so detailliert aus, daß sie sich kaum noch durchschauen lassen. Dies wird durch Petrinetze mit ihrer übersichtlichen Repräsentation von Ablaufstrukturen vermieden. Es wird darauf verzichtet, diese qualitativen Aspekte weiter zu vertiefen. Denn sie gehören schon zur Beurteilung der Modellierungsgüte. In diesem Kapitel interessiert aber nur die allgemeine Modellierungsfähigkeit des Petrinetz-Konzepts. Darüber hinaus wird später aus dem Blickwinkel der Adaptivität aufgezeigt werden, daß es dem Petrinetz-Konzept nicht gerecht wird, ihm eine mittlere - und somit *feste* - Komplexität zuzuschreiben.

Neben Programmablaufplänen lassen sich auch noch weitere Darstellungsformen, die bei der Repräsentation von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen üblich sind, durch äquivalente Petrinetze wiedergeben. Es wird darauf verzichtet, dies hier im Detail auszuführen. Statt dessen wird nur kurz auf ein Beispiel verwiesen: die Übersetzung von SADT-Diagrammen in äquivalente Gefärbte Netze; vgl. PINCI (1990b).

9.2.1.2 Spezielle Modellierungsfähigkeiten

Des öfteren wird an ein Modellierungskonzept die Forderung nach Vollständigkeit¹⁾ herangetragen. Das Vollständigkeitskriterium bleibt aber inhaltlich unbestimmt, solange nicht offengelegt wird, anhand welcher Gesichtspunkte die Vollständigkeit einer Modellierung beurteilt werden soll. Daher wird ein Katalog von speziellen Modellierungsfähigkeiten²⁾ entfaltet. Er bezieht sich auf das Realproblem, das in dieser Arbeit näher betrachtet wurde: die Koordinierung von Produktionsprozessen in komplexen Produktionssystemen. Deshalb werden in den Katalog spezieller Modellierungsfähigkeiten nur solche Aspekte aufgenommen, die für die Modellierung von Prozeßkoordinierungen eine bedeutsame Rolle spielen³⁾. Dabei wird im wesentlichen auf diejenigen Erkenntnisse zurückgegriffen, die anhand der Fallstudie für die Modellierung eines kleinen Flexiblen Fertigungssystems gewonnen wurden. Hinzu kommen die Argumente, die vortragen wurden, um die diversen Erweiterungen des Kernkonzepts Synthetischer Netze zu motivieren⁴⁾. Die Gesamtheit aller speziellen Modellierungsfähigkeiten bildet eine überprüfbare Ausdeutung des Vollständigkeitskriteriums⁵⁾. Zugleich stellen die speziellen Modellierungsfähigkeiten wegen ihres vorausgesetzten Realproblembezugs Validierungskriterien dar⁶⁾. Sie lassen sich benutzen, um die Realitätsadäquanz von Koordinierungsmodellen zu überprüfen. Im einzelnen erstrecken sich die speziellen Fähigkeiten, die hier von einem Modellierungskonzept für die Koordinierung von Produktionsprozessen erwartet werden, auf die Repräsentationen folgender Sachverhalte:

- "einfache", d.h. lineare oder sequentielle Prozesse;
- "komplexe", d.h. nebenläufige⁷⁾ oder nicht-sequentielle Prozesse;
- Entscheidungsalternativen, insbesondere zwischen alternativen Prozeßausführungen;
- Konkurrenz von Prozeßausführungen um knappe Ressourcen;
- kausale Verursachungszusammenhänge⁸⁾, die den Prozeßausführungen zugrundeliegen⁹⁾;
- bewegliche Objekte¹⁰⁾;
- beliebige quantitative oder qualitative Eigenschaften der beweglichen Objekte;
- Auszeichnung beweglicher Objekte als wohlunterschiedene Individuen¹¹⁾;
- zeitbezogene Determinanten¹²⁾;
- stochastische Einflüsse¹³⁾;
- Koordinierungskonzepte für arbeitsteilige Subsysteme¹⁴⁾;
- Ausrichtung der Subsystemkoordinierung an produktionswirtschaftlichen Sachzielen;
- Ausrichtung der Subsystemkoordinierung an produktionswirtschaftlichen Formalzielen.

Hinzu kommt ein weiterer Aspekt, der sich jedoch aufgrund seiner Eigenart jeder Repräsentation innerhalb eines Modells entzieht. Es handelt sich um die Möglichkeit, Koordinierungsmodelle so zu gestalten, daß sie gegenüber modellexogenen Einflüssen offen bleiben. Die Forderung nach Modelloffenheit¹⁵⁾ knüpft an den Sachverhalt an, daß ein modelliertes Produktionssystem stets in ein umfassenderes Umsystem eingebettet ist. Zwischen Produktionssystem und Umsystem kann es zu Wechselwirkungen kommen, die sich auch innerhalb des Produktionssystems auswirken¹⁶⁾. Wenn diese Auswirkungen im Modell des Produktionssystems repräsentiert werden sollen, muß es möglich sein, exogene Einflüsse innerhalb des Modells zu berücksichtigen, ohne die Einflußgrößen selbst zu repräsentieren¹⁷⁾.

Für die Modellierung von Prozessen erweist sich das Petrinetz-Konzept als hervorragend geeignet. Dies gilt sowohl für sequentielle als auch für nebenläufige Prozesse¹⁸). Sequentielle Prozesse werden jedoch auch von zahlreichen anderen Modellierungskonzepten erfaßt¹⁹). Daher findet zumeist nur die ausgezeichnete Modellierung von nebenläufigen Prozessen besondere Beachtung²⁰). Die Repräsentationen beider Prozeßarten beruht auf dem präzise definierten Konzept der Schaltprozesse. Es wurde bereits für Stelle/Transition-Netze eingeführt²¹). In Synthetischen Kernnetzen und Erweiterten Synthetischen Netzen wird das Konzept der Schaltprozesse unverändert übernommen. Auf einer Nominalskala erfüllen daher alle drei Netzklassen die beiden Anforderungen, sequentielle und nebenläufige Prozesse repräsentieren zu können²²).

Allerdings ergibt sich eine relative Differenzierung der Modellierungsfähigkeit durch die Komplexität der jeweils darstellbaren Schaltprozesse²³). Die wesentliche Determinante dieser Komplexion ist der Ausdrucksreichtum der Schaltregel. Die Schaltregel von Stelle/Transition-Netzen bleibt auf die vergleichsweise geringen Ausdrucksmöglichkeiten beschränkt, die ihre arithmetische Grundlage vom PRESBURGER-Typ bietet. Synthetische Kernnetze erschließen dagegen das gesamte Ausdrucksvermögen einer sortierten Prädikatenlogik. Dies äußert sich vor allem²⁴) in einer komplexen Schaltregel. Sie wird durch ein gehaltvolles Übergangsschema und eine Vielfalt möglicher Schaltfarben gekennzeichnet. Die Schaltregel von Erweiterten Synthetischen Netzen fällt noch mächtiger aus, weil sie z.B. gestattet, daß Aktionsausführungen von negativ formulierten Bedingungen oder von Prioritäten abhängen. Vor diesem Hintergrund läßt sich die Modellierungsfähigkeit bezüglich sequentieller und nebenläufiger Prozesse auch auf einer Ordinalskala einstufen: Die Komplexität der Prozesse, die sich repräsentieren lassen, nimmt von Stelle/Transition-Netzen über Synthetische Kernnetze bis hin zu Erweiterten Synthetischen Netzen zu²⁵).

Bei der Repräsentation von Entscheidungsalternativen liegen ähnliche Verhältnisse vor. Alle drei Netzklassen erlauben, alternative Entscheidungsoptionen explizit zu modellieren²⁶). Dabei werden die Optionen, die innerhalb eines gleichen Entscheidungsspielraums offenstehen, durch Schaltkonflikte²⁷) erfaßt, die zwischen konfliktionär aktivierten Schaltschritten bestehen²⁸). Dies schließt auch Entscheidungen zwischen alternativen Prozeßausführungen ein²⁹). Darüber hinaus läßt die Modellierung von Entscheidungsalternativen ebenso zu, die Auswirkungen alternativer Entscheidungen zu erfassen. Die Entscheidungskonsequenzen werden im Erreichbarkeitsgraphen eines Netzmodells als Schaltwege dargestellt³⁰). Die drei Netzklassen unterscheiden sich weder hinsichtlich konfliktionär aktivierter Transitionen noch bezüglich ihrer Auswertung durch Erreichbarkeitsanalysen. Daher zeichnen sie sich gemeinsam durch eine beachtliche Fähigkeit zur Modellierung von Entscheidungsalternativen aus³¹).

Allerdings besitzen Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze ein besonderes Modellierungsvermögen, das von Stelle/Transition-Netzen grundsätzlich nicht erreicht werden kann. Es handelt sich um die Möglichkeit, Entscheidungsalternativen mit der Hilfe von Abundanzkonflikten zu repräsentieren³²). Dabei wird dieselbe Transition mit verschiedenen Schaltfarben aktiviert. Jede dieser Schaltfarben wird durch eine Menge von Markenkopien konstituiert, die in ihrer Gesamtheit die Aktivierung der Transition hervorrufen. Verschiedene Schaltfarben lassen sich daher nur definieren, wenn einzelne Markenkopien voneinander unterschieden werden können. Dies ist für die unterschiedslosen Kopien der Basismarke in Stelle/Transition-Netzen ausgeschlossen. Synthetische Netze gestatten dagegen mit Hilfe ihrer strukturierten Marken, eine besondere Kategorie von Entscheidungsalternativen zu modellieren³³): Sie erstrecken sich auf die Möglichkeit, die gleiche Aktivität auf unterschiedliche Mengen von Objekten anzuwenden³⁴). Es muß dann entschieden werden, mit welcher von diesen Objektmengen die Aktivität tatsächlich ausgeführt werden soll³⁵).

Für die Modellierung von knappen Ressourcen, um die mehrere Prozeßausführungen konkurrieren, eignen sich die drei Netzklassen auf den ersten Blick in gleicher Weise. Denn durch Markenkopien und freie Markenkapazitäten lassen sich Ressourcen repräsentieren, die beim Schalten von Transitionen in Anspruch genommen, verbraucht oder auch wieder freigegeben

werden. Aus den Schaltakten der Transitionen sind wiederum die Schaltprozesse aufgebaut, die der Prozeßrepräsentation dienen. Folglich kann die Konkurrenz von Prozessen um gemeinsam benötigte, aber knappe Ressourcen mit der Hilfe von Markenkopien und freien Markenskapazitäten dargestellt werden. Markenkopien und Markenskapazitäten sind in allen drei Netzklassen definiert.

Allerdings unterliegen Stelle/Transition-Netze zwei wesentlichen Einschränkungen. Erstens erlauben die unterschiedslosen Kopien ihrer einen Basismarke nicht, verschiedene Ressourcenarten als solche zu unterscheiden. Dies kann allenfalls auf indirekte Weise dadurch geschehen, daß die Ressourcenarten mittels derjenigen Stellen differenziert werden, von denen die identischen Basismarkenkopien abgezogen oder auf denen sie auch wieder abgelegt werden können. Zweitens lassen sich kontinuierliche Ressourcennutzungen überhaupt nicht erfassen. Ihre Modellierung wird durch den diskreten Charakter der Markenkopien grundsätzlich ausgeschlossen³⁶). Denn auf einer Stelle kann die Anzahl der dort befindlicher Markenkopien durch die Schaltakte inzidenter Transitionen immer nur in ganzzahligen Quantitäten verändert werden. Folglich kann die Ressourcennutzung ausschließlich auf einer groben diskreten - einer ganzzahligen - Skala gemessen werden.

Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze erweisen sich in beiden Hinsichten leistungsfähiger. Einerseits gestatten sie, verschiedene Ressourcenarten durch entsprechende Markenarten zu unterscheiden. Andererseits können kontinuierliche Ressourcennutzungen mit der Hilfe von Markenattributen modelliert werden³⁷). In diesem Fall werden die ge- oder verbrauchten Ressourcenquantitäten nicht durch Markenkopien oder freie Markenskapazitäten, sondern durch die Attributausprägungen einer Markenkopie repräsentiert³⁸). Allerdings geht dadurch die anschauliche Visualisierung der Ressourcennutzung in der Gestalt eines Markenflusses verloren. An seine Stelle treten die Ausprägungsveränderungen eines Markenattributs, das sich als solches in Petrinetzen nicht mehr visualisieren läßt. Daher besitzen Synthetische Netze zwar die Fähigkeit, sowohl diskrete als auch kontinuierliche Formen der Ressourcennutzung zu repräsentieren. Doch leisten sie dies nur für diskrete Ressourcen auf natürliche, visuell anschauliche Weise³⁹).

Darüber hinaus bleibt die Modellierung kontinuierlicher Ressourcennutzungen einem irreduzibel diskreten Resteinfluß unterworfen⁴⁰). Denn die Kontinuität der Ressourcennutzung erstreckt sich nur auf eine Skala, auf der sich die Inanspruchnahme einer Ressource messen läßt. Dagegen behalten die Akte der Ressourcennutzung weiterhin einen diskreten Charakter. Dies liegt daran, daß jede Inanspruchnahme einer Ressource in einem Netzmodell durch den Schaltakt einer Transition bewirkt wird. Die Schaltakte von Transitionen folgen aber grundsätzlich immer in diskreten Zeitabständen nacheinander⁴¹). Kontinuierliche Schaltprozesse, in denen das Schalten von Transitionen zu einem abstandsfreien, zusammenhängenden Schaltfluß verschmilzt, lassen sich daher weder mit Synthetischen Kernnetzen noch mit Erweiterten Synthetischen Netzen realisieren. Daher können auch keine kontinuierlichen ressourcennutzenden Prozesse modelliert werden⁴²). Die Unmöglichkeit kontinuierlicher Schaltprozesse gilt nicht nur für die hier beurteilten Varianten Synthetischer Netze, sondern für nahezu⁴³) alle Netzklassen. Folglich besitzt das Petrinetz-Konzept in dynamischer Hinsicht einen diskreten Restcharakter, der sich grundsätzlich nicht vermeiden läßt⁴⁴).

Die Modellierung von kausalen Verursachungszusammenhängen, die den realen Produktionsprozessen zugrundeliegen, stellt eine besondere Stärke des Petrinetz-Konzepts dar⁴⁵). Dies gilt zumindest dann, wenn die Netzkanten - wie es in dieser Arbeit geschah - auf kausale Weise interpretiert werden. Aus dieser Sicht spiegelt die dynamische Struktur eines Netzmodells unmittelbar die kausalen Verursachungszusammenhänge wieder, denen ein modelliertes Produktionssystem unterworfen ist. Die hervorragende kausale Modellierungsfähigkeit unterliegt allerdings einer wesentlichen⁴⁶) Ausnahme. Denn die Repräsentation von Kausalzusammenhängen erstreckt sich nur auf kausale *Folgebeziehungen*⁴⁷). Kausale *Wechselwirkungsbeziehungen* lassen sich dagegen zunächst überhaupt nicht repräsentieren. Dies liegt im Simultaneitätsdefekt von

Petrinetzen begründet. Zwar kann in Erweiterten Synthetischen Netzen mit der Hilfe von Fakten eine Konstruktion angeboten werden, mit der sich simultane Schaltakte von Transitionen erzwingen lassen. Hierdurch wird aber nur der Simultaneitätsdefekt geheilt. Eine Modellierung kausaler Wechselwirkungen erfolgt auf diese Weise jedoch nicht. Denn das simultane Schalten zweier Transitionen wird dabei nur auf indirekte Weise durch das Verbot erzwungen, daß niemals eine Markierung erreicht werden darf, unter der mindestens eine faktische Transition aktiviert ist. Eine direkte kausale Wechselwirkung zwischen den beiden simultan geschalteten Transitionen findet dabei aber keinen Ausdruck.

Zur Repräsentation beweglicher Objekte sind alle drei Netzklassen in gleicher Weise befähigt. Hierzu dienen die Markenkopien, die durch ein Netzmodell fließen. Diese offensichtliche Modellierungsfähigkeit bedarf keiner weiteren Erläuterung. Anders liegen die Verhältnisse bei der Erfassung beliebiger quantitativer oder qualitativer Objekteigenschaften. Sie lassen sich für bewegliche Objekte in Stelle/Transition-Netzen nicht ausdrücken. Dies scheitert an der Strukturlosigkeit ihrer Basismarke. Aus dem gleichen Grund können auch keine der beweglichen Objekte als wohlunterschiedene Individuen ausgezeichnet werden. Demgegenüber bereitet es in Synthetischen Kernnetzen oder Erweiterten Synthetischen Netzen keine Schwierigkeiten, bewegliche Objekte mit beliebigen quantitativen oder qualitativen Eigenschaften auszustatten⁴⁸). Zu diesem Zweck kann auf das gesamte Ausdrucksspektrum der Markenattribute zurückgegriffen werden. Insbesondere erlauben sie auch, einzelnen Markenkopien durch identifizierende Eigennamen oder Identnummern eine Objektindividualität zuzuordnen.

Allerdings leiden alle Petrinetze unter einer gemeinsamen konzeptionellen Schwäche: Sie sind nicht in der Lage, solche Objekteigenschaften zu modellieren, deren Ausprägungen durch reinen Zeitablauf verändert werden. Dies gilt zumindest in dem Umfang, wie tatsächlich nur Zeit verstreicht - aber kein modelliertes Ereignis geschieht. In diesen ereignisfreien Zeitintervallen verharrt jedes Netzmodell in seiner unveränderten Netzmarkierung. Da durch die Netzmarkierung die aktuellen Attributausprägungen aller Markenkopien determiniert sind, ist es unmöglich, die rein zeitablaufbedingten Ausprägungsveränderungen zu erfassen. Dies kann erst dann *nachgeholt* werden, wenn wieder ein Ereignis geschieht. In diesem Moment ist es mitunter möglich, die zwischenzeitlich erfolgten - aber nicht modellierten - Veränderungen von Objekteigenschaften im Netzmodell nachträglich zu erfassen. Diese Repräsentationslücke und die Möglichkeit ihrer verzögerten Schließung wurden im Rahmen der Fallstudie anhand eines Beispiels ausführlicher aufgezeigt. Es handelte sich um die Eigenschaft von Werkstücken, daß ihre Kapitalbindung durch reinen Zeitablauf kontinuierlich anzuwachsen vermag. Gleiches gilt für die Ermittlung der Warte- und Durchlaufzeiten einzelner Werkstücke oder vollständiger Produktionsaufträge⁴⁹).

Die Schwierigkeiten des Petrinetz-Konzepts bei der Modellierung von zeitbezogenen Determinanten reichen noch wesentlich tiefer. So lassen sich temporale Einflußgrößen in Stelle/Transition-Netzen überhaupt nicht erfassen. Auch in Synthetischen Kernnetzen ist ihre Berücksichtigung noch nicht vorgesehen. Diese Atemporalität von Netzen stellt keineswegs einen geringfügigen Mangel dar, der sich durch eine konzeptionelle Nachbesserung rasch heilen ließe⁵⁰). Vielmehr folgt er aus der strengen kausalen Grundausrichtung des Petrinetz-Konzepts. Erst die speziellen Konstruktionen, die für Erweiterte Synthetische Netze eingeführt wurden, erlauben eine kohärente Bereicherung des kausalen Konzeptfundaments um die Modellierung von Zeitgrößen. Allerdings warten die Erweiterten Synthetischen Netze dann als Zeitnetze mit einer umfassenden Fähigkeit auf, alle produktionswirtschaftlich interessanten Zeitaspekte zu repräsentieren. Dazu gehören sowohl alle Anordnungsbeziehungen als auch alle Fristarten, die sich im Rahmen der Netzplantechnik ausdrücken lassen. Darüber hinaus können weitere, spezielle Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Das betrifft z.B. die Möglichkeit, die Permissivität der Schaltregel auszunutzen, um verzögerte Prozeßausführungen zu modellieren. Eine Einschränkung besteht lediglich hinsichtlich derjenigen Objekteigenschaften, deren Ausprägungen sich

durch reinen Zeitablauf verändern. Auf ihre Modellierungsprobleme wurde bereits kurz zuvor hingewiesen.

Zu einem noch zurückhaltenderen Urteil veranlaßt die Repräsentation stochastischer Einflußgrößen. Auch sie können in Stelle/Transition-Netzen grundsätzlich nicht berücksichtigt werden. Für Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze ist nur der Sonderfall einer stochastischen Simulation vorgesehen. Hierbei erfolgt aber keine unmittelbare Modellierung von stochastischen Determinanten. Statt dessen wird nur ein deterministisches Ersatzmodell mehrfach simulativ ausgewertet, um aus den dabei gewonnenen relativen Häufigkeitsverteilungen auf Erwartungswerte für stochastische Größen zurückzuschließen. Daher leiden auch beide Varianten Synthetischer Netze unter einer bemerkenswert niedrigen Fähigkeit zur Modellierung stochastischer Einflüsse. Allerdings gilt dies nur für die hier vorgestellten Netzklassen, nicht aber für das Petrinetz-Konzept an sich. Es wurde schon früher verdeutlicht, daß eine breite Anhängerschaft von Stochastischen Netzen existiert. Sie gestatten durchaus die Modellierung stochastischer Aspekte⁵¹). Daher verwundert es nicht, daß mitunter als ein Vorzug des Petrinetz-Konzepts hervorgehoben wird, stochastische Sachverhalte repräsentieren zu können⁵²). Der Verf. hat aber bei dieser Gelegenheit begründet, warum er der stochastischen Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen sehr reserviert gegenübersteht⁵³). Daher handelt es sich bei den ausgeprägten stochastischen "Schwächen" der hier entwickelten Synthetischen Netze um die Folge einer bewußt vorgenommenen Konzeptualisierung von Koordinierungsmodellen⁵⁴).

Die Modellierung von Konzepten, die der Koordinierung arbeitsteiliger Subsysteme dienen⁵⁵), stellt eine besondere Stärke des Petrinetz-Konzepts dar⁵⁶). Dabei werden die Subsysteme durch Teilnetze modelliert. Das arbeitsteilige Zusammenwirken der subsystemspezifischen Teilnetze wird durch Markenkopien koordiniert, die zwischen den Teilnetzen über gemeinsam geteilte Stellen ausgetauscht werden. Die Stellen, die dem koordinierenden Markenaustausch dienen, werden als Schnitt- oder Synchronisationsstellen ausgezeichnet. Diese allgemeine Koordinierungsweise wurde schon im Rahmen der Fallstudie mehrfach ausführlich behandelt. Hier interessieren nur noch zwei besondere Gesichtspunkte.

Der erste Aspekt erstreckt sich auf die unterschiedliche Leistungsfähigkeit, die den Netzklassen bei der Repräsentation von Koordinierungskonzepten zukommt. Diese Leistungsfähigkeit hängt sowohl von der allgemeinen Ausdrucksmächtigkeit der Netzklassen als auch von der Berücksichtigung temporaler Einflußgrößen ab. Da Stelle/Transition-Netze nur ein geringes Ausdrucksvermögen besitzen und auch keine Zeitgrößen erfassen, können sie nur vergleichsweise einfache Koordinierungskonzepte modellieren⁵⁷). Wesentlich anspruchsvollere Koordinierungskonzepte werden schon von Synthetischen Kernnetzen zugelassen. Dazu tragen vor allem die Attributmarken mit dem beachtlichen Ausdrucksreichtum ihrer Attributausprägungen bei⁵⁸). Allerdings lassen sich produktionswirtschaftlich vertraute Koordinierungskonzepte oftmals erst mit der Hilfe von Erweiterten Synthetischen Netzen modellieren. Dies kann anhand zweier Beispiele verdeutlicht werden. Einerseits setzt das Koordinierungskonzept der Prioritätsregeln die Ausdruckskraft von TURING-Automaten voraus. Denn erst die TURING-Mächtigkeit garantiert die generelle Modellierungsfähigkeit von Schaltprioritäten. Solche Schaltprioritäten sind aber im allgemeinen erforderlich, um produktionswirtschaftlich übliche Prioritätsregeln zu modellieren. Andererseits können alle Koordinierungskonzepte, die auf Zeitgrößen Bezug nehmen, erst im Rahmen von Zeitnetzen modelliert werden. Solche zeitbezogenen Koordinierungskonzepte spielen bei produktionswirtschaftlich ausgerichteten Subsystemkoordinierungen oftmals eine bedeutsame Rolle⁵⁹). Die hierzu erforderlichen Zeitnetze werden aber erst durch den Übergang zu Erweiterten Synthetischen Netzen erschlossen. Daher besitzen erst Erweiterte Synthetische Netze das Leistungsvermögen, um die voranstehend skizzierten, produktionswirtschaftlich interessanten Koordinierungskonzepte zu modellieren.

Der zweite Aspekt betrifft den grundsätzlich lokalen Charakter, auf den die Koordinierung der subsystemrepräsentierenden Teilnetze zunächst beschränkt bleibt⁶⁰). Denn durch den Austausch von Markenkopien an den Schnittstellen zwischen je zwei koordinierten Teilnetzen können nur die Schaltakte jener Transitionen beeinflusst werden, die zur Nachbarschaft der jeweils betroffenen Schnittstellen gehören. Diese Lokalität der Subsystemkoordinierung entspricht zwar vollkommen der Ausrichtung des Petrinetz-Konzepts an lokal definierten Verursachungszusammenhängen. Zugleich erschwert sie aber auch, global definierte Zielvorstellungen zu berücksichtigen. Produktionswirtschaftliche Sach- und Formalziele besitzen einen solchen globalen Charakter. Daher bedarf es einer zusätzlichen Beurteilung der Fähigkeit, in die Modellierung der Subsystemkoordinierung auch das Verfolgen globaler Ziele aufzunehmen.

Die Repräsentation produktionswirtschaftlicher Sachziele wird von Vertretern des Petrinetz-Konzepts im allgemeinen überhaupt nicht thematisiert. Daher erstaunt es nicht, daß Sachziele weder in Stelle/Transition-Netzen noch in den etablierten Höheren Netzen berücksichtigt werden. Auch in den Synthetischen Kernnetzen finden sie noch keine Beachtung. Jedoch reicht eine geringfügige Ergänzung aus, um Sachziele in die formale Definition von Erweiterten Synthetischen Netzen aufzunehmen. Es braucht lediglich der Ausgangsmarkierung eine nicht-leere Menge von analog definierten, erwünschten Endmarkierungen gegenübergestellt zu werden. Danach läßt sich die Erfüllung von Sachzielen in Netzmodellen ohne größere Anstrengungen untersuchen. Dies wurde anhand der Finalität von Netzmodellen dargelegt.

Produktionswirtschaftliche Formalziele lassen sich grundsätzlich mit allen drei der hier beurteilten Netzklassen modellieren. Dabei werden die Formalzielwirkungen als Schaltwerte von Transitionen erfaßt. In den Erreichbarkeitsgraphen der Netzmodelle werden diese Schaltwerte als zusätzliche Anschriften der Schaltkanten dargestellt. Durch entsprechende Auswertungen der "bewerteten" Erreichbarkeitsgraphen ist es möglich, aus allen zulässigen Schaltprozessen solche Schaltprozesse auszuwählen⁶¹), welche die vorgegebenen Formalziele in der gewünschten Weise erfüllen⁶²). Dabei spielt es keine Rolle, ob die Formalziele den Charakter von Satisfizierungs-, Meliorisierungs- oder Extremierungszielen annehmen. Alle drei Formalzielkategorien lassen sich mit der Hilfe von bewerteten Erreichbarkeitsgraphen berücksichtigen. Für den besonders anspruchsvollen Fall der Extremierungsziele wurde dies hinsichtlich der Bestimmung optimaler Schaltprozesse ausführlicher dargelegt.

Die Erreichbarkeitsgraphen sind unabhängig von der jeweils zugrundeliegenden Netzklasse definiert. Daher spielt es für die Formalzielrepräsentation prima facie keine Rolle, welche Netzklasse für die Modellierung eines Produktionssystems herangezogen wird. Dieser erste Anschein trügt jedoch. Denn Formalzielwirkungen lassen sich in Netzmodellen nur in dem Ausmaß berücksichtigen, wie sich die zugrundeliegenden Sachverhalte in Schaltakten von Transitionen manifestieren. Ohne den Transmissionsmechanismus dieser Schaltakte ist es unmöglich, die Formalzielwirkungen mit der Hilfe von Schaltwerten zu erfassen. Daher ist es in Stelle/Transition-Netzen unmöglich, Formalzielwirkungen darzustellen, falls sie von den Eigenschaften modellierter beweglicher Objekte hervorgerufen werden. Denn diese Objekte lassen sich nur durch die identischen Kopien der einen strukturlosen Basismarke repräsentieren. Deshalb besteht keine Chance, die Eigenschaften der Objekte im Netzmodell wiederzugeben. Folglich können die Schaltakte der Transitionen auch nicht an Eigenschaften der Objekte gekoppelt werden. Statt dessen läßt sich in Stelle/Transition-Netzen nur auf das bloße Vorhandensein der modellierten Objekte Bezug nehmen. Wegen dieser Unmöglichkeit, Formalzielwirkungen in Abhängigkeit von Eigenschaften beweglicher Objekte zu berücksichtigen, besitzen Stelle/Transition-Netze nur eine mittelmäßige Fähigkeit zur Repräsentation von Formalzielen. Diese Einschränkung wird von Synthetischen Kernnetzen weitgehend aufgehoben. Denn vermittels ihrer erweiterten Schaltregel können die Schaltakte von Transitionen auch von den Attributausprägungen derjenigen Markenkopien beeinflusst werden, die in einem Netzmodell bewegliche Objekte wiedergeben. Lediglich die Klasse aller zeitbezogenen Ziele kann auf diese Weise noch keine Würdigung finden. Dies folgt aus dem temporalen Repräsentationsdefizit der Synthetischen Kernnetze, auf das

schon oben eingegangen wurde. Gerade solche Zeitziele spielen jedoch bei produktionswirtschaftlichen Prozeßmodellierungen oftmals eine wesentliche Rolle. Daher wiegt die Unfähigkeit, zeitbezogene Formalzielwirkungen in Synthetischen Kernnetzen zu erfassen, schwer. Dieser Defekt wird aber durch den ausgeprägten Zeitbezug der Erweiterten Synthetischen Netze geheilt. Erst sie erlauben es, alle produktionswirtschaftlich interessanten Formalziele in Netzmodellen zu berücksichtigen⁶³).

Schließlich verbleibt noch der Aspekt der Modelloffenheit. Das Petrinetz-Konzept weist mehrere bemerkenswerte Ansatzpunkte auf, um offene Koordinierungsmodelle zu gestalten⁶⁴. Sie knüpfen vornehmlich an der charakteristischen Permissivität der Schaltregel von Petrinetzen an⁶⁵. Denn eine aktivierte, aber noch nicht geschaltete Transition verhält sich offen gegenüber der Information, ob sie tatsächlich geschaltet werden soll oder nicht. Dies gilt insbesondere auch für konfliktionär aktivierte Transitionen, solange die Art der Konfliktauflösung nicht im Netzmodell selbst geregelt ist⁶⁶.

Beispielsweise ist es möglich, alternative Fortsetzungen eines Produktionsprozesses im zugehörigen Modell des Produktionssystems als einen Konflikt zwischen aktivierten Transitionen zu repräsentieren. Außerhalb des Produktionssystems kann dann die Koordinierungsentscheidung zugunsten einer Fortsetzungsalternative getroffen werden. Eine entsprechende Information, welche der konfliktionär aktivierten Transitionen zu schalten ist, wird an das Netzmodell des Produktionssystems zurückgegeben. Die Konsequenzen dieser Koordinierungsentscheidung werden alsdann im Produktionsmodell durch das Schalten der ausgewählten Transition ermittelt. Auf diese Weise lassen sich auch interaktive Koordinierungsverfahren gestalten. Darauf wird an späterer Stelle zurückgekommen. Ebenso können Markenkopien durch Schaltakte von aktivierten Transitionen sowohl erzeugt als auch vernichtet werden⁶⁷. Aufgrund der Permissivität der Schaltregel lassen sich diese generativen bzw. destruktiven Akte durch modell-exogene Eingriffe steuern. Auf diese Weise kann z.B. der Austausch von Objekten zwischen einem modellierten Produktionssystem und seinem materiellen Umsystem repräsentiert werden. Dabei werden die betroffenen Objekte durch Kopien von Marken dargestellt. Wenn ein Objekt-austausch real stattfindet, wird auf das Modell des Produktionssystems derart eingewirkt, daß eine bereits aktivierte Transition tatsächlich schaltet. In diesem Moment werden die objekt-darstellenden Markenkopien entsprechend den Modellierungsvorgaben erzeugt oder vernichtet⁶⁸.

Die beiden voranstehend skizzierten Optionen, mit der Hilfe von Aktivierungskonflikten und Schaltregelpermissivität offene Produktionsmodelle zu gestalten, kommen allen drei betrachteten Netzklassen zu. Darüber hinaus bieten Erweiterte Synthetische Netze die Möglichkeit an, ein Produktionsmodell mit dem repräsentierten Realitätsausschnitt auf direkte und explizite Weise zu koppeln. Zu diesem Zweck dienen die Realtransitionen. Sie gestatten es, im Produktionsmodell das Absenden von Steuerungsanweisungen an das modellierte Produktionssystem zu berücksichtigen. Gleiches gilt für das Eintreffen von Systemmeldungen, die aus dem Produktionssystem empfangen werden. Sie informieren über koordinierungsrelevante Ereignisse, die dort geschehen sind⁶⁹.

Realtransitionen, die das Empfangen von Systemmeldungen wiedergeben, lassen sich ebenso nutzen, um ein Produktionsmodell mit einem real existierenden Informationsverarbeitungssystem zu koppeln. Dabei kann es sich einerseits um Teile des Informationssystems einer Unternehmung handeln, in dem Menschen über die Koordination von Produktionsprozessen entscheiden. Andererseits kommt ebenso die direkte Kopplung mit einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem in Betracht. Im ersten Fall werden wiederum die bereits angesprochenen, interaktiven Entscheidungsverfahren unterstützt. Der zweite Fall eröffnet dagegen die Möglichkeit, die Offenheit von Netzmodellen zu nutzen, um sie mit den Verarbeitungsleistungen der Automatischen Informationsverarbeitung zu kombinieren⁷⁰. Auf diesen Gesichtspunkt wird noch näher eingegangen, wenn die Integrationsqualität des Petrinetz-Konzepts beleuchtet wird.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. zum Verlangen nach Vollständigkeit oder Umfassendheit LITTLE, J. (1970), S. B-470; RAUBOLD (1972), S. 211; KRYCHA (1972), S. 14f.; MELDMAN (1977), S. 32; BUSCH, R. (1977), S. 9; JORDAN (1978), S. 12; BOUSSIN (1978), S. 1528 (indirekt durch die Mängelrüge an unvollständigen Modellierungen); RESCHER (1979), S. 10 u. 79; CZERANOWSKY (1980), S. 54; BILLINGTON (1981a), S. 18f.; YOELI (1982b), S. 2; SCHRÖDER, H. (1983), S. 78; HERZOG, O. (1983); RESCHER (1987a), S. 44 u. 51; SCHANZ (1988b), S. 31; DITTRICH, G. (1989b), S. 1; JÄHNICHEN (1990), S. 5.

2) Eine abstrakte Andeutung des Kriteriums spezieller Modellierungsfähigkeiten findet sich bei MAYR, H. (1977), S. 255 u. 257. Dort fordern MAYR und LOCKEMANN vom systemtheoretischen Standpunkt aus, ein Modellierungskonzept müsse in der Lage sein, für die jeweils relevante Systemklasse jede erwünschte Systemstruktur und jedes erwünschte Systemverhalten zu modellieren. Die relevante Systemklasse wird hier durch jene komplexen Produktionssysteme festgelegt, deren Produktionsprozesse koordiniert werden sollen. Die globalen Bezugnahmen auf Systemstrukturen und -verhaltensweisen werden jedoch durch die nachfolgend aufgelisteten Modellierungsaspekte konkretisiert.

Aufgrund seiner inhaltlichen Unbestimmtheit könnte das Vollständigkeitskriterium auch mit der allgemeinen Modellierungsfähigkeit eines Konzepts identifiziert werden. Dann wäre es müßig, auf die Vollständigkeit weiter einzugehen. Denn die allgemeine Modellierungsfähigkeit wurde schon ein Kapitel zuvor als Universalität von Modellierungskonzepten behandelt. Beispielsweise erstrecken sich die Ausführungen von MELDMAN (1977), S. 32f. u. 36, auf die Umfassendheit des Petrinetz-Konzepts. Wenn sie im Sinne seiner umfassenden Ausdrucksmächtigkeit ausgelegt werden, gehören sie inhaltlich zur Beurteilung der allgemeinen Modellierungsfähigkeit des Petrinetz-Konzepts. Es ist aber ebenso möglich, die Umfassendheit eines Modellierungskonzepts als das Überdecken eines Katalogs spezieller Modellierungsfähigkeiten auffassen. Diese Perspektive öffnet den Zugang zu einer differenzierteren Beurteilung der Modellierungsvollständigkeit. Sie wird in dieser Arbeit bevorzugt. Ihre Konsequenzen werden im folgenden ausgeleuchtet. Aufgrund dieser zweiten Interpretationsmöglichkeit der Umfassendheit wird der Beitrag von MELDMAN auch an anderer Stelle angeführt, um die inhaltlich ausdifferenzierte Modellierungsvollständigkeit des Petrinetz-Konzepts zu belegen.

3) Über Umfang und Zusammensetzung der Aspektesammlung läßt sich trefflich streiten. Aber jeder Disput würde Kriterien für die Rechtfertigung der Aspektauswahl voraussetzen, die sich ihrerseits wiederum in Zweifel ziehen ließen. Daher wären Metakriterien erforderlich, um die Auswahl der Auswahlkriterien zu begründen usw. Es zeigt sich wieder die Problematik des MÜNCHHAUSEN-Trilemmas, die schon in einer früheren Anmerkung für den vorgelegten Katalog von Beurteilungskriterien angedeutet wurde. Die dort vorgetragenen Argumente gelten hier analog. Daher erfüllt auch die hier präsentierte Aspektesammlung eine Demarkationsfunktion.

Beispielsweise läßt sich an die Ausführungen von HINTZ (1987), S. 90ff., 94, 98ff. u. 110ff., anknüpfen. Er legt für Flexible Fertigungssysteme dar, daß unscharf formulierte Sachverhalte für die Prozeßkoordinierung eine erhebliche Rolle spielen können. Ähnlich äußert sich PAGNONI (1990), S. 29 u. 185f., hinsichtlich "operationaler" Entscheidungen, die oftmals beim Ausführen von Plänen erforderlich werden. Daraus kann gefolgert werden, daß die Repräsentation unscharfer Sachverhalte zu den wichtigen Aspekten produktionswirtschaftlicher Modellierungen gehöre. Der Verf. erachtet dagegen bewußte Modellunschärfen - zumindest derzeit - als einen "exotischen" Sonderfall. Sie finden bei Modellierungen von Prozeßkoordinierungen so selten Berücksichtigung, daß sie der Verf. nicht zu den "wesentlichen" Modellierungsaspekten rechnen möchte. Zugleich verzichtet er darauf, die Häufigkeit, mit der ein Gesichtspunkt in der produktionswirtschaftlichen Literatur behandelt wird, als ein Metakriterium für die Bestimmung der "Wesentlichkeit" eines Modellierungsaspekts auszugeben. Für diese Einstellung sprechen zwei Gründe. Erstens erfordert das Häufigkeitskriterium eine entsprechende statistische Auswertung der einschlägigen Literatur. Dies übersteigt den Erkenntnisrahmen der hier vorgelegten Ausarbeitung. Zweitens würde zumindest der Aspekt der kausalen Prozeßfundierung ausgegrenzt werden. Er wird bei produktionswirtschaftlichen Modellierungen zur Zeit nur selten explizit gewürdigt. Dennoch erachtet ihn der Verf. für wesentlich. Seine Präferenz für kausal fundierte Modellierungen hat er schon an früherer Stelle dargelegt. Daher wird dieser Gesichtspunkt auch in die anschließende Aspektesammlung aufgenommen. Aus dem Vorhergesagten folgt, daß sich das Außerachtlassen unscharfer Modellierungen und das Berücksichtigen kausaler Prozeßfundamente nicht zugleich mit dem Metakriterium der Häufigkeit ihrer Beachtung in der produktionswirtschaftlichen Literatur rechtfertigen lassen. Die Suche nach einem anderen Metakriterium unterbleibt. Statt dessen wird auf die bereits genannte Demarkationsfunktion des Aspekteskatalogs verwiesen.

Es könnte der Einwand erhoben werden, der Katalog sei so "zurechtgebogen", daß das Petrinetz-Konzept besonders günstig abschneide. Dies zeige sich u.a. im Ausklammern der zuvor erwähnten unscharfen Sachverhalte. Denn alle Konstrukte des Petrinetz-Konzepts seien so präzise festgelegt, daß sie eine Repräsentation von Unschärfe nicht zuließen. Diese Vorhaltung trifft jedoch nicht zu. Einerseits wird sich im folgenden zeigen, daß einige Aspekte aus dem Katalog spezieller Modellierungsfähigkeiten vom Petrinetz-Konzept keineswegs zu voller Zufriedenheit abgedeckt werden. Dazu gehört vor allem die Repräsentation von zeitbezogenen Problemeterminanten. Andererseits existieren durchaus auch Ansätze, die das Petrinetz-Konzept mit dem Konzept unscharfer Mengen (fuzzy sets) ver-

knüpfen. Dadurch wird eine Repräsentation unscharfer Sachverhalte möglich. Vgl. zu solchen unscharfen Erweiterungen des Petrinetz-Konzepts LIPP (1989a), S. 12ff.; LIPP (1990), S. 652ff. (sogar mit speziellem Bezug auf Flexible Fertigungssysteme); PAGNONI (1990), S. 29ff., insbesondere S. 31ff. u. 188ff.; LIPP (1991), S. 104ff.

4) Schließlich fließen auch die allgemeinen Voraussetzungen ein, die während der thematischen Rahmenlegung als Prämissen der Realproblemkonzeptualisierung eingeführt wurden. Diese Konzeptualisierungsprämissen sind aber schon größtenteils durch die Auswertung der Fallstudie und durch die Erweiterungen des Kernkonzepts abgedeckt.

5) Diese Vollständigkeitsauffassung unterliegt jedoch mehreren Einschränkungen. Erstens bleibt sie auf die produktionswirtschaftliche Thematik dieser Arbeit beschränkt. Zweitens bezieht sie den Vollständigkeitsbegriff ausschließlich auf die zu modellierenden *Objekte*. Ein abweichender Vollständigkeitsbegriff wird später als Determinante der Modellierungsgüte behandelt. Er orientiert sich an den *Phasen* von Modellierungsprozessen und an den *Zwecken*, die Modellierungsträger mit der Anwendung eines Modellierungskonzepts verfolgen. Diese Differenzierung zwischen einem objektbezogenen Vollständigkeitsbegriff einerseits sowie einem phasen- und zweckorientierten Vollständigkeitsbegriff andererseits entspricht der Abgrenzung zwischen Modellierungsfähigkeit und Modellierungsgüte. Dort wurde vereinbart, alle Beurteilungskriterien, welche die Modellierungsobjekte betreffen, unter dem Aspekt der Modellierungsfähigkeit zu subsumieren. Alle übrigen Beurteilungskriterien werden dagegen zur Modellierungsgüte zusammengefaßt.

Ungeachtet der vorgenannten Einschränkungen wird des öfteren die Ansicht vertreten, daß sich das Petrinetz-Konzept für vollständige Modellierungen besonders empfehle. Vgl. AGERWALA (1975), S. 218; PETRI, C. (1976b), S. 11; TOURRES (1976), S. 217; MELDMAN (1977), S. 32f. u. 36; PICHLER, F. (1978), S. 27 (als Abbildbarkeit aller maßgeblichen Details); MEKLY (1980), S. 422; BECKER, B. (1991), S. 30.

Einen indirekten Hinweis auf die Modellierungsvollständigkeit des Petrinetz-Konzepts liefern auch Anmerkungen, daß sich Netzmodelle dafür eignen, die Unvollständigkeit von Systementwürfen aufzudecken. Denn das Erkennen von solchen Unvollständigkeiten setzt voraus, daß anhand der zugrundeliegenden Netzmodelle ausgedrückt werden kann, was den Systementwürfen zur Vollständigkeit noch fehlt. Vgl. zum Aufdecken von Unvollständigkeiten beim Einsatz von Petrinetzen KRÄMER (1981), S. 470; REISIG (1983a), S. 309; ROSENSTENGEL (1983).

6) Vgl. dazu die Ausführungen zur Modellvalidierung.

7) An früherer Stelle wurde ein weit gefaßter Begriff der Nebenläufigkeit eingeführt, der auch sequentielle Prozesse als degenerierten Grenzfall einschließt. Dies war vorteilhaft, um das Konzept der Nebenläufigkeit von vornherein so umfassend wie möglich auszulegen. Dagegen läßt sich die hier das Petrinetz-Konzept anschaulicher beurteilen, wenn zwischen sequentiellen und nicht-sequentiellen Prozessen differenziert wird. Daher liegt den folgenden Ausführungen der eng definierte Nebenläufigkeitsbegriff zugrunde, der sich nur auf nicht-sequentielle Prozesse erstreckt.

8) Kausale Verursachungszusammenhänge werden hier bewußt von finalen Verursachungszusammenhängen abgegrenzt. Letztgenannte werden aus der Perspektive von Sach- und Formalzielen separat erfaßt. Wenn in dieser Arbeit von Verursachungszusammenhängen geredet wird, so sind stets Kausalzusammenhänge gemeint.

9) Vgl. dazu die Ausführungen zur Präferenz kausaler Tiefenerklärungen.

10) Gedacht wird hierbei vor allem an die Repräsentation von Werkstücken oder -zeugen. Ebenso kommt aber auch die Modellierung von Arbeitskräften in Betracht.

11) Dies ist z.B. erforderlich, um bei der Auftragsverfolgung den Bearbeitungszustand einzelner auftragszugehöriger Werkstücke überwachen zu können.

12) Vgl. dazu die Rechtfertigung von zeitbezogenen Problemkonzeptualisierungen.

13) Der Verf. hat zwar ausführlich dargelegt, daß er stochastischen Modellierungen äußerst reserviert gegenübersteht. Dies gilt zumindest für den hier thematisierten Modellierungsbereich komplexer Produktionssysteme. Er bezieht die Fähigkeit zur Repräsentation stochastischer Einflüsse dennoch als Beurteilungskriterium ein, damit der Kriterienkatalog auch von solchen Rezipienten verwendet werden kann, die keine Bedenken gegenüber stochastischen Modellierungen tragen.

14) Die Anforderung, solche Koordinierungskonzepte modellieren zu können, folgt schon aus der eingangs vorausgesetzten inhaltlichen Füllung des Koordinierungsbegriffs.

15) Die Offenheit von Modellen wird zumeist aus einer Perspektive diskutiert, die den betrieblichen Entscheidungsträgern lediglich eingeschränkte Rationalität zubilligt. Vgl. dazu BRAYBROOKE (1963), S. 53 u. 139f.; HEINEN (1966), S. 8; ALEXIS (1967), S. 148 u. 158ff.; KIRSCH (1977a), S. 25ff.; ADAM, D. (1983b), S. 131f.

In dieser Arbeit wurden Aspekte eingeschränkter Rationalität bereits anhand von Satisfizierungszielen erfaßt. Die Absicht, Satisfizierungsziele zu erfüllen, kann auch den projektiven und komparativen Modellauswertungen zugrundeliegen, die an früherer Stelle eingeführt wurden. Um die Modellierung der vorgenannten Sachverhalte zu beurteilen, ist ein eigenständiges Kriterium "Modelloffenheit" aber nicht notwendig. Denn das Beurteilungskriterium,

das sich der Repräsentation von Formalzielen widmet, deckt auch die Kategorie der Satisfizierungsziele ab. Projektive und komparative Auswertungen werden berücksichtigt, wenn die Analysierbarkeit von Netzmodellen beurteilt wird. Daher wäre es redundant, die vorgenannten Facetten eingeschränkter Rationalität nochmals aus dem Blickwinkel der Modelloffenheit zu thematisieren. Sie werden daher hier nicht weiter gewürdigt. Statt dessen wird ein stark verengtes - damit aber redundanzfreies - Verständnis der Modelloffenheit zugrundegelegt. Es erstreckt sich ausschließlich auf die Offenheit eines Modells gegenüber solchen Wechselwirkungen mit der Modellumgebung, die nicht auf persönlichen Eigenarten des Entscheidungsträgers beruhen. Diese "objektivierten" Wechselwirkungen klingen auch bei ADAM, D. (1983b), S. 131, an: "Das offene Modell wird kontinuierlich von der Umwelt beeinflusst, und umgekehrt nimmt das Modell Einfluß auf die Umwelt." (Anführungszeichen des Originals hier unterlassen).

16) Solche Wechselwirkungen können sowohl das materielle als auch das informationelle Umsystem des Produktionssystems betreffen. Im ersten Fall liegen z.B. Austauschprozesse vor, in denen Produktionsfaktoren vom Beschaffungs- an das Produktionssystem übergeben werden. Oder vom Produktions- werden fertig bearbeitete Produkte an das Absatzsystem weitergereicht. Im zweiten Fall werden dagegen Nachrichten zwischen dem Produktionssystem und einem übergeordneten Informationssystem ausgetauscht, die der Koordinierung von Produktionsprozessen im Produktionssystem dienen.

17) Würden die Einflußgrößen innerhalb des Modells dargestellt, gehörten sie nicht mehr zum Umsystem, sondern zum modellierten Produktionssystem. Dies wurde jedoch qua Voraussetzung ausgeschlossen.

18) Vgl. DITTRICH, G. (1989b), S. 3 (allerdings in bezug auf die prozeßkonstituierenden Ereignisse); ABEL, D. (1990), S. 29. OLDEROG (1990b) hebt hervor, daß Petrinetze besonders geeignet seien, in ihrer Prozeßrepräsentation zwischen sequentiellen und nebenläufigen Prozessen zu differenzieren. Diesem Urteil pflichtet der Verf. bei. Denn anhand der Schaltschritte, die in einem Schaltprozeß ausgeführt werden, kann exakt bestimmt werden, um welche Prozeßart es sich handelt.

19) Dies trifft z.B. auf konventionelle Programmablaufpläne zu.

20) Die besondere Eignung des Petrinetz-Konzepts für die Behandlung von Nebenläufigkeit (Parallelität) ist allgemein anerkannt. Dies gilt nicht nur für die Repräsentation nebenläufiger Prozesse. Es trifft ebenso auf die Untersuchung und Gestaltung von nebenläufigen Prozessen zu, die auf der vorgenannten Repräsentationsfähigkeit beruhen. Die charakteristische Nebenläufigkeit von Petrinetzen zu belegen, würde mehrere Seiten füllen. Daher wird nur eine kleine Auswahl von Quellen angeführt: HOLT, A. (1968), S. 253f.; PATIL (1971), S. 1; NOE (1971), S. 366 u. 370; GOSTELOW (1971), S. 221; TSICHRITZIS (1971), S. 3; HACK, M. (1972), S. 2; NUTT (1972b), S. 23; MILLER, R.E. (1972), S. 460; BAKER, H. (1973a), S. 1; HERZOG, O. (1973), S. 3; LAUTENBACH (1974a), S. 187; BEST, E. (1974), S. 1; AVEYARD (1974), S. 250; CRESPI-REGHIZZI (1974), S. 1.1; LIEN (1974a), S. 1; CAVARROC (1974), S. 95; HACK, M. (1974b), S. 156; COURVOISIER (1974c), S. 142; ULLRICH (1974), S. 150; SONNENBERG (1974), S. 1; AGERWALA (1975), S. 15, 17, 218 u. 221; BEST, E. (1975a), S. 186; HACK, M. (1975a), S. 13; HACK, M. (1975b), S. 23; AZEMA (1975), S. 189; STEWEN (1975), S. 463f.; FERNANDEZ (1975), S. 1; DADDA (1976a), S. 38 u. 44; GENRICH (1976a), S. 588; BERTHELOT (1976), S. 202; CRESPI-REGHIZZI (1976a), S. 130; AZEMA (1976b), S. 109; WINKOWSKI (1976b), S. 1; LIEN (1976b), S. 251; MOALLA (1976b), S. 117; PETERSON, J. (1977), S. 223, 231 u. 237; SIFAKIS (1977a), S. 75; MURATA, T.A. (1977a), S. 412 u. 415; THIELER-MEVISSSEN (1977), S. 2; COTRONIS (1977), S. 198 u. 206; COURVOISIER (1977a), S. 167; KWAN (1977a), S. 608; BAUMERS (1977), S. 3; KRIEG, B. (1977), S. 1; SCHIFFERS (1977), S. II; ZERVOS (1977), S. 6 u. 16; ZISMAN (1977), S. 29; JONES, N. (1977), S. 277; GHOSH, S. (1977), S. 1; MELDMAN (1977), S. 32; GOTTSCHALK, W. (1977), S. 878; ZACHARIADES (1977), S. 1.12f.; CRESPI-REGHIZZI (1977), S. 144; HEIMERDINGER (1978), S. 161; PETERSON, J. (1978a), S. 144; EGGERT (1978), S. 39; BARZILAI (1978a), S. 1; HAN (1978a), S. 166; AUGIN (1978b), S. 1; AGERWALA (1978b), S. 309; YOELI (1978), S. 1.1; MEMMI (1978c), S. 505; GRIESE, W. (1979), S. 1; SIFAKIS (1979b), S. 93; AGERWALA (1979), S. 85; PAKAS-SKEWES (1979), S. 9; AYACHE (1979a), S. 1050; MURATA, T.A. (1979a), S. 807; PRIESE (1979), S. 4; JENSEN (1979a), S. 349; VALETTE (1979b), S. 156; MEMMI (1979), S. 92; KIMM (1979), S. 174; RAMAMOORTHY (1980), S. 440f.; NOE (1980a), S. 347; OBERQUELLE (1980), S. 505; HEINEMANN (1980), S. 3; ZUBEREK (1980), S. ; SYMONS (1980b), S. 28; MÜLLER, H. (1980b), S. 426; HRUSCHKA (1980a), S. 269; HRUSCHKA (1980b), S. 4; JENSEN (1980b), S. 1; ZUSE, K. (1980b), S. 20; GENRICH (1980c), S. 720; PETERSON, J. (1981), S. 35; BAUER, F. (1981), S. 410; JENSEN (1981a), S. 1; DE CINDIO (1982), S. 269; JOHNSON, R.R. (1982), S. 74; MARTINEZ (1982a), S. 301; HACKMANN (1982), S. 83 u. 85; HEINEMANN (1982), S. 187; GIRAULT (1982a), S. 0.1; CARSTENSEN (1982), S. 3; MONTEL (1983a), S. 293; KRÄMER (1983a), S. 231; COURVOISIER (1983), S. 60; HANSEN, N. (1983), S. 132; DE CINDIO (1983b), S. 41; O.V. (1983c), S. 1; HAAS (1987), S. 24; FREEDMAN (1988b), S. 333f.; BEKHI (1989), S. 245; DITTRICH, G. (1989b), S. 3; ABEL, D. (1990), S. 3; ESCHENBACHER (1991), S. 223; SCHEER (1991d), S. 130.

Aus dieser Vielzahl von Belegen für die herausragende Nebenläufigkeit des Petrinetz-Konzepts werden drei Stellungnahmen hervorgehoben: ZERVOS (1977), S. 16, betonte schon früh, daß die Nebenläufigkeit des Petrinetz-Konzepts im Vergleich mit anderen Modellierungskonzepten, die ebenso die Repräsentation nebenläufiger Prozesse beherrschen, bereits besonders intensiv untersucht worden sei. Dieser analytische Durchdringungsvorteil ist bis heute nicht verlorengegangen. GENRICH (1978b), S. 84, stellte heraus, daß das Petrinetz-Konzept für Studium von nebenläufigen Prozessen den am weitesten entwickelten mathematischen Untersuchungsapparat anzubieten vermag. In

ähnlicher Weise betonte KRÄMER (1983a), S. 231, daß das Petrinetz-Konzept die umfassendste Theorie der Nebenläufigkeit hervorgebracht habe. Auch diese beiden Einschätzungen von GENRICH und KRÄMER treffen heute noch zu. Dagegen vertritt ZAVE (1976), S. 35, die Ansicht, der Nebenläufigkeit des Petrinetz-Konzepts komme keine praktische Relevanz zu. Dem widerspricht aber die Vielzahl der o.a. Quellen. Auch die Konstruktion nebenläufiger Erreichbarkeits- und Optimierungsalgorithmen sowie die nebenläufige Abwicklung eines Produktionsauftrags in der Fallstudie belegen, daß die Nebenläufigkeit des Petrinetz-Konzepts erhebliche praktische Relevanz besitzt. Allerdings teilen sich Petrinetze die vorzügliche Repräsentation nebenläufiger Prozesse mit anderen Modellierungskonzepten. Dazu gehören dagegen vor allem Netzpläne; vgl. FREEDMAN (1988b), S. 333.

21) Diese Schaltprozesse zeichneten sich auch dadurch aus, daß ihnen ein wohlfundierter Prozeßbegriff zugrunde liegt. Er wurde während der systemtheoretischen Problemkonzeptualisierung durch Systemzustände und zustandsverändernde Ereignismengen eingeführt. Ihm entsprechen in Schaltprozessen die alternierenden Netzmarkierungen und markierungsverändernden Schaltschritte. Damit hebt sich das Petrinetz-Konzept deutlich von anderen Modellierungskonzepten ab, die zumeist nur auf einem intuitiven, nicht systematisch entfalteten Prozeßbegriff beruhen.

22) Die spezielle Fähigkeit des Petrinetz-Konzepts, Prozesse zu modellieren, hängt also nicht davon ab, ob entweder sequentielle oder aber nebenläufige Prozesse betrachtet werden. Daher könnte daran gedacht werden, von vornherein ein undifferenziertes Beurteilungskriterium für die Prozeßmodellierung zu verwenden. Dies würde für die Beurteilung des Petrinetz-Konzepts ausreichen. Aber das Beurteilungsschema wird so ausgelegt, daß es sich auch auf andere Modellierungskonzepte anwenden läßt. Dort kann die Unterscheidung zwischen den beiden Prozeßkategorien erhebliche Bedeutung erlangen. Beispielsweise bereitet es erhebliche Schwierigkeiten, im Rahmen der konventionellen Automatentheorie die Nebenläufigkeit von Prozessen zu modellieren.

Darüber hinaus besitzen die beiden prozeßbezogenen Beurteilungskriterien eine unterschiedliche Qualität, wenn vor dem Hintergrund alternativer Modellierungskonzepte argumentiert wird. Das Kriterium, sequentielle Prozesse modellieren zu können, eignet sich vor allem für Untersuchungen, ob Konzepte überhaupt die explizite Repräsentation von Prozessen zulassen. Denn wenn dies schon für die "einfachen" sequentiellen Prozesse nicht möglich ist, dann kann es erst recht nicht für die "komplexen" nebenläufigen Prozesse erwartet werden. Beispielsweise verfügen OR-Programme nicht über das Ausdrucksvermögen, Prozesse als solche explizit zu repräsentieren. Das wurde schon erläutert.

Dagegen wird das Kriterium, das sich auf die Modellierung von nebenläufigen Prozessen erstreckt, zumeist erst dann angewendet, wenn bereits die Modellierungsfähigkeit bezüglich sequentieller Prozesse nachgewiesen ist. Dann dient die Untersuchung nebenläufiger Prozesse dazu, die konzeptionelle Mächtigkeit der expliziten Prozeßrepräsentationen zu beurteilen. In dieser Hinsicht wurde schon oben zwischen "einfachen" sequentiellen und "komplexen" nebenläufigen Prozessen unterschieden. Von Autoren, die im Rahmen von Netzen argumentieren, wird die Fähigkeit, sequentielle Prozesse zu repräsentieren, zumeist als selbstverständliche Basisfähigkeit vorausgesetzt. Daher überrascht es nicht, daß bei Beurteilungen des Petrinetz-Konzepts diese Fähigkeit in der Regel nicht erwähnt wird. Daß diese spezielle Modellierungsfähigkeit jedoch keineswegs "trivial" ist, wurde schon kurz zuvor im Hinblick auf OR-Programme dargelegt. Anstatt sich mit sequentiellen Prozessen aufzuhalten, konzentrieren sich die meisten Autoren im Kontext des Petrinetz-Konzepts von vornherein auf den Aspekt der Nebenläufigkeit. Allerdings wird dann die spezielle Fähigkeit, nebenläufige Prozesse explizit darzustellen, als *das* charakteristische Merkmal des Petrinetz-Konzepts besonders herausgestellt. Vgl. dazu die voranstehende Anmerkung.

Ein letztes Argument zugunsten der Trennung zwischen sequentiellen und nebenläufigen Prozessen knüpft an einer subtileren Ausdifferenzierung von Modellierungsobjekten an. Dabei wird zwischen realen Objekten einerseits und der Kontrolle des realen Objektverhaltens andererseits unterschieden. Beide Komponenten - sowohl das Realobjekt als auch seine Verhaltenskontrolle - bilden zwei Komponenten des insgesamt zu modellierenden Objekts. Die Kontrollkomponente wurde bereits in einer früheren Anmerkung kurz erwähnt. Es wird auch auf die dort erläuterte Bedeutung des Terminus "Kontrolle" verwiesen. Die Darstellung nebenläufiger Prozesse, die in Realobjekten ausgeführt werden können, ist in mehreren Modellierungskonzepten üblich. Sie wird beispielsweise seitens der Netzplantechnik vorzüglich beherrscht. Aber Kontrollkomponenten, die das Verhalten von Realobjekten koordinieren sollen, werden zumeist noch auf der Basis von sequentiellen Prozessen gestaltet. Die Formulierung solcher sequentiellen Kontrollprozesse beruht auf einem Denkmuster, das noch in der weithin vorherrschenden, rein sequentiellen Programmierung der VON NEUMANN-Automaten verhaftet ist. Dieses Denken in sequentiellen Ablaufstrukturen erweist sich als so dominant, daß die alternative Option, nebenläufige Kontrollkomponenten zu entwerfen, kaum jemals in Erwägung gezogen wird. Daher werden des öfteren "seltsame" Objektmodellierungen vorgelegt, in denen das nebenläufige Verhalten eines Realobjekts durch eine sequentiell operierende Kontrollkomponente koordiniert wird. Dort besteht eine eklatante Inkongruenz zwischen der nebenläufigen Ablaufstruktur des Realobjektverhaltens einerseits und der sequentiellen Ablaufstruktur der sequentiellen Kontrollkomponente andererseits. Sequentielle Ablaufstrukturen sind aber weitaus weniger leistungsfähig als nebenläufige. Denn auf das gesamte Ausdrucksspektrum der Nebenläufigkeit - z.B. auf Zeitgleichheit und zeitliche Überlappungen - wird verzichtet. Daher drängt sich die Frage auf, warum das nebenläufige Verhalten eines Realobjekts nicht auch durch eine ebenso nebenläufige Kontrollkomponente koordiniert werden sollte. Sie bleibt jedoch aufgrund der o.a. Dominanz des Denkens in sequentiellen Ablaufstrukturen zumeist ungestellt. A fortiori wird sie auch nicht beantwortet. Aus diesem Grund empfiehlt es sich,

bei der Beurteilung eines Modellierungskonzepts zwischen sequentiellen und nebenläufigen Prozessen explizit zu unterscheiden. Denn diese Differenzierung schärft den Blick für die zuvor skizzierte Seltsamkeit, daß die Ablaufstrukturen von Realobjekten und ihren Kontrollkomponenten oftmals inkongruent gestaltet werden. Vgl. zu dieser Perspektive auch die Ausführungen von HOLT, A. (1968), S. 253ff., und COX, L. (1978), S. 905. Sie entsprechen dem Vorhergesagten zwar nicht vollständig, aber die wesentlichen Argumentationsbestandteile werden auch dort angedeutet.

Merkwürdige sequentielle Kontrollkomponenten, die das Verhalten von nebenläufigen Realobjekten koordinieren sollen, stellen keineswegs eine seltene Randerscheinung dar. Vielmehr finden sie sich in der Modellierungspraxis häufig. Auf ein Beispiel wurde schon im Zusammenhang mit der Arbeitsplanung aufmerksam gemacht. Dort wurde herausgearbeitet, daß die Koordinierung von Arbeitsgängen, die sich in nebenläufiger Weise ausführen lassen, des öfteren durch artifizielle Ausführungsrestriktionen überlagert wird. Als Ergebnis resultiert eine rein sequentielle Arbeitsgangausführung. Sie schlägt sich auch im produktionswirtschaftlichen Sprachgebrauch nieder, so z.B. im "Ordinieren" von Arbeitsgängen. Die Arbeitsplanungsmodelle ("Ordinierungsmodelle") beruhen daher auf einer sequentiellen Kontrollkomponente, obwohl die einzuplanenden Arbeitsgänge in nebenläufiger Weise ausgeführt werden können. Dieser Sachverhalt bleibt davon unberührt, daß die Kontrollkomponente produktionswirtschaftlicher Modelle zumeist weder als solche thematisiert noch explizit ausgewiesen wird. Statt dessen fließt sie in der Regel auf implizite Weise in die Algorithmen der Modellauswertung ein. Dies trifft auch auf das vorgenannte "Ordinieren" von Arbeitsgangausführungen zu.

23) Die nachfolgende Argumentation ist insofern problematisch, als sie die bereits erläuterte allgemeine Modellierungsfähigkeit der drei betrachteten Netzklassen mit dem speziellen Gesichtspunkt verschränkt, Prozesse zu modellieren. Insofern erfolgt eine Wiederholung von bereits Gesagtem in neuem Kontext. Eine solche Wiederholung könnte als Redundanz kritisiert werden, die dazu führt, daß die unterschiedlichen allgemeinen Modellierungsfähigkeiten der drei Netzklassen in die Beurteilung mehrfach eingeht. Dadurch drohe dieser Gesichtspunkt ein unzulässiges Übergewicht zu erhalten. Der Verf. schließt sich diesem Argument aus zwei Gründen nicht an. Erstens wird er darlegen, daß er einer Gewichtung der Beurteilungskriterien ohnehin distanziert gegenübersteht. Insofern möchte er sich überhaupt nicht auf die Erörterung einlassen, ob der allgemeinen Modellierungsfähigkeit ein "unzulässiges Übergewicht" oder vielleicht doch eine "angemessene Würdigung" zuteil werde. Zweitens zieht er es vor, anhand der Verschränkung von allgemeiner Modellierungsfähigkeit und spezieller Darstellbarkeit von Prozessen aufzuzeigen, daß die Erkenntnisse über die Universalität von Netzklassen andere Untersuchungen befruchten können. Daher handelt es sich keineswegs nur um "abstrakte" Qualifizierungen von "formalen" Ausdrucksklassen. Vielmehr wird in Kürze verdeutlicht, wie sich diese Ausdrucksklassen qua Schaltregel in konkreter Weise auf die Fähigkeit, Prozesse zu modellieren, konkret auszuwirken vermögen.

24) Daneben wird auf die besonderen Vorzüge verwiesen, die Synthetische Netze bei der Repräsentation temporaler Sachverhalte aufweisen. Sie wurden in einem separaten Kapitel gewürdigt.

25) Analoge ordinale Überlagerungen, die aus dem Blickwinkel der allgemeinen Ausdrucksmächtigkeit erfolgen, können auch auf andere spezielle Modellierungsaspekte angewandt werden. Dadurch würde aber nur der gleiche Sachverhalt - die zunehmende allgemeine Modellierungsfähigkeit von Stelle/Transition-Netzen, Synthetischen Kernnetzen und Erweiterten Synthetischen Netzen - wiederholt auf unterschiedliche Objekte bezogen. Davon sind keine neuartigen Erkenntnisse zu erwarten. Daher verzichtet der Verf. darauf.

26) Im Kontext des Petrinetz-Konzepts finden entscheidungstheoretische Problemkonzeptualisierungen im allgemeinen keine Beachtung. Daher wird die Fähigkeit, Entscheidungsalternativen zu repräsentieren, kaum als solche thematisiert. Zu den seltenen Ausnahmen gehören die Ausführungen von PAGNONI (1990), S. 163, 170ff., 185f. u. 188ff., insbesondere S. 181ff. Sie beschäftigt sich mit der Netzklasse der Kontrollnetze ("Control Nets"), die speziell für die Modellierung von Entscheidungsalternativen vorgesehen ist. Der Verf. hält zwar eine solche spezielle Netzklasse nicht für notwendig. Denn Entscheidungsalternativen lassen sich in jeder Netzklasse, die eine wohldefinierte Netzdynamik besitzt, durch Schaltkonflikte ihrer Transitionen modellieren. Aber immerhin ist der explizite Entscheidungsbezug von PAGNONI zu begrüßen.

Bemerkenswert sind auch die knappen, aber gehaltreichen Ausführungen von RAZOUK (1985c), S. 20. Dort wird das Softwarepaket P-NUT behandelt, das schon in einer früheren Anmerkung erwähnt wurde. Es ist in der Lage, aus dem Erreichbarkeitsgraphen eines beliebigen Petrinetzes einen Entscheidungsgraphen abzuleiten. Solche Entscheidungsgraphen wurden in dieser Arbeit schon vorgestellt. Dort wurde aufgezeigt, daß die Markierungsknoten eines Entscheidungsgraphen - abgesehen von Deadlockmarkierungen - Netzmarkierungen repräsentieren, unter denen jeweils ein nicht-degenerierter Entscheidungsspielraum offensteht. Der resultierende Entscheidungsgraph drückt daher in kompakter Gestalt die Gesamtheit aller Entscheidungsalternativen aus, die in der dynamischen Struktur des betrachteten Netzmodells verankert sind. Besonders hervorzuheben ist, daß ein solcher Entscheidungsgraph - im Gegensatz zu den Kontrollnetzen PAGNONI's - für jede Netzklasse konstruiert werden kann, die wohldefinierte Erreichbarkeitsgraphen besitzt. Die Entscheidungsgraphen lassen sich daher auch für die hier entwickelten Synthetischen Netze generieren.

Weitere Hinweise darauf, daß sich Petrinetze für die Modellierung von Entscheidungen, von Entscheidungsalternativen, von Auswahlmöglichkeiten o.ä. empfehlen, finden sich bei HOLT, A. (1976), S. 140; SCHUMACHER (1978), S. 2; PAGNONI (1990), S. 20 u. 124; ABEL, D. (1990), S. 27 u. 43; SCHEER (1991d), S. 130.

Vgl. ebenso WINAND (1980), S. 1239f. u. 1246f. Zwar bezieht sich die Konstruktion aus Abb. 5 auf S. 1239 nicht auf echte Entscheidungsalternativen, sondern auf alternative Umweltzustände, deren reales Eintreten ex ante unbekannt ist. Doch läßt sich die Konstruktion ebenso auf die Repräsentation von Entscheidungsalternativen anwenden. WINAND (1980), S. 1240 u. 1246f., widmet sich sogar explizit der Repräsentation von Entscheidungsalternativen. Allerdings erfolgt dort eine problematische Alternativenrepräsentation. Darauf wird in einer späteren Anmerkung ausführlicher eingegangen.

Darüber hinaus wird die Repräsentation von Entscheidungsalternativen des öfteren in anderen Formulierungsvarianten gewürdigt. Dabei wird z.B. hervorgehoben, daß Petrinetze die Repräsentation von Konflikten ermöglichen. Vgl. MOALLA (1977), S. 90; ZACHARIADES (1977), S. 1.3; PETRI, C. (1980a), S. 1; WINAND (1980), S. 1252; PAGNONI (1990), S. 20. Mitunter wird dabei der Aspekt der *Konfliktoffenlegung* besonders herausgestellt; vgl. SHAPIRO, R. (1972), S. 3.28; ZACHARIADES (1977), S. 1.13. Von OLDEROG (1990b) wird dagegen der Aspekt, Auswahlakte zu repräsentieren, besonders hervorgehoben. Ähnlich stellen SILVA und VALETTE heraus, daß die typischen Halbordnungen Ereignisgeschehnissen in Petrinetzen flexibilitätsstiftende "Optionen" eröffneten; vgl. SILVA, M. (1990b).

Mitunter wird auch betont, durch Petrinetze ließen sich Objekte (Systeme) mit nondeterministischem Verhalten modellieren. Vgl. SHAPIRO, R. (1972), S. 3.28; MELDMAN (1977), S. 32; ZISMAN (1977), S. 29; BARZILAI (1978a), S. 1; MEKLY (1980), S. 422; BAUER, F. (1981), S. 410. Es könnte der Einwand erhoben werden, auch stochastische Modellierungen besäßen nondeterministischen Charakter. Dies trifft durchaus zu, wie die o.a. Bezugnahme auf alternative Umweltzustände zeigt. Aber die voranstehenden Quellen befassen sich nicht mit stochastischen Aspekten. Vielmehr spielen sie auf Objekte an, deren Verhalten nicht vollständig determiniert ist, weil Spielräume für alternative Verhaltensweisen offenstehen. Dies entspricht der früheren Konzeptualisierung von Entscheidungsspielräumen.

27) Auf Schaltkonflikte wurde in dieser Arbeit schon mehrfach eingegangen. Sie umfassen Permissivitäts-, Knappheits- und Abundanzkonflikte. Knappheits- und Abundanzkonflikte dienen zur Repräsentation von "gewöhnlichen" Entscheidungsalternativen. Hinzu kommt die Modellierung von Unterlassungsalternativen. Sie wird durch Permissivitätskonflikte berücksichtigt. Die Abundanzkonflikte stehen allerdings bei Stelle/Transition-Netzen noch nicht zur Verfügung. Darauf wird in Kürze näher eingegangen.

28) Der hier bevorzugte Ansatz, Entscheidungsalternativen durch konfliktionär aktivierte Schaltschritte darzustellen, klingt z.B. an bei AGERWALA (1978b), S. 309 i.V.m. Fig. 1 auf S. 310; RAZOUK (1985c), S. 20 (mittelbar); ABEL, D. (1990), S. 27.

Eine andere Modellierungsweise von Entscheidungsalternativen verfolgen WINAND und ROSENSTENGEL in WINAND (1980), S. 1239f. u. 1246f. Sie belegen die Stellen eines Netzes in alternativenspezifischer Weise mit Markenkopien). Der Verf. folgt diesem Ansatz jedoch nicht. Denn die alternativenspezifische Verteilung von Markenkopien wird *nicht innerhalb* des Netzmodells erklärt. Vielmehr wird sie *von außen* und *ad hoc* an das Modell herangetragen. So bezeichnen WINAND und ROSENSTENGEL ihre Vorgehensweise explizit als "ad hoc-Improvisation" (S. 1240). Ebenso wollen sie Entscheidungskonflikte "durch Eingriff von außen (Markierung)" (S. 1240) bearbeiten. Diese konzeptexogene Vorgehensweise äußert sich vor allem darin, daß die "Modellierung" von Entscheidungsalternativen erhebliche Nebenwirkungen nach sich ziehen kann. Das wird besonders deutlich aus einem Vergleich von Abb. 9 und Abb. 11 bei WINAND (1980), S. 1243 bzw. 1247. Dort werden zwei Entscheidungsalternativen nicht nur durch eine alternative Markenverteilung repräsentiert. Statt dessen ist eine zusätzliche Veränderung von Stellenanschriften und Netzkanten erforderlich. Diese gravierenden Eingriffe in Netzbeschriftung und -topologie befremden angesichts der einfachen Modellierungsaufgabe, lediglich die Auswahl zwischen zwei alternativen Optionen darzustellen. Sie wären überhaupt nicht notwendig, wenn die Fähigkeit des Petrinetz-Konzepts ausgeschöpft würde, Entscheidungsalternativen auf netzendogene Weise durch Aktivierungskonflikte von Transitionen zu erfassen. Zwar wird bei WINAND (1980), S. 1240, diese Modellierungsweise kurz gestreift. Aber sie wird anschließend - ohne nähere Begründung - nicht weiter berücksichtigt. Der Verf. bevorzugt dagegen den Ansatz, die endogenen Modellierungsfähigkeiten eines Konzepts zunächst so weit wie möglich auszunutzen, bevor zu konzeptexogenen ad hoc-Konstruktionen gegriffen wird. Für die Modellierung von Entscheidungsalternativen reichen die Aktivierungskonflikte von Transitionen vollständig aus. Daher wird die voranstehend skizzierte Modellierungsweise von WINAND und ROSENSTENGEL verworfen.

29) Wie ein Schaltprozeß im Netzmodell eines Produktionssystems ausgeführt wird, hängt davon ab, welche von den konfliktionär aktivierten Transitionen unter jeder Netzmarkierung tatsächlich geschaltet werden.

30) Dabei handelt es sich um alle Schaltwege, die von einem gemeinsamen Markierungsknoten ausgehen und mit derselben Schaltkante beginnen. Der Markierungsknoten repräsentiert den Entscheidungsspielraum, aus dem die betrachtete Entscheidungsalternative stammt. Die Schaltkante drückt das Schalten derjenigen Transition aus, durch deren konfliktionäre Aktivierung die Entscheidungsalternative angezeigt wurde. Es kann auch mit einem bewerteten

Erreichbarkeitsgraphen gearbeitet werden. Dann lassen sich die Formalzielwirkungen einer Entscheidungsalternative direkt als Schaltwerte derjenigen Schaltwege erkennen, die im Erreichbarkeitsgraphen die Auswirkungen der Entscheidungsalternative darstellen.

Eine einfache Vorstufe solcher Wirkungsanalysen findet sich bei WINAND (1980), S. 1246ff. Dort wird ein Netzmodell benutzt, um die Auswirkungen zu studieren, die von Flugplanstörungen und den Entscheidungsalternativen für die Störungsbeseitigung ausgehen können. Allerdings wird dort nicht auf das Instrument der Erreichbarkeitsanalyse zurückgegriffen. Statt dessen bleibt es bei exemplarischen Wirkungsbetrachtungen, in denen alternative Netzmarkierungen "durchgespielt" werden. Vgl. dazu den Hinweis auf das "token game", der in einer früheren Anmerkung erfolgte.

31) Die Modellierung der Entscheidungsalternativen, die von den drei Netzklassen geleistet wird, hängt allerdings von den Ausdrucksmöglichkeiten der Netzklassen ab. Dieser Aspekt wird hier aber nicht weiter vertieft. Die meisten Netzplanklassen sind dagegen nicht fähig, Entscheidungsalternativen zu modellieren. Darauf wurde schon ausführlich eingegangen.

32) Das widerspricht nicht der oben benutzten Formulierung, in der Entscheidungsalternativen auf konfliktionär aktivierte Transitionen zurückgeführt wurden. Denn es erfolgte keine Festlegung, ob die Aktivierungskonflikte zur Kategorie der Knappheits- oder aber zur Kategorie der Abundanzkonflikte gehören. Im Falle eines Knappheitskonflikts liegen *mehrere*, zueinander konfliktionär aktivierte Transitionen vor. Sie repräsentieren *mehrere* Aktivitäten, von denen genau eine zur Ausführung ausgewählt werden kann. Bei einem Abundanzkonflikt ist dagegen *nur eine* Transition aktiviert, dies allerdings mit *mehreren* Schaltfarben. Sie repräsentiert *nur eine* Aktivität, die jedoch auf verschiedene - sich wechselseitig ausschließende - Objektmengen angewandt werden kann. Es gilt dann, für die Ausführung der Aktivität genau eine von diesen Objektmengen auszuwählen.

33) An früherer Stelle wurde dargelegt, daß sich zwei Kategorien von Entscheidungsalternativen modellieren lassen, indem entweder auf Knappheits- oder aber auf Abundanzkonflikte zurückgegriffen wird. Eine dritte Alternativenkategorie wird durch die Ausschöpfung des Permissivitätskonflikts konstituiert.

34) Dabei wird die Aktivität durch eine Transition modelliert. Die alternativen Objektmengen werden durch entsprechende Mengen von Markenkopien repräsentiert.

35) Die Markenkopien, die zur Repräsentation der Objektmenge dienen, können als Datentupel betrachtet werden. Aus dieser Perspektive bedeutet der Abundanzkonflikt einer Transition, daß entschieden werden muß, mit welchen Daten das Schalten der aktivierten Transition ausgeführt werden soll. Daher liegt ein datenabhängiger Entscheidungskonflikt vor. Eine Konfliktauflösung erfolgt durch die Auswahl einer Schaltfarbe für die abundant aktivierte Transition. Aufgrund dieser Interpretationsmöglichkeit für Abundanzkonflikte trifft es nicht zu, daß Petrinetze an der Aufgabe scheiterten, datenabhängige (Entscheidungs-)Konflikte zu modellieren. Vgl. zu dieser fehlerhaften Ansicht z.B. SYMONS (1980b), S. 29; BEKHI (1989), S. 245.

36) Der Diskretheit der Markenkopien wird zumeist als grundsätzlich diskreter Charakter des Petrinetz-Konzepts schlechthin angesprochen. Vgl. zu dieser Einstellung PETRI, C. (1967), S. 123 u. 125; SHAPIRO, R. (1972), S. 3.28; FERNANDEZ (1975), S. 1; SCHUMACHER (1975), S. 409; PETERSON, J. (1977), S. 228; KRIEG, B. (1977), S. 1; BAUMGARTEN (1978), S. 51; QUÄCK (1978), S. 77; HAN (1978a), S. 166; MOALLA (1978b), S. 374; TREMOLIERES (1979), S. 60, der die Repräsentationsmöglichkeit kontinuierlicher Größen explizit ausschließt; MEMMI (1979), S. 92; HAN (1979), S. 271; HEINEMANN (1980), S. 3. Es wird aber in Kürze nachgewiesen, daß die Diskretheit keine notwendige Eigenart des Petrinetz-Konzepts darstellt, weil sie durch den Übergang zu Höheren Netzen überwunden werden kann. Vgl. allerdings auch den einschränkenden Hinweis, daß ein irreduzibel diskreter Resteinfluß auch in Höheren Netzen fortbesteht.

37) An diese kontinuierliche Modellierungsfähigkeit könnte PETRI, C. (1980a), S. 6, gedacht haben, wenn er dem Petrinetz-Konzept die Funktion zuschreibt, die Lücke zwischen (rein) diskreten und (rein) kontinuierlichen Modellierungen zu überbrücken. Allerdings legt sich PETRI nicht explizit fest, auf welche Art die Lückenschließung erfolgen soll.

Einen anderen Weg, kontinuierliche Ressourcennutzungen zu modellieren, hat ROSENSTENGEL (1983) vorgeschlagen. Er regt an, einzelne Markenkopien als Repräsentanten von kontinuierlichen Maßeinheiten zu verwenden. Beispielsweise kann eine Markenkopie für ein kontinuierlich genutztes Fließgut - etwa in Produktionsmodellen der chemischen Industrie - als eine Maßeinheit für den "Mengendurchsatz je Zeiteinheit" festgelegt werden. Dieser Mengendurchsatz je Zeiteinheit läßt sich auf einer beliebigen kontinuierlichen Skala messen. Sofern die Skala auf die Menge aller Rationalzahlen beschränkt wird, können alle Mengendurchsätze je Zeiteinheit, die in einer Modellierungsaufgabe eine Rolle spielen, als ganzzahlige Vielfache einer größten gemeinsamen Maßeinheit dargestellt werden. Dies garantiert die universelle Kommensurabilität aller Rationalzahlen. Eben diese größte gemeinsame Maßeinheit wird durch eine Markenkopie repräsentiert. Alle relevanten Mengendurchsätze je Zeiteinheit können dann als entsprechende ganze Anzahlen dieser Markenkopien wiedergegeben werden. Diese alternative Modellierung kontinuierlicher Ressourcennutzungen wird jedoch aus zwei Gründen nicht weiterverfolgt. Einerseits hält der Verf. die Suche nach größten gemeinsamen Maßeinheiten für unnötig aufwendig. Denn sie erübrigt sich bei der

Verwendung von Markenattributen mit kontinuierlich definierten Attributausprägungen. Andererseits brauchen solche Markenattribute auch nicht auf rationalzählige Ausprägungen beschränkt zu werden. Statt dessen sind ebenso reellzählige Definitionsbereiche für die Attributausprägungen möglich.

Schließlich wird auf die Modellierung kontinuierlicher Ressourcennutzung auch in ROSENSTENGEL (1991), S. 106ff., insbesondere S. 109ff. u. 135f., eingegangen. Allerdings erfahren dort die genutzten Ressourcen keine Repräsentation durch Markenkopien. Vielmehr werden sie nur von ressourcenspezifischen Stellen wiedergegeben. Dadurch bleiben das Ausdrucksvermögen von Markenkopien und die Visualisierungsmöglichkeit von Markenflüssen verschlossen. Daher wird auf diesen Ansatz hier nicht weiter eingegangen.

38) Vgl. dazu die Erläuterung, wie sich Lagerkapazitäten mit der Hilfe von Attributausprägungen verfeinert modellieren lassen.

39) In diesem Kapitel geht es nur um die Modellierungsfähigkeit, nicht aber um die Modellierungsgüte eines Konzepts. Daher reicht das kontinuierliche Repräsentationsvermögen aus, um dem Petrinetz-Konzept eine "hohe" Fähigkeit zur Modellierung von Ressourcennutzungen zuzusprechen. Der Aspekt der Modellierungsgüte wird an späterer Stelle gewürdigt. Daher wirkt sich erst dort der Anschaulichkeitsverlust bei der Modellierung kontinuierlicher Ressourcennutzungen auf die Konzeptbeurteilung in negativer Weise aus.

40) Diese diskrete Restcharakteristik spielt keineswegs nur für die hier betrachtete Modellierung von Ressourcennutzungen eine Rolle. Vielmehr handelt es sich um eine "fundamentale Konstante" des Petrinetz-Konzepts. Sie wirkt sich auf alle Aspekte eines Netzmodells aus, die von schaltbedingten Markierungsveränderungen abhängen. Dies ist für alle dynamischen Modellaspekte der Fall. Beispielsweise unterliegt auch der "Zeitfluß" in den markenbezogenen Zeitnetzen, die an früherer Stelle eingeführt wurden, dem hier erläuterten diskreten Resteinfluß. Denn das Voranschreiten der Systemzeit wird in solchen Zeitnetzen durch Schaltakte von Transitionen bewirkt, die zum Modul der zentralen Systemuhr gehören. Auch diese Schaltakte besitzen grundsätzlich diskreten Charakter. Daher kann die Systemzeit nur in diskreten Einheiten verändert werden. Das gilt auch dann, wenn die Systemzeit auf einer kontinuierlichen Skala gemessen wird. Die Veränderungen der Systemzeit können zwar beliebig klein festgelegt werden, müssen aber immer einen endlichen positiven Betrag besitzen. Dieser Veränderungsbetrag bedeutet, daß die Systemzeit immer nur in diskreten Abständen voranschreiten kann. Die Systemzeit "verfließt" daher strenggenommen nicht, sondern rückt in abrupten Sprüngen diskontinuierlich voran.

41) Vgl. dazu die voranstehende Anmerkung und die Konzeptualisierung diskreter Zeitskalen. Die einzige Ausnahme stellen Transitionen dar, die innerhalb desselben Schaltschritts geschaltet werden. Aber diese nebenläufig geschalteten Transitionen lassen sich auf überhaupt keiner Zeitskala anordnen. Eine solche Anordnung widerspräche dem ordnungsfreien Charakter der Nebenläufigkeit. A fortiori kann mit nebenläufig geschalteten Transitionen auch kein kontinuierlicher Schaltprozeß begründet werden.

42) Daher wird die spezielle Modellierungsfähigkeit der Ressourcennutzung für Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze auch nicht als "ausgezeichnet", sondern nur als "hoch" eingestuft.

43) Es existieren zwei Sonderfälle, in denen sich auch im Rahmen des Petrinetz-Konzepts kontinuierliche Schaltprozesse einführen lassen. Es handelt sich einerseits um die "pulverisierten" Marken, die in einer früheren Anmerkung angesprochen wurden. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, einen kontinuierlichen Schaltprozeß als den Grenzfall einer unendlichen Folge von diskreten Schaltprozessen zu definieren. Von dieser Option wird jedoch abgesehen, weil sie im Rahmen des Petrinetz-Konzepts eine Idiosynkrasie darstellt. Darüber hinaus widerspricht die Bezugnahme auf eine *unendliche* Folge von Schaltprozessen der Finitheitsprämisse dieser Arbeit. Andererseits kann auf die kontinuierlichen Dichtefunktionen für stochastische Schaltdauern zurückgegriffen werden, die bereits behandelt wurden. Mit ihrer Hilfe lassen sich stochastische Schaltprozesse festlegen, in denen die Schaltzeitpunkte der Transitionen auf einer kontinuierlichen Zeitskala liegen. Es kann darüber gestritten werden, ob solche stochastischen Schaltprozesse bereits als kontinuierliche Schaltprozesse eingestuft werden dürfen. Dafür spricht die kontinuierliche Zeitskala, die von den Schaltzeitpunkten ihrer Transitionen erfüllt wird. Dagegen läßt sich aber einwenden, daß die Schaltprozesse weiterhin von diskreten Schaltakten einzelner Transitionen konstituiert werden, die in diskreten zeitlichen Abständen aufeinander folgen. Wie dieser terminologische Streit entschieden wird, interessiert hier jedoch nicht. Denn Stochastische Netze gehören ohnehin nicht zum Erkenntnisbereich der vorgelegten Ausarbeitung. Dies gilt zumindest für Netze, deren Transitionen stochastische Schaltdauern besitzen. Der Sonderfall von Netzen mit stochastischen Markierungsstrukturen wurde dagegen zugelassen.

44) In *dieser* Hinsicht kann der Ansicht zugestimmt werden, daß die Diskretheit eine "universelle" Charakteristik des Petrinetz-Konzepts darstellt. Dies gilt allerdings nur unter zwei Voraussetzungen, die den Universalitätsanspruch zugleich wieder einschränken. Erstens muß von den beiden Ausnahmen abgesehen werden, die in der voranstehenden Anmerkung erwähnt wurden. Davon wird im folgenden ausgegangen. Zweitens betrifft die charakteristische Diskretheit nicht das Petrinetz-Konzept in seiner Gesamtheit. Denn kontinuierliche Ausprägungen von Markenattributen sind durchaus zugelassen. Vielmehr handelt es sich um eine partielle Konzeptdiskretheit. Sie erstreckt sich nur auf die diskrete Ablaufstruktur aller Schaltprozesse, die in einem Netz geschehen können. Vgl. dazu die allgemeine Definition von Schaltprozessen, die in einem früheren Teil dieser Arbeit erfolgte. Dort wurden

Schaltprozesse als Folgen festgelegt, in denen Netzmarkierungen und markierungsverändernde Schaltschrittausführungen alternieren. Die diskontinuierlichen, abrupten Markierungsveränderungen der Schaltschrittausführungen konstituieren den grundsätzlich diskreten Charakter aller Schaltprozesse. Aus der Diskretheit aller Schaltprozesse folgt, daß auch die Menge aller erreichbaren Netzmarkierungen stets einen diskreten Charakter besitzt. Denn Markierungen lassen sich von der Ausgangsmarkierung aus nur durch diskrete Schaltprozesse erreichen. Ein Kontinuum von erreichbaren Netzmarkierungen ist daher unmöglich. Daher läßt sich die diskrete Restcharakteristik des Petri-Netz-Konzepts auf zweifache Weise verdeutlichen: sowohl durch die Diskretheit seiner Schaltprozesse als auch durch die Diskretheit seiner Erreichbarkeitsmengen. Da Schaltprozesse und Erreichbarkeitsmengen zur dynamischen Netzstruktur gehören, wird hier von einer charakteristischen Diskretheit dynamischer Netzaspekte gesprochen. Damit stimmen die Erläuterungen überein, die früher zur Diskretheit der Systemzeit in markenbezogenen Zeitnetzen erfolgten.

Wegen der charakteristischen Diskretheit der Dynamik von Netzmodellen muß der Ansicht von TREMOLIERES (1979), S. 60, widersprochen werden, Petrinetze stellen eine Erweiterung der Modelle vom FORRESTER-Typ dar. Denn die Dynamik der typischen FORRESTER-Modelle wird durch *kontinuierliche* Funktionen und Differentialgleichungen geprägt. Sie läßt sich mit den *diskreten* Übergängen zwischen Markierungen von Netzmodellen grundsätzlich nicht vereinbaren.

45) Vgl. zur herausragenden kausalen - oder auch "dynamischen" - Modellierungsfähigkeit des Petri-Netz-Konzepts FERNANDEZ (1975), S. 1; MASSACHUSETTS COMPUTER ASSOCIATES (1975), S. 3; GENRICH (1976a), S. 588; KRIEG, B. (1977), S. 1; MELDMAN (1977), S. 45; AGERWALA (1978a), S. 149; GENRICH (1978a), S. 214; WINAND (1980), S. 1237 u. 1252; BRETSCHNEIDER (1980a), S. 34; STARKE (1980), S. 4; HEINEMANN (1980), S. 3; MEKLY (1980), S. 422; STAHLKNECHT (1982), S. 120; HEINEMANN (1982), S. 187; FIDELAK (1988b), S. 7; PAGNONI (1990), S. 19, 119f., 122, 124, 134 u. 164; THOME, R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 6; ABEL, D. (1990), S. 49 (dort aber eher als ein Mangel an zeitbezogener Repräsentationsfähigkeit); ROSENSTENGEL (1991), S. 5f.

Sofern die vorgenannten Quellen die dynamische Modellierungsfähigkeit des Petri-Netz-Konzepts betonen, wird zwar des öfteren nicht näher ausgeführt, ob sie eine Dynamik im Sinne der bloßen Zeitabhängigkeit oder eine Dynamik aufgrund von kausalen Verursachungszusammenhängen meinen. Vgl. dazu die Diskussion von kinetischen und dynamischen Modellierungen. Aber wegen der großen - zumindest anfänglichen - Distanz des Petri-Netz-Konzepts gegenüber temporalen Einflußgrößen ist es plausibel zu vermuten, daß sich die betroffenen Quellen auf die kausal fundierte Dynamik von Netzen beziehen.

Im Rahmen des Petri-Netz-Konzepts wird seine Fähigkeit zur Modellierung kausaler Verursachungszusammenhänge oftmals auch aus einer anderen Perspektive thematisiert. Sie betrifft die Anforderung, die Interaktionen zwischen teilautonom agierenden Subsystemen so miteinander zu koordinieren, daß eine erwünschte Verhaltensweise des Gesamtsystems resultiert. Oftmals wird davon gesprochen, die interaktiven Subsysteme miteinander zu "synchronisieren". Die Interaktionsmöglichkeiten der Subsysteme - und die daraus abgeleiteten Koordinierungsoptionen - werden aber ihrerseits auf kausale Abhängigkeiten zwischen den Subsystemaktivitäten zurückgeführt. Dieses kausale Fundament wird zwar nicht immer deutlich ausgesprochen, liegt aber im Petri-Netz-Konzept allen Konzeptualisierungen von interaktiven Subsystemen zugrunde. Daher verweist die Fähigkeit, die Koordinierung interaktiver Subsysteme zu modellieren, stets auch auf die zugrundeliegende Fähigkeit zur Modellierung kausaler Verursachungszusammenhänge. Auf die Beiträge des Petri-Netz-Konzepts zur Subsystemkoordinierung wurde schon hingewiesen.

46) Eine weitere Ausnahme wird in der nachfolgenden Anmerkung angesprochen. Sie wird hier aber nicht als "wesentlich" eingestuft.

47) Strenggenommen werden zunächst sogar nur schwache kausale Folgebeziehungen erfaßt. Starke kausale Folgebeziehungen lassen sich erst repräsentieren, wenn die Obligatkanten aus Erweiterten Synthetischen Netzen zur Verfügung stehen. Die Differenzierung zwischen schwachen und starken kausalen Folgebeziehungen wurde anläßlich der einleitenden Rahmenlegung erläutert. Sie spielt aber für die produktionswirtschaftliche Modellierungspraxis keine herausragende Rolle. Daher wird sie hier nur am Rande erwähnt.

48) Daher muß der Behauptung von VALETTE (1982c), S. 8, Petrinetze eignen sich nicht für die Modellierung numerischer Probleme, widersprochen werden. Denn durch quantitative Markenattribute lassen sich beliebige numerische Objekteigenschaften repräsentieren. Auf dieser Basis können auch numerische Probleme modelliert werden. Darüber hinaus erlaubt auch das Konzept der Schaltwerte, in die netzgestützte Modellierung von Problemen numerische Einflußgrößen aufzunehmen. Dies wurde anhand von Optimierungsnetzen ausführlicher gewürdigt. Schließlich lassen sich sogar "Petri-Netz-Computer" gestalten.

49) Sie wurden ebenso in der Fallstudie behandelt. Den speziellen Aspekt, in Netzmodellen Wartezeiten zu erfassen, erwähnt auch HAN (1978a), S. 166. Er bezieht sich auf die Zeitintervalle, die in Warteschlangen verbracht werden.

50) Daher wurde der fehlende Zeitbezug oftmals als *der* entscheidende konzeptionelle Nachteil von Petrinetzen beklagt; vgl. z.B. LOCKEMANN (1975), S. 10; HEIMERDINGER (1978), S. 163; SCHUMACHER (1978), S. 19; MAYER, U. (1981), S. 3. Diese Kritik legte sich allerdings in jüngerer Zeit, als die verschiedenen Varianten von Zeitnetzen gr-

bere Beachtung fanden. Dennoch verhalten sich auch heute noch zahlreiche namhafte Anhänger des Petrinetz-Konzepts ausgesprochen reserviert, wenn die Einbeziehung des Zeitaspekts zur Diskussion steht. Vgl. z.B. PAGNONI (1990), S. 120.

51) Mit der Hilfe von Stochastischen Netzen lassen sich einerseits zufallsverteilte Ausführungsdauern von Aktivitäten modellieren. Zu diesem Zweck werden Transitionen mit stochastischen Schaltdauern verknüpft. Andererseits ist es ebenso möglich, Konflikte zwischen Entscheidungsalternativen in stochastischer Weise aufzulösen. Dies kann wiederum auf der Basis von stochastischen Schaltdauern geschehen: Von mehreren konfliktionär aktivierten Transitionen wird diejenige tatsächlich geschaltet, deren Schaltdauer am kürzesten ist. Die Aktivierungen aller anderen konfliktionär aktivierten Transitionen werden *uno actu* aufgehoben.

52) Vgl. SCHEER (1991d), S. 130.

53) Vgl. die Ausführungen anlässlich der Konzeptualisierung von Koordinierungsproblemen.

54) Dies unterstreicht den Hinweis, daß die hier vorgelegte Beurteilung "des" Petrinetz-Konzepts strenggenommen ein netzgestütztes Modellierungskonzept betrifft. Dieses Modellierungskonzept ist ein Amalgam aus Petrinetzen einerseits und Konzeptualisierungsprämissen für den Modellierungsbereich andererseits.

55) Im Petrinetz-Konzept werden die arbeitsteiligen Subsysteme, deren Aktivitäten untereinander koordiniert werden sollen, zumeist als interaktive oder als interagierende (Sub-)Systeme thematisiert. Dabei steht die Perspektive der Informatik, die Subsysteme von Informationsverarbeitungssystemen zu koordinieren, im Vordergrund. Darüber hinaus werden die betrachteten Koordinierungskonzepte häufig unter anderen Bezeichnungen - vor allem als "Synchronisationsmechanismen" - diskutiert. Darauf wurde schon im Kontext der Lebendigkeits- und Deadlockanalyse von Netzmodellen hingewiesen. Von diesen Abweichungen in terminologischer und sachlicher Hinsicht wird im folgenden abstrahiert.

56) Die Eignung des Petrinetz-Konzepts, die Koordinierung von interaktiven Subsystemen zu modellieren, wird oftmals hervorgehoben. Dabei wird die Subsystemkoordinierung häufig als Synchronisation angesprochen. Ebenso werden anstelle der Subsysteme des öfteren die Prozesse genannt, deren Ausführungen in den Subsystemen miteinander koordiniert bzw. synchronisiert werden sollen. Vgl. zu solchen Urteilen, welche die Koordinierungs- oder Synchronisationsbeiträge von Netzmodellen herausstreichen, PATIL (1971), S. 5; AGERWALA (1973), S. 81; BERNSTEIN (1973), S. 11 u. 80; ULLRICH (1974), S. 150; LOCKEMANN (1975), S. 9; GOSTELOW (1975), S. 345; AZEMA (1975), S. 189; MAYR,E. (1975), S. 2; GENRICH (1976a), S. 588; CRESPI-REGHIZZI (1976a), S. 130; DADDA (1976a), S. 38; MOALLA (1976b), S. 117; ZACHARIADES (1977), S. 1.12f.; JONES,N. (1977), S. 277; GOTTSCHALK,W. (1977), S. 878; COURVOISIER (1977a), S. 167; DADDA (1977b), S. 7; WHITE,G. (1977), S. 159; HEIMERDINGER (1978), S. 161; AUGIN (1978b), S. 1; FERSTL (1979), S. 90; DEVY (1979), S. 43; VALETTE (1979b), S. 156(f.); NOE (1980a), S. 347; KRÄMER (1983a), S. 231; O.V. (1983a), S. 6; O.V. (1983c), S. 1; HAAS (1987), S. 24; ABEL,D. (1990), S. 20f.; THOME,R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 6.

Das vorgenannte Urteil wird durch Ausführungen bestätigt, die sich mit der Modellierung der Kontrollstrukturen von Systemen befassen. Solche Systemkontrollen wurden als Konstruktionen eingeführt, die dazu dienen, die Prozeßausführungen innerhalb eines Systems zu koordinieren. Die Modellierung von Kontrollstrukturen stellt daher einen Spezialfall der hier interessierenden Modellierung von Koordinierungsaspekten dar. Es wird allgemein anerkannt, daß Petrinetze eine vorzügliche Modellierung von Kontrollstrukturen gestatten; vgl. PATIL (1971), S. 5; PATIL (1973), S. 59; DADDA (1976a), S. 38 u. 44; DADDA (1976c), S. 49 u. 52ff.; BERTHELOT (1976), S. 202; COURVOISIER (1977a), S. 167; COURVOISIER (1977b), S. 139; HEIMERDINGER (1978), S. 163; ELLIS,C.J. (1979), S. 5; RAMAMOORTHY (1980), S. 441; GENRICH (1982b), S. 1; YOELI (1982b), S. 8; VALETTE (1983), S. 264. Mitunter wird auch betont, Petrinetze ermöglichen die Modellierung von speziellen Kontrollstrukturen, die - in synonyme Weise - als nebenläufige, dezentrale oder verteilte Systemkontrollen herausgestellt werden; vgl. BERTHELOT (1976), S. 202; DADDA (1976c), S. 64; MURATA,TA. (1977a), S. 415; BAUMERS (1977), S. 3; RAMAMOORTHY (1980), S. 441; PETERSON,J. (1981), S. 35; GRABOWSKI,J. (1981a), S. 452; GIRAULT (1982a), S. 0.1; COURVOISIER (1983), S. 60.

Die Eignung des Petrinetz-Konzepts, die Koordinierung interaktiver Subsysteme zu modellieren, wird auch durch seine Qualitäten bei der Repräsentation kausaler Verursachungszusammenhänge unterstützt. Vgl. dazu den Hinweis, daß eine enge inhaltliche Beziehung zwischen kausalen Verursachungszusammenhängen und Konzepten für die Koordinierung interaktiver Subsysteme besteht. Allerdings existiert auch ein bemerkenswerter Unterschied: Die hier beurteilten Netzklassen weisen im Hinblick auf kausale Verursachungszusammenhänge weitgehend die gleiche Modellierungsfähigkeit auf. Bei der Betrachtung ihrer Modellierungsfähigkeit für Subsystemkoordinierungen ergibt sich dagegen eine deutliche Differenzierung. Sie wird im folgenden ausgeführt.

57) Zu diesen relativ einfachen Koordinierungsansätzen gehört z.B. das Konzept der Synchronieabstände. Dabei werden die Schaltaktanzahlen von konfliktionär aktivierten Transitionen gezählt, indem je Schaltakt eine Kopie der Basismarke aus einem endlichen Vorrat von Basismarkenkopien konsumiert wird. Der Vorrat von Basismarkenkopien wird auf ausgezeichneten Synchronisationsstellen bereitgehalten. Die konfliktionär aktivierbaren Transitionen sind mit den Synchronisationsstellen derart verknüpft, daß gilt: Die Anzahl der unmittelbar aufeinander folgen-

den Schaltakte einer selben Transition kann niemals größer sein als die Anzahl der Basismarkenkopien, die sich auf den Synchronisationsstellen insgesamt befinden. Diese maximale, von den Schaltakten der anderen konkurrierenden Transitionen nicht unterbrochene Schaltanzahl einer Transition wird als Synchronieabstand bezeichnet. Das Konzept der Synchronieabstände ist zwar für Stelle/Transition-Netze intensiv erforscht worden. Aber es ist derart grob angelegt, daß es sich für die hier interessierenden Koordinierungen von Produktionsprozessen nicht anwenden läßt.

58) Vgl. dazu die Erläuterung zur Koordinierungsfunktion eines Markengedächtnisses. Es wird nur deshalb nicht schon als Leistungsfacetten der Synthetischen Kernnetzen erörtert, weil in den illustrierenden Anwendungsfällen auf Zeitgrößen Bezug genommen wird. Sie lassen sich erst in Erweiterten Synthetischen Netzen berücksichtigen.

59) Auf die große Bedeutung der zeitbezogenen Konzeptualisierung produktionswirtschaftlicher Koordinierungsprobleme wurde schon eingegangen. In dieser Hinsicht unterscheidet sich die hier eingenommene, produktionswirtschaftliche Beurteilungsperspektive, aus der die spezielle Modellierungsfähigkeit des Petrinetz-Konzepts beleuchtet wird, deutlich vom sonst vorherrschenden Blickwinkel der Informatik. Denn seitens der Informatik besteht zumeist nur ein Interesse an der rein kausalen, von allen Zeitbezügen freien Grundausrichtung des Petrinetz-Konzepts. Diese Interessenlage manifestiert sich vor allem in der Position der "Netzpuristen", die bereits skizziert wurde.

Der abweichende produktionswirtschaftliche Standpunkt, die Koordinierung arbeitsteiliger Subsysteme insbesondere auch in der Anschauungsform "Zeit" modellieren zu können, wird anhand der Problematik von vergangenheitsbezogenen Koordinierungskonzepten verdeutlicht. Sie bezieht sich auf die Kritik von ROUCAIROL (1978), S. 1.5 u. 7.2(ff.), mit Petrinetzen ließen sich fast nur vergangenheitsblinde Synchronisierungsmechanismen modellieren. Dagegen bestehe oftmals ein Bedarf für Koordinierungen, die auch das zurückliegende Verhalten der betroffenen Subsysteme berücksichtigen. Dem zweiten Teil von ROUCAIROL's Vorhaltung ist zuzustimmen. Als Beispiel werden zwei Produktionsaufträge betrachtet, die durch ein Produktionssystem geschleust werden sollen. Die Bearbeitungsstationen des Produktionssystems stellen die arbeitsteiligen Subsysteme dar, durch deren Zusammenwirken die Abwicklung des zweiteiligen Auftragspakets verwirklicht werden soll. Die Aktivitäten der Bearbeitungsstationen gilt es zu koordinieren. Dabei ist es möglich, die Einlastung von Arbeitsgängen an den Bearbeitungsstationen davon abhängen zu lassen, wie groß die bisher angefallenen Wartezeiten der jeweils zu bearbeitenden Werkstücke sind oder welche Durchlaufzeiten die betroffenen Produktionsaufträge bislang schon im Produktionssystem verbracht haben. In beiden Fällen handelt es sich um typische vergangenheitsbezogene Entscheidungskriterien für die Arbeitsgangeinlastung. Sollte der erste Teil von ROUCAIROL's Kritik zutreffen, daß Petrinetze nur vergangenheitsblinde Koordinierungsmechanismen zu modellieren gestatten, läge tatsächlich eine gravierende Einschränkung ihrer Modellierungsfähigkeit vor. Doch wurde schon in der Fallstudie aufgezeigt, daß sich Arbeitsgangeinlastungen der vorgenannten, vergangenheitsbezogenen Art durchaus in Netzmodellen berücksichtigen lassen. Zentraler Ansatzpunkt ist dabei die Verwendung von Attributmarken. Denn in den Attributausprägungen ihrer Markenkopien lassen sich beliebige Informationen über die Vergangenheit der Markenkopien sammeln. Dadurch entsteht ein kopieindividuelles "Markengedächtnis". Auf diese Weise lassen sich auch werkstückspezifische Warte- oder auftragspezifische Durchlaufzeiten erfassen. Dazu reicht es aus, zwei Voraussetzungen zu erfüllen. Erstens müssen Zeitnetze zugrundegelegt werden, um Warte- und Durchlaufzeiten überhaupt erfassen zu können. Zweitens müssen entsprechende Zeitinformationen über Werkstücke in den Attributausprägungen von Kopien einer Werkstückmarke und analoge Zeitinformationen über Produktionsaufträge in den Attributausprägungen von Kopien einer Auftragsmarke akkumuliert werden. Beides wurde in der Fallstudie aufgezeigt. Damit ist die o.a. Kritik von ROUCAIROL widerlegt.

Dagegen trifft seine Vorhaltung durchaus zu, wenn für die Modellierung der beiden o.a. exemplarischen vergangenheitsbezogenen Koordinierungskonzepte nur Stelle/Transition-Netze oder nur Synthetische Kernnetze benutzt werden. Denn Stelle/Transition-Netze scheitern schon an der Aufgabe, vergangenheitsbezogene Informationen in Markenkopien anzusammeln. Die Kopien ihrer einen Basismarke sind wegen der fehlenden internen Markenstruktur dazu grundsätzlich nicht in der Lage. Daher können nur solche Koordinierungskonzepte modelliert werden, die ausschließlich auf die jeweils aktuelle Netzmarkierung Bezug nehmen. Dieselbe Netzmarkierung kann aber in der Vergangenheit durch *verschiedene* Schaltprozesse hervorgebracht worden sein. Daher fallen Koordinierungskonzepte im Rahmen von Stelle/Transition-Netzen in der Regel vergangenheitsblind aus. Allenfalls ließe sich darüber streiten, ob das Zählen der Schaltakte von Transitionen, wie es in Stelle/Transition-Netzen beim Koordinierungskonzept der Synchronieabstände geschieht, schon eine Berücksichtigung von Vergangheitsinformationen bedeutet. Wenn diese Ansicht vertreten wird, so bleibt diese Art des Vergangheitsbezugs zumindest sehr grob. (Daher wurde oben die Kritik ROUCAIROL's durch ein "fast" eingeschränkt.) Denn die Information über Schaltaktanzahlen läßt nicht erkennen, zu welchen vergangenen Schaltprozessen die betroffenen Transitionen gehört haben. Ebenso wenig sind die zurückliegenden Netzmarkierungen bekannt. Synthetische Kernnetze lassen dagegen aufgrund ihrer Attributmarken zu, kopieindividuelle Markengedächtnisse zu gestalten. Aber sie gestatten immer noch nicht, die oben verwendeten Entscheidungskriterien für die Koordinierung der Arbeitsgangeinlastungen zu modellieren. Denn ihnen fehlt die Repräsentationsfähigkeit für temporale Einflußgrößen wie Warte- oder Durchlaufzeiten.

60) Vgl. auch VALETTE (1979b), S. 157. Er hebt die lokale Eigenart von Synchronisationsmechanismen hervor, die im Rahmen des Petrinetz-Konzepts modelliert werden.

61) Die Möglichkeit, aus mehreren Schaltprozesse auszuwählen, beruht auf der oben gewürdigten Fähigkeit, Entscheidungsalternativen zu repräsentieren. Denn diese Alternativen werden durch konfliktionär aktivierte Transitionen dargestellt. Je nachdem, welche dieser Transitionen tatsächlich geschaltet wird, resultieren unterschiedliche Schaltprozesse.

62) Diese Auswahl von formalzielkonformen Schaltprozessen widerlegt die mitunter geäußerte Ansicht, Petrinetze eignen sich nicht, bei Entscheidungskonflikten das Fällen der konfliktauflösenden Entscheidungen zu modellieren. Diese Meinung vertritt z.B. LEINWAND (1980), S. 165. In ähnlicher Weise behaupten AGERWALA und CHOED-AMPHAI in AGERWALA (1978b), S. 309, die Auflösung von Entscheidungskonflikten sei in Petrinetzen vollkommen willkürlich ("completely arbitrary"). Auch die Modellierung von Entscheidungsalternativen, wie sie von WINAND und ROSENSTENGEL betrieben wird, weist in diese Richtung. Denn dort wird das Auflösen von Entscheidungskonflikten nicht innerhalb eines Netzmodells geleistet. Statt dessen erfolgt es netzexogen, indem die Markenverteilung des Netzmodells *von außen* verändert wird. Vgl. WINAND (1980), S. 1240 u. 1246.

Die hier bevorzugte Modellierung von Entscheidungsalternativen durch konfliktionär aktivierte Transitionen gestattet jedoch, die Auswahl der tatsächlich zu schaltenden Transitionen *innerhalb* des Petrinetz-Konzepts zu verwirklichen. Denn die Erreichbarkeitsgraphen sind ein immanenter Bestandteil des Petrinetz-Konzepts. Dies wurde ausführlicher dargelegt, als Erreichbarkeitsgraphen für die Explizierung von dynamischen Netzstrukturen eingeführt wurden. Der konzeptendogene Charakter von Erreichbarkeitsgraphen wurde noch weiter vertieft, als sie in spezielle Optimierungsnetze transformiert wurden, um die Ermittlung optimaler Schaltprozesse von solchen Netzen selbst ausführen zu lassen. Auf diese Weise geschieht eine wohlüberlegte, formalzielkonforme Auflösung aller Entscheidungskonflikte zwischen konfliktionär aktivierten Transitionen. Daher trifft die o.a. Willkürbehauptung von AGERWALA und CHOED-AMPHAI, die sich ebenso auf konfliktionär aktivierte Transitionen bezog, keineswegs zu.

Darüber hinaus umfaßt das Petrinetz-Konzept noch weitere Aspekte, welche die o.a. These widerlegen, die Modellierung von konfliktauslösenden Entscheidungen könne nicht geleistet werden. Erstens handelt es sich um die Möglichkeit, Entscheidungskonflikte zwischen mehreren konfliktionär aktivierten Transitionen durch statische oder dynamische Schaltprioritäten aufzulösen. Dies wurde in der Fallstudie exemplarisch verdeutlicht. Zweitens können die Schaltvorschriften von Transitionen um Produktionsregelkomplexe angereichert werden. Mit ihrer Hilfe läßt sich spezifizieren, wie Konflikte zwischen alternativen Schaltfarben für dieselbe Transition aufgelöst werden. Drittens existiert eine spezielle Netzklasse, die es erlaubt, in die Schaltvorschriften ihrer Transitionen transitionsspezifische Entscheidungsprozeduren aufzunehmen. Gemeint ist die Klasse der Auswertungsnetze. Sie fand in dieser Arbeit keine nähere Beachtung, weil ihre Entscheidungsprozeduren - in einer groben Annäherung - das Gleiche leisten wie die zuvor erwähnten Produktionsregelkomplexe. Viertens können Entscheidungskonflikte zwischen konfliktionär aktivierten Transitionen auf stochastische Weise aufgelöst werden. Aber auch diese Option wird hier nicht wahrgenommen, weil Vorbehalte gegenüber stochastischen Modellierungen bestehen.

63) Dies gilt auch für Formalziele, die auf schwer repräsentierbaren Objekteigenschaften beruhen. Dazu rechnet z.B. das Ziel, die Kapitalbindung im Umlaufvermögen zu reduzieren. Auf die Probleme, die Kapitalbindungszunahme in Werkstücken zu modellieren, die durch reinen Zeitablauf entsteht, wurde schon oben hingewiesen. Dennoch geschehen in einem Netzmodell stets wieder Schaltakte von Transitionen, die gestatten, das zeitablaufbedingte Anwachsen der Kapitalbindung nachträglich in diskontinuierlichen Abständen zu erfassen. Daher ist es auch möglich, auf diese Weise die Formalzielwirkungen von Objekteigenschaften zu erfassen, die bereits durch bloßen Zeitablauf variieren. Davon ausgenommen sind lediglich tote Netzmodelle, in denen überhaupt keine Transition schaltet. Dieser Sonderfall tritt jedoch bei der Modellierung realer Produktionssysteme kaum auf.

64) Die spezielle Fähigkeit, offene Modelle zu gestalten, wird von Beiträgen zum Petrinetz-Konzept nur selten gewürdigt. Zu den seltenen Ausnahmen gehören die Ausführungen von KRÄMER (1981), S. 461 u. 467.

65) Die nachfolgenden Ausführungen erstrecken sich daher nicht auf den Sonderfall von obligatorischen Transitionen.

66) Solche Konfliktauflösungen können z.B. durch Schaltprioritäten oder Optimierungsnetze vorgenommen werden.

67) Vgl. dazu die einfachen Netzkonstrukte mit Generator- und Absorbertransitionen. Markenkopien lassen sich ebenso erzeugen oder vernichten, indem sie "von außen" auf den Stellen eines Netzmodells abgelegt bzw. dort - wiederum "von außen" - abgezogen werden. Dieser Ansatz lag bereits der Repräsentation von Entscheidungsalternativen durch WINAND und ROSENSTENGEL zugrunde, der in einer früheren Anmerkung kritisiert wurde. Auf die Gestaltung der Schnittstellen von offenen Netzmodellen wird er bei KRÄMER (1981), S. 467, übertragen. Dort wird die Belegung ausgezeichneter Stellen mit Markenkopien modellexogen verändert, um Austauschprozesse zwischen dem Netzmodell und seinem Umsystem zu erfassen. Der Verf. lehnt diese Vorgehensweise jedoch ab, weil die exogene Veränderung von Netzmarkierungen dem Petrinetz-Konzept fundamental widerspricht. Denn alle Markierungsveränderungen sind bereits in konzeptendogener Weise durch die Transitionen und ihre Schaltregel(n) definiert. Daher bricht jede darüber hinausreichende, exogene Variation der Netzmarkierung mit der Charakteristik des Petrinetz-Konzepts, Markierungsveränderungen und Schaltakte von Transitionen ausschließlich aufeinander zu beziehen. Die oben angeführten Generator- und Absorbertransitionen erlauben dagegen, Mar-

kenkopien zu erzeugen bzw. zu vernichten, ohne dabei das Petrinetz-Konzept zu verlassen. Denn sie kommen mit solchen exogenen Modelleingriffen aus, die bereits innerhalb des Petrinetz-Konzepts erklärt sind: Es sind lediglich netzexogene Informationen darüber erforderlich, ob die aktivierten Generator- und Absorbertransitionen entweder geschaltet werden sollen oder aber nicht. Diese Informationen gehen über die stets benötigte Schaltinformation für die Auflösung von Permissivitätskonflikten nicht hinaus.

68) Vgl. dazu in der Fallstudie die Option, fertig bearbeitete Werkstücke entweder innerhalb des Produktionssystems einzulagern oder aber an sein Umsystem abzugeben.

69) Der Aspekt, durch besondere Transitionen (Meldungen über) externe Ereignisse in Netzmodellen berücksichtigen zu können, findet sich auch bei COURVOISIER (1977a), S. 167; COURVOISIER (1977b), S. 139.

70) Mit diesen Kombinationen sind nicht die Auswertungen von Netzmodellen gemeint, die *innerhalb* des Petrinetz-Konzepts definiert sind und ebenso automatengestützt erfolgen können. Sie wurden schon behandelt. Statt dessen interessieren hier jene Kombinationen, in denen Automatische Informationsverarbeitungssysteme auf Netzmodelle in einer Weise zugreifen, die *außerhalb* des Petrinetz-Konzepts erklärt ist. Ein Beispiel dafür stellen Expertensysteme dar, die auf Netzmodelle als Komponenten ihrer Wissensbasen zugreifen, um bei Produktionsstörungen nach Maßgabe des ATMS-Konzepts Anpassungsplanungen vorzunehmen.

9.2.2 Beurteilung der Modellierungsgüte

9.2.2.1 Überblick

Die Güte eines Modellierungskonzepts wird anhand von Kriterien beurteilt, die entweder ein vornehmlich theoretisches oder aber ein primär praktisches Beurteilungsinteresse widerspiegeln.

Die theoretisch orientierten Aspekte der Modellierungsgüte konzentrieren sich auf die anwendungsfernen Qualitäten eines Modellierungskonzepts. Zu diesem Zweck wird auf einen Determinantenkatalog zurückgegriffen, der in modelltheoretischen Argumentationszusammenhängen weitgehend unbestritten ist¹⁾. Dies gilt zumindest dann, wenn von Nuancierungen abgesehen wird. Sie bestehen vor allem in terminologischen Details und bei der Systematisierung des Kriterienkatalogs²⁾. Als theoretisch orientierte Determinanten der Modellierungsgüte werden im folgenden behandelt:

- Konsistenz,
- Eindeutigkeit,
- Formalisierung,
- Interpretierbarkeit,
- Operationalität,
- Realitätsadäquanz,
- Einfachheit,
- Einheitlichkeit,
- Vollständigkeit,
- Adaptivität,
- Integrationsqualität,
- Fruchtbarkeit.

Die praktisch ausgerichteten Determinanten der Modellierungsgüte beleuchten die anwendungsnahen Qualitäten eines Modellierungskonzepts³⁾. Dabei wird beurteilt, ob sich mit der Hilfe des Konzepts reale Probleme "praxisgerecht"⁴⁾ modellieren lassen⁵⁾. Die Determinanten einer praxisgerechten Modellierungsweise werden in zwei Dimensionen entfaltet. Sie erstrecken sich auf die Modellierungsphasen einerseits und auf den Modellierungsträger andererseits. Aus der Perspektive der Modellierungsphasen wird grob zwischen der Konstruktion und der Auswertung von Modellen unterschieden⁶⁾. Dieser Differenzierung entsprechen die beiden Beurteilungskriterien der Konstruktivität und der Analysierbarkeit. Aus dem Blickwinkel des Modellierungsträgers werden dagegen die "wesentlichen"⁷⁾ Kriterien beleuchtet, die seinen Entscheidungen über die Auswahl eines Modellierungskonzepts im allgemeinen zugrundeliegen⁸⁾. Es handelt sich dabei um die Effizienz und um die Benutzerfreundlichkeit der Konzeptanwendung. Hinzu kommt das Kriterium der Implementierbarkeit. Es wird zwar seltener beachtet. Aber für die Beurteilung Petrinetz-Konzepts erlangt es eine größere Bedeutung. Denn es vermag negative Resultate, die sich bei der Beurteilung von Effizienz und Benutzerfreundlichkeit einstellen werden, in ihrer Relevanz abzuschwächen.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Diese Determinantenkataloge bilden zumeist die Hauptbestandteile der Kriterienkataloge, die bereits in einer früheren Anmerkung mit entsprechenden Quellen belegt wurden.

2) Es liegt außerhalb des Erkenntnisinteresses dieser Arbeit, die Nuancierungen detailliert zu entfalten. Statt dessen wird nur auf einige verdeutlichende Beispiele kurz eingegangen. So werden Aspekte wie Interaktivität oder Standardisierung mitunter als eigenständige Beurteilungskriterien behandelt. Im nachfolgenden Kriterienkatalog erscheinen sie dagegen nicht, weil sie in dieser Arbeit nur als Subkriterien Verwendung finden. Sie werden daher erst später bei der Beurteilung der Implementierbarkeit bzw. Einheitlichkeit eines Modellierungskonzepts gewürdigt. Ebenso werden Exaktheit, Präzision und Klarheit nicht als eigenständige Beurteilungskriterien berücksichtigt. Denn sie werden durch das Kriterium der Formalisierbarkeit bereits abgedeckt. Die Kriterien stimmen zwar nicht inhaltlich vollkommen überein. Aber das stärkere Postulat der Formalisierbarkeit reicht aus, um die schwächeren Anforderungen nach Exaktheit, Präzision und Klarheit einzuschließen.

Zuweilen wird die Komplexität eines Modellierungskonzepts als Beurteilungskriterium sui generis thematisiert; vgl. THESEN (1976), S. 414; VIEFHUES (1982), S. 147. In dieser Ausarbeitung wird es jedoch nicht zur Konzeptbeurteilung herangezogen - auch nicht in der Gestalt eines Subkriteriums. Der Verf. konzidiert zwar, daß die Konzeptkomplexität durchaus gemessen werden kann. Dafür kommen z.B. in Betracht, wenn von Schwierigkeiten bei der Festlegung operationaler Maßstäbe abgesehen wird:

- die Anzahl der verschiedenartigen Konstrukte, die innerhalb eines Modellierungskonzepts definiert sind;
- das Ausmaß der Verschiedenartigkeit der Modellierungskonstrukte;
- die Ausmaß der Verknüpfungen, die zwischen den verschiedenartigen Konstrukten durch das Modellierungskonzept erklärt sind.

Aber die Konzeptkomplexität stellt keinen erstrebenswerten - und somit beurteilungsrelevanten - Selbstzweck dar. Vielmehr handelt es sich um eine Konzeptcharakteristik, die eng mit zwei eigenständigen Beurteilungskriterien verknüpft ist: Einerseits steigt die Konzeptkomplexität tendenziell an, wenn die Ausdrucksmächtigkeit eines Modellierungskonzepts erhöht wird. Andererseits führt eine anwachsende Konzeptkomplexität im allgemeinen dazu, daß die Auswertungseffizienz des Modellierungskonzepts sinkt. Auf beide Effekte wurde schon an früherer Stelle eingegangen. Die Ausdrucksmächtigkeit und die Auswertungseffizienz des Petrinetz-Konzepts wurden in dieser Arbeit schon ausführlich behandelt. Darüber hinaus sieht der Verf. keine nennenswerten Einsichten in Stärken und Schwächen des Petrinetz-Konzepts, die aus der Beurteilung seiner Komplexität gewonnen werden könnten. Daher verzichtet er darauf, neben Ausdrucksmächtigkeit und Auswertungseffizienz zusätzlich noch die Komplexität des Petrinetz-Konzepts zu berücksichtigen. Dadurch werden auch die erheblichen Operationalisierungsschwierigkeiten vermieden, die kurz zuvor für die Messung der Konzeptkomplexität nur angedeutet wurden. Am Rande wird darauf hingewiesen, daß sich die oben angeführten Quellen, die eine Beurteilung der Konzeptkomplexität allgemein empfehlen, bei der Komplexitätsmessung konkreter Modellierungskonzepte vornehm zurückhalten. Anscheinend konnte die Operationalisierungslücke, die zwischen dem allgemein gehaltenen Komplexitätskriterium und seiner konkreten Anwendung klafft, nicht geschlossen werden.

Anders liegen dagegen die Verhältnisse bei der Beurteilung der Implementierbarkeit des Petrinetz-Konzepts. Zwar steht auch die Implementierbarkeit in enger Beziehung zu zwei anderen Beurteilungskriterien: der Effizienz und der Benutzerfreundlichkeit. Insofern besteht eine Analogie zur Konzeptkomplexität. Doch die Analogie bleibt unzureichend für eine Gleichbehandlung beider Aspekte. Denn aus der gesonderten Beurteilung der Implementierbarkeit läßt sich eine Reihe von Erkenntnissen über die praktische Anwendungstauglichkeit des Petrinetz-Konzepts gewinnen. Sie würden ohne die spezielle Implementierungsperspektive, die sich auf den Einsatz Automatischer Informationsverarbeitungssysteme konzentriert, nicht so deutlich in Erscheinung treten.

Darüber hinaus werden weitere Beurteilungskriterien, die mitunter an formale Konzepte herangetragen werden, grundsätzlich nicht beachtet, wenn sie sich inhaltlich nicht auf Modellierungskonzepte beziehen lassen. Dies gilt z.B. für das Kriterium der Reliabilität, das zur Beurteilung statistischer Verfahren dient. Gleiches trifft auf das Kriterium der Robustheit zu. Es läßt sich zwar auf Koordinierungsmodelle und Prozeßkoordinierungen anwenden. Aber es erstreckt sich nicht mehr auf die Modellierungskonzepte, mit deren Hilfe Koordinierungsmodelle und modellgestützte Prozeßkoordinierungen gestaltet werden.

Schließlich bleiben alle Beurteilungskriterien ausgeklammert, die unmittelbar auf ästhetische Qualitäten Bezug nehmen. Vgl. dazu die Präferenz für systematische Eleganz bei STEGMÜLLER (1970a), S. 373; RESCHER (1985a), S. 97; STEGMÜLLER (1986a), S. 261. Vgl. ebenso das Kriterium der "Schönheit" bei STEGMÜLLER (1970a), S. 373; POPPER (1972a), S. 35; THIEL, C. (1972), S. 163ff. u. 172f. Der Verf. stellt keineswegs in Abrede, daß ästhetisierende Argumente die persönliche Einstellung gegenüber einem Modellierungskonzept beeinflussen können. Aber die intersubjektive Verallgemeinerung solcher Argumente bereitet derart gravierende Schwierigkeiten, daß sie in dieser Arbeit bei der Konzeptbeurteilung keine Beachtung finden. Andere Verhältnisse liegen dagegen vor, wenn die verschwommenen Vorstellungen über konzeptionelle Ästhetik anhand von wohlbestimmten Kriterien präzisiert werden. Beispielsweise lassen sich die Forderungen nach Einfachheit und Einheitlichkeit als Konkretisierungen einer ästhetisch anmutenden Konzepterscheinung auffassen. Derart konkretisierte Facetten einer Konzeptästhetik werden auch in dieser Arbeit als Determinanten der Modellierungsgüte berücksichtigt. Allerdings werden sie als Beurtei-

lungskriterien *sui generis* behandelt, die keiner Rechtfertigung durch übergeordnete - ästhetisierende - Argumente bedürfen.

3) Die Beurteilung der Modellierungsgüte aus praktischer Sicht wird hier als eine "Residualbeurteilung" aufgefaßt. Sie erstreckt sich nur auf jene Beurteilungsaspekte, die für die Modellierungspraxis von Interesse sind *und* noch nicht in der voranstehenden Auflistung als theoretisch orientierte Aspekte erfaßt wurden. Dabei wird eingeräumt, daß oftmals keine eindeutige Abgrenzung zwischen der theoretischen und der praktischen Ausrichtung von Beurteilungskriterien möglich ist. Vielmehr besitzen mehrere Kriterien sowohl praktische als auch theoretische Relevanz. Bei solchen Überschneidungen hat sich der Verf. von seiner subjektiven Einschätzung leiten lassen, ob die betroffenen Kriterien bei produktionswirtschaftlichen Modellierungen eher aus theoretischem Erkenntnisinteresse oder aber vornehmlich aus praktischem Problemlösungsinteresse angewendet werden. Es wird darauf verzichtet, diese Abwägungen für alle Beurteilungskriterien der Modellierungsgüte dazulegen. Statt dessen beschränkt sich der Verf. auf drei verdeutlichende Beispiele.

Die Effizienz der Konzeptanwendung kann sowohl aus theoretischer als auch aus praktischer Perspektive untersucht werden. Die theoretische Beurteilungsposition wird im Rahmen der Komplexitätstheorie eingenommen. Aus praktischer Sicht wird aber ebenso darüber geurteilt, ob sich ein Modellierungskonzept entweder "hinreichend effizient" anwenden läßt oder ob es als "zu aufwendig" verworfen wird. Komplexitätstheoretische Analysen sind in produktionswirtschaftlichen Modellierungsprojekten nur selten anzutreffen. Dagegen spielen praktische Effizienzbetrachtungen bei Entscheidungen über die tatsächliche Anwendung eines Modellierungskonzepts oftmals eine herausragende Rolle. Daher wird das Effizienzkriterium zu den praktisch orientierten Beurteilungskriterien gerechnet. Umgekehrte Verhältnisse liegen hinsichtlich der Modellierungsnatürlichkeit vor. Zwar wird nicht in Abrede gestellt, daß die Natürlichkeit eines Modellierungskonzepts Modellierungsträger dazu veranlassen kann, das Konzept bei ihrer praktischen Arbeit zu bevorzugen. Aber dieses Motiv wird in der Modellierungspraxis kaum diskutiert. Demgegenüber findet es in theoretischen Argumentationszusammenhängen häufig Beachtung. Daher wurde das Kriterium der Natürlichkeit in die Gruppe der theoretisch orientierten Beurteilungskriterien eingereiht. Ähnliche Verhältnisse liegen beim Kriterium der Adaptivität vor. Die Benutzerfreundlichkeit eines Modellierungskonzepts kann dadurch gefördert werden, daß flexible Anpassungen an Modellierungswünsche der Konzeptanwender möglich sind. Wiederum wird aber die konzeptionelle Adaptivität vornehmlich in theoretischen Arbeiten erörtert. Daher wird sie auch hier zu den theoretischen Beurteilungskriterien gerechnet.

4) Es ließe sich darüber streiten, welche Anforderungen an ein "praxisgerechtes" Modellierungskonzept zu stellen sind. Dies wäre jedoch müßig. Denn die hier betrachteten fünf Beurteilungskriterien erfüllen eine Demarkationsfunktion. Ihre Argumentationsqualität wurde bereits an früherer Stelle gewürdigt.

5) Ähnliche Anforderungen erstrecken sich auf die Praktikabilität, die Anwendbarkeit oder die Durchführbarkeit von Konzepten; vgl. z.B. ZENTES (1976), S. 36f. (Praktikabilität); PFOHL (1977), S. 276 (Durchführbarkeit); OELLERS (1981), S. 194 (Anwendbarkeit).

6) Vgl. dazu die zugrundeliegende, feinere Differenzierung von Modellierungsphasen, die anläßlich der modelltheoretischen Rahmenlegung vorgestellt wurde.

7) Auf die Demarkationsfunktion des Attributs "wesentlich" und ähnlicher Wendungen wurde schon mehrfach hingewiesen. Daher wäre die Anforderung, eine "Rechtfertigung" der ausgewählten Interessen des Modellierungsträgers zu verlangen, ihrer Intention nach verfehlt.

8) Effizienz und Benutzerfreundlichkeit tauchen in nahezu allen Kriterienkatalogen auf, die sich mit der Beurteilung von Konzepten im weitesten Sinne befassen.

9.2.2.2 Praktisch orientierte Gütedeterminanten

9.2.2.2.1 Modellierungsphasen

9.2.2.2.1.1 Modellkonstruktion

Unter der Konstruktivität¹⁾ eines Modellierungskonzepts wird das Ausmaß verstanden, in dem es die systematische²⁾ Konstruktion von Modellen durch Entwurfshilfen im weitesten Sinne³⁾ unterstützt. Die Konzeptkonstruktivität kann auch als synthetische Dimension der Modellierungsgüte angesprochen werden. Des öfteren wird die konstruktive oder synthetische Qualität des Petri-netz-Konzepts positiv gewürdigt⁴⁾. In der Regel wird aber nicht erwähnt, worin die Unterstützungsleistungen beim Modellentwurf konkret bestehen sollen⁵⁾. Dies überrascht auch nicht. Denn bisher liegen nur einige wenige, hinsichtlich ihrer Praktikabilität noch vollkommen unzureichende Anleitungen für den systematischen Aufbau von Netzmodellen vor⁶⁾. Dazu gehören vor allem zwei Ansätze⁷⁾.

Das erste Konstruktionskonzept bezieht sich auf die Vorgabe, Netzmodelle mit garantierten Modelleigenschaften zu konstruieren⁸⁾. Es wird von einfachen Netzbausteinen ausgegangen, welche die erwünschten Eigenschaften bereits aufweisen. Hinzu kommen Konstruktionsregeln, die vorschreiben, wie aus den einfachen Netzbausteinen komplexere Netzmodelle aufgebaut werden dürfen. Dabei sind die Konstruktionsregeln so ausgelegt, daß sie die Wahrung der vorgegebenen Netzeigenschaften sicherstellen. Aber dieses Konstruktionskonzept läßt sich leider bisher nur auf die ausdrucksarmen Stelle/Transition-Netze anwenden. Darüber hinaus erweist sich das Spektrum der angebotenen Netzbausteine zusammen mit den Konstruktionsregeln als überaus restriktiv. Daher reichen sie bei weitem nicht aus, diejenigen Modellierungsaufgaben zu überdecken, die von der hier thematisierten Prozeßkoordination in komplexen Produktionssystemen gestellt werden⁹⁾.

Der zweite konstruktive Ansatz greift auf Netzmorphismen zurück¹⁰⁾. Sie wurden bereits anlässlich des Vergleichs zwischen Netzplantechnik und Petri-netz-Konzept angesprochen. Sie zeichnen sich dadurch aus, daß sie bei Netzverfeinerungen oder -vergrößerungen die Invarianz von bestimmten, jeweils morphismusspezifischen Netzeigenschaften garantieren¹¹⁾. Daher ließe sich vorstellen, zunächst von einfachen, übersichtlichen Grobnetzen auszugehen. Sie werden so lange untersucht und überarbeitet, bis sie gewünschte Modelleigenschaften erfüllen¹²⁾. Danach werden die Grobnetze schrittweise verfeinert. Bei jeder Verfeinerung werden nur solche Konstruktionen zugelassen, die sich als Anwendungen vorgegebener Netzmorphismen darstellen lassen¹³⁾. Dann ist per constructionem sichergestellt, daß die intendierten Modelleigenschaften weiterhin erfüllt werden. Doch auch die Netzmorphismen bleiben auf Stelle/Transition-Netze beschränkt, die engen topologischen Einschränkungen unterworfen sind. Deshalb eignen sich Netzmorphismen ebensowenig für die hier interessierende Aufgabe, komplizierte Produktionsprozesse und deren Koordination zu modellieren.

Für Stelle/Transition-Netze existieren also durchaus Anleitungen, die eine systematische Modellkonstruktion unterstützen. Aber ihre Anwendungsbedingungen sind so restriktiv ausgelegt, daß noch nicht einmal das - ohnehin dürftige - Ausdrucksvermögen von Stelle/Transition-Netzen ausgeschöpft werden kann. Daher kommt dieser Netzklasse nur eine geringe Konstruktivität zu.

Noch schlechter scheinen die beiden Varianten Synthetischer Netze abzuschneiden. Denn die Netzmorphismen, die bislang bekannt geworden sind, können auf Synthetische Netze überhaupt nicht angewandt werden. Gleiches gilt für die Konstruktionsregeln, welche die Konservierung von Netzeigenschaften bei der Kombination von Netzbausteinen garantieren. Aber dieser erste Eindruck trügt. Denn bei der Entfaltung des Konzepts Synthetischer Netze wurde besonde-

rer Wert darauf gelegt, Anregungen für die systematische Konstruktion von Netzmodellen zu unterbreiten. Zu diesen Entwurfshilfen gehören vor allem¹⁴⁾:

- ❑ die Transformation deklarativer Objektmodelle, die prädikatenlogische Formelsysteme in Klauselform darstellen, in entsprechende deklarative Netzmodelle;
- ❑ die Transformation operationaler Objektmodelle, die aus Produktionsregeln und Fakten aufgebaut sind, in entsprechende operationale Netzmodelle;
- ❑ die horizontale Verknüpfung von Netzmodulen durch gemeinsame Synchronisationsstellen¹⁵⁾, über die Kopien von Informationsmarken zwecks wechselseitiger Koordinierung der Modulverhaltensweisen ausgetauscht werden;
- ❑ die vertikale Verfeinerung von Makroknoten durch Subnetze und zugehörige Verfeinerungsregeln¹⁶⁾;
- ❑ die vertikale Netzvergrößerung von Teilnetzen durch Makroknoten, die aus inversen Anwendungen der vorgenannten Netzverfeinerungen hervorgeht;
- ❑ ein "Baukasten" aus Netzmodulen¹⁷⁾ für die Modellierung der Auftragsabwicklung in Flexiblen Fertigungssystemen.

Vor diesem Hintergrund wird die Konstruktivität Synthetischer Netze als "mittelmäßig" eingestuft¹⁸⁾. Sie übertrifft zwar durchaus die Unterstützungsleistungen mancher Alternativkonzepte. Dazu gehören insbesondere OR-Programme¹⁹⁾. Aber es existieren auch andere Modellierungskonzepte, deren Entwurfshilfen bei weitem nicht erreicht werden. Dies trifft z.B. auf die Netzplantechnik zu, die Standardnetzpläne anzubieten vermag. Ebenso kann auf das GRAI-Konzept²⁰⁾ verwiesen werden, das speziell auf die Modellierung von Produktionssystemen zugeschnitten ist. Es unterstützt solche Modellierungen durch ein systematisches Raster für die modulare Konstruktion von Produktionsmodellen²¹⁾. Dieses Raster bietet eine klare Hilfestellung bei der Frage, *wie* ein Gesamtmodell in einzelne Module aufgespalten werden soll. Synthetische Netze bleiben dagegen eine solche Segmentierungshilfe schuldig²²⁾.

Allerdings muß bei dieser relativen Beurteilung Synthetischer Netze berücksichtigt werden, daß ihrem Zurückbleiben hinter Standardnetzplänen und GRAI-Konzept andere Vorteile der netzgestützten Modellkonstruktion gegenüberstehen²³⁾. Dazu gehören im Vergleich zur Netzplantechnik vor allem die wesentlich ausgereifteren Möglichkeiten, hierarchisch verfeinerte Modelle zu konstruieren. Dies gilt insbesondere auch im Hinblick auf die "flachen" Standardnetzpläne. Gegenüber dem GRAI-Konzept zeichnet sich die Modellkonstruktion durch Synthetische Netze hingegen durch ihre formalsprachliche Konkretisierung aus. Das GRAI-Konzept bleibt auf einem hohen und unverbindlichen Abstraktionsniveau stehen, weil sein Modulraster nur auf natürlichsprachliche Weise systematisiert wird²⁴⁾. Darüber hinaus kann der fehlenden Segmentierungshilfe von Synthetischen Netzen auch eine positive Seite abgewonnen werden: Die konstruktive Freiheit des Modellierungsträgers wird durch kein vorgegebenes Modulraster eingeschränkt.

Des öfteren wird die allgemeine Beurteilung der Konstruktivität eines Modellierungskonzepts auf das Subkriterium der Modularität²⁵⁾ fokussiert. Diese spezielle Perspektive beruht auf der heuristischen Erkenntnis, daß sich die Modellierung eines komplexen Objekts²⁶⁾ zumeist leichter bewältigen läßt, wenn das Gesamtobjekt zunächst in einfachere, jeweils in sich abgeschlossene²⁷⁾ Teilobjekte zerlegt²⁸⁾ worden ist²⁹⁾. Die Teilmodelle, die aus der Modellierung der Teilobjekte hervorgehen, stellen dann die Module eines modularen Modellentwurfs dar³⁰⁾.

Beiträge des Petrinetz-Konzepts zur modularen Modellierung³¹⁾ wurden schon im Zusammenhang mit seiner Konstruktivität erwähnt. Dort interessierte aber der allgemeine Aspekt, die systematische Konstruktion von Netzmodellen zu unterstützen. Statt dessen rückt jetzt die Frage-

stellung in den Vordergrund, in welchem Ausmaß die Modularität von Netzmodellen gefördert wird. Zunächst ist keine der drei Netzklassen von sich aus in modularer Weise konzipiert³²⁾.

Aber die Möglichkeit, komplexe Netzmodelle aus einfachen Netzbausteinen sukzessiv aufzubauen³³⁾, trägt einen grundsätzlich modularen Charakter³⁴⁾. Er kommt sowohl Stelle/Transition-Netzen als auch den beiden Varianten Synthetischer Netze zu. Für Stelle/Transition-Netze wurde bereits der Konstruktionsansatz vorgestellt, aus vordefinierten Netzbausteinen und Konstruktionsregeln umfassendere Netze mit garantierten Netzeigenschaften zu komponieren³⁵⁾. Für Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze liegt ein "Baukasten" aus Netzmodulen zur Konstruktion von Koordinierungsmodellen vor. Die Qualitäten der beiden modularen Bausteinkonzepte fallen allerdings deutlich auseinander.

Die Verwendung von Netzbausteinen in Stelle/Transition-Netzen bleibt nicht nur auf die geringe allgemeine Modellierungsfähigkeit dieser Netzklasse beschränkt. Hinzu kommen auch die erheblichen Restriktionen, denen die vordefinierten Netzbausteine und die Konstruktionsregeln für das Zusammenfügen der Netzbausteine unterliegen. Auf beides wurde schon oben eingegangen. Daher lassen sich auf diese Weise nur relativ einfache Realprobleme modellieren. Für die Thematik dieser Arbeit, die Prozeßkoordinierung in komplexen Produktionssystemen, reicht das noch nicht aus, um modulare Koordinierungsmodelle zu konstruieren. Darüber hinaus leidet das Bausteinkonzept für Stelle/Transition-Netze unter dem Nachteil, daß die Konstruktionsregeln für die Bausteinverknüpfung nur an dem einen Zweck ausgerichtet sind, die Erhaltung bestimmter Netzeigenschaften zu garantieren. Diese Zwecksetzung nimmt keinen Bezug auf die Art der Bausteinverknüpfung, die durch die Art der vorangehenden Objektsegmentierung nahegelegt sein kann³⁶⁾. Aufgrund der voranstehend aufgezeigten Mängel trägt das Bausteinkonzept mit garantierten Netzeigenschaften nur in bescheidenem Ausmaß zur Konstruktion modularer Netzmodelle bei.

Entgegengesetzte Verhältnisse liegen bei der Verwendung von Synthetischen Netzen³⁷⁾ vor. Mit ihrer Hilfe wurde bereits ein modulares Konzept für die Konstruktion von Koordinierungsmodellen vorgelegt³⁸⁾. Die Ausdruckskraft Synthetischer Netze reichte aus, um die Modellierungsbedürfnisse bei der Planung und Steuerung von Produktionsprozessen in Flexiblen Fertigungssystemen zu erfüllen. Dies wurde anhand einer Fallstudie belegt. Dabei wurde auf eine Art der Modulverknüpfung geachtet, die nicht auf "technische" Zwecksetzungen des Petrinetz-Konzepts fixiert ist. Vielmehr lehnen sich die Modulverbindungen an zwei Gestaltungskonzepte an, die im Bereich modularer Systementwürfe breite Beachtung genießen. Dies gilt sowohl in betriebswirtschaftlicher Hinsicht als auch aus dem Blickwinkel der Informatik.

Die Modulverknüpfung beruht erstens auf dem datenorientierten Ansatz³⁹⁾. Denn die Modulverhaltensweisen werden aufeinander abgestimmt, indem Kopien von Informationsmarken zwischen den Modulen über ihre gemeinsamen Synchronisationsstellen ausgetauscht werden⁴⁰⁾. Diese Informationsmarkenkopien stimmen inhaltlich mit den "Daten" des vorgenannten Gestaltungskonzepts überein. Zugleich entsprechen sie aber auch den "Nachrichten", die der wechselseitigen Koordinierung von teilautonomen Agenten in Multiagentensystemen dienen. Damit ist der zweite Gestaltungsansatz angesprochen. Er betrifft die dezentrale Koordinierung modularer Systeme durch die wechselseitige, nachrichtenvermittelte Abstimmung der Verhaltensweisen ihrer Subsysteme⁴¹⁾. Darüber hinaus werden die daten- und die nachrichtenorientierte Modulverknüpfung noch in einer sachlichen Dimension bereichert. Denn die Koordinierung der Netzmodule erfolgt nicht ausschließlich mit der Hilfe von Informationsmarkenkopien. Hinzu kommen noch Markenkopien, die Ressourceneinheiten repräsentieren. Ihr Austausch wurde in der Fallstudie ebenso benutzt, um die Verhaltensweisen von Netzmodulen untereinander zu koordinieren. Dabei dienten vor allem⁴²⁾ die Kopien der Werkstückmarke dazu, durch ihren Fluß die Netzmodule der Bearbeitungs- und Lagerstationen sowie das Netzmodul für das Transportsystem miteinander zu verknüpfen⁴³⁾. Die Attributausprägungen der Werkstückmarkenkopien sorgten für ein Zusammenwirken der Verhaltensweisen von Bearbeitungsstationen, Transportmitteln und

Lagerstationen, das in seiner Gesamtheit die Abwicklung des zugrundeliegenden Produktionsauftrags gewährleistet.

Synthetische Netze erschließen daher eine modulare Modellkonstruktion, die sich im wesentlichen durch zwei Aspekte auszeichnet. Einerseits können hinreichend ausdrucksmächtige Netzmodule gestaltet werden⁴⁴⁾. Andererseits wird eine informatorisch und sachlich wohl-fundierte Modulverknüpfung angeboten⁴⁵⁾.

Darüber hinaus zeichnet sich die Konstruktion modularer Netzmodelle noch durch eine weitere Besonderheit aus. Sie spielt aber aus der hier zugrundegelegten produktionswirtschaftlichen Beurteilungsperspektive nur eine untergeordnete Rolle. Daher wird sie nur kurz gestreift. Es handelt sich um die charakteristische Lokalität des Petrinetz-Konzepts⁴⁶⁾. Sie korrespondiert vorzüglich mit der lokalen Charakteristik von modularen Modellentwürfen. Die Lokalität eines Moduls resultiert aus dessen Eigenart, ein in sich abgeschlossenes Teilobjekt zu modellieren. Die Lokalität von Petrinetzen äußert sich vornehmlich in der Operationsweise ihrer Schaltregeln. Denn die Aktivierungen und die Schaltakte von Transitionen nehmen nur auf die unmittelbaren Nachbarschaften der Transitionen Bezug. Neben dieser allgemeinen Lokalität, die auch auf Stelle/Transition-Netze zutrifft, zeichnen sich Synthetische Netze durch eine besondere Ausformung der Schaltlokalität aus. Sie erstreckt sich auf die Variablen, die in Kantengewichten und Schaltvorschriften enthalten sein können. Diese Variablen sind nicht - wie es z.B. bei OR-Programmen der Fall ist - in globaler Weise definiert. Vielmehr gelten die Variablenbindungen stets nur in der lokalen Umgebung der jeweils betroffenen Transition. Infolgedessen bleiben alle Variablenbindungen auch auf die Transitionen beschränkt, die zu einem gemeinsamen Netzmodul gehören⁴⁷⁾. Die Limitierung der Variablenreichweite auf dasjenige Modul, an dessen Gestaltung die Variable teilnimmt, erfährt beim Entwurf von modularen Informationsverarbeitungssystemen große Beachtung⁴⁸⁾. Aufgrund seiner primär informationstechnischen Ausrichtung wird dieser Aspekt hier aber nicht weiter vertieft.

Neben der Modularität wird als zweites Subkriterium der Konstruktivität oftmals auch das Konstruktionsprinzip der hierarchischen Modellverfeinerung⁴⁹⁾ hervorgehoben⁵⁰⁾. Es wird allgemein die Überzeugung geteilt, daß die Konstruktion hierarchisch verfeinerter Modelle eine weitere Stärke des Petrinetz-Konzepts darstellt⁵¹⁾. Dieses generelle Urteil läßt sich im Hinblick auf die hier untersuchten drei Netzklassen⁵²⁾ bestätigen. Allerdings bedarf es einer differenzierteren Betrachtungsweise. Denn ein Modellierungskonzept bleibt so lange unbefriedigend, wie es zwar hierarchische Modellverfeinerungen zuläßt, hierbei aber keine Anleitungen für eine systematische Vorgehensweise bereitstellt. Solche Konstruktionsrichtlinien werden in der Netzliteratur aber kaum⁵³⁾ diskutiert⁵⁴⁾.

Stelle/Transition-Netze bieten als Hilfestellung für hierarchische Modellverfeinerungen nur das Konzept der Netzmorphismen an⁵⁵⁾. Seine Eignung für Netzverfeinerungen wurde schon oben erwähnt⁵⁶⁾. Zugleich wurde aber auch die eingeschränkte Anwendbarkeit von Netz-morphismen festgestellt. Daher leisten Stelle/Transition-Netze nur einen bescheidenen Beitrag zur hierarchischen Modellverfeinerung.

Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze unterstützen dagegen die Konstruktion hierarchisch verfeinerter Modelle auf vorzügliche Weise. Zu diesem Zweck stehen mehrere verschiedenartige Verfeinerungsansätze zur Verfügung. Die Verfeinerungsarten lassen sich einerseits hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Informationsgehalt von Netzmodellen unterscheiden. Aus dieser Perspektive stehen informationsvermehrende und informationstransformierende Netzverfeinerungen einander gegenüber⁵⁷⁾. Andererseits können die Verfeinerungsarten nach Maßgabe derjenigen Netzkomponenten differenziert werden, die von den Verfeinerungsoperationen in der Hauptsache betroffen sind. Wenn dieser Blickwinkel eingenommen wird, kann im wesentlichen zwischen marken- und knotenbezogenen Verfeinerungen ausgewählt werden⁵⁸⁾.

Bei einer informationsvermehrenden Verfeinerung repräsentiert das verfeinerte Netzmodell Aspekte des modellierten Realitätsausschnitts, die im vorangehenden Grobmodell überhaupt noch nicht enthalten waren. Eine solche Informationsvermehrung geschieht z.B., wenn ein Objekt nicht mehr durch eine Kopie der Basismarke, sondern durch die Kopie einer Attributmarke repräsentiert wird. In diesem Fall wächst der Informationsgehalt des Netzmodells, der im Grobmodell auf Informationen über die Objektexistenz beschränkt war, auf Informationen über Objektexistenz *und* über interessante Objekteigenschaften an. Der Informationsgehalt einer objektrepräsentierenden Attributmarke kann noch weiter gesteigert werden, indem ein Markenattribut auf hierarchische Weise in mehrere präzisierende Subattribute aufgespalten wird⁵⁹⁾. Dabei wird auf die Gestaltungsfreiheit Synthetischer Netze zurückgegriffen, von Attributmarken mit flachen Attributstrukturen zu solchen mit tiefen Attributstrukturen überzugehen.

Anstelle der beiden vorgenannten markenbezogenen Netzverfeinerungen läßt sich der Informationsgehalt eines Netzmodells aber auch in knotenbezogener Weise vergrößern. Dabei müssen präzise bestimmte Verfeinerungsanforderungen erfüllt werden⁶⁰⁾. Sie erstrecken sich insbesondere⁶¹⁾ darauf, daß ein stellen- oder transitionsartiger Makroknoten des Grobnetzes im Feinnetz stets nur durch ein Subnetz ersetzt werden darf, dessen Rand ausschließlich aus transitions- bzw. stellenartigen Mikroknotten besteht. Auf diese Weise wird gewährleistet, daß das Subnetz an seinem Netzrand dieselbe topologische Qualität wie der substituierte Makroknoten besitzt. Beispielsweise kann das Schaltverhalten einer Transition, das in einem Grobnetz noch nicht präzise festgelegt war, durch das Schaltverhalten des zugehörigen transitionenberandeten Subnetzes in einem Feinnetz konkretisiert werden. Von dieser Möglichkeit wurde bei der Netzrepräsentation eines Algorithmus für die Konstruktion von Erreichbarkeitsgraphen ausführlich Gebrauch gemacht⁶²⁾. Ebenso lag sie vielfachen Netzverfeinerungen zugrunde, die im Rahmen der Fallstudie erfolgten. Darüber hinaus bereitet es keine Schwierigkeiten, die marken- und die knotenbezogene Anreicherung des Informationsgehalts eines Netzmodells miteinander zu kombinieren.

Informationstransformierende Verfeinerungen von Synthetischen Netzen erfolgen hingegen in der Regel⁶³⁾ nur in knotenbezogener Weise. Dabei wird wiederum (mindestens) ein Knoten eines Grobnetzes durch ein entsprechend berandetes Subnetz verfeinert. Allerdings wird jetzt der Knoten des Grobnetzes als ein Makroknoten mit einer komplexen inneren Struktur aufgefaßt. Das wechselseitige Verhältnis zwischen dem Makroknoten im Grobnetz einerseits und seinem Subnetz im Feinnetz andererseits ist dadurch festgelegt, daß sich das Subnetz an seinem Netzrand im Feinnetz genau so verhält wie der Makroknoten im Grobnetz⁶⁴⁾. Daher besitzen der Makroknoten und sein Subnetz für das jeweils umgebende Restgrob- bzw. Restfeinnetz den gleichen Informationsgehalt. Der wesentliche Unterschied zwischen dem Makroknoten und seinem Subnetz besteht darin, daß die makroknoten- bzw. subnetzbezogene Verhaltensinformation auf unterschiedliche Weise ausgedrückt wird. Im Grobnetz wird die intendierte Verhaltensweise des Makroknotens durch eine semi-formale oder natürlichsprachliche Knotenanschrift verdeutlicht. Diese Knotenanschrift ist in der rein formalen Definition des Grobnetzes nicht enthalten. Im Feinnetz wird dagegen das Verhalten des Subnetzes, das an seinem Rand mit der Verhaltensweise des Makroknotens übereinstimmt, vollständig mit den Ausdrucksmitteln der formalen Netzdefinition festgelegt. Daher erfolgt bei der Verfeinerung des Makroknotens durch sein Subnetz eine Transformation von Informationsinhalten, die zunächst in semi-formaler oder natürlichsprachlicher Weise ausgedrückt waren, in eine formale Darstellungsform.

Solche informationstransformierenden Netzverfeinerungen wurden in dieser Arbeit z.B. verwendet, um die Verknüpfungslogik von Transitionen um ad- und disjunktive Varianten zu bereichern. Dabei wurde das Schaltverhalten einer Makrotransition, deren Ein- oder Ausgangskanten in ad- oder disjunktiver Weise miteinander verknüpft sind, in der Netzgraphik des betroffenen Grobnetzes durch ein verknüpfungsspezifisches, semi-formales Graphiksymbol angezeigt. Diese semi-formale Darstellungsweise wurde auch in der späteren Fallstudie benutzt. Die verfeinernden Subnetze, die für Makrotransitionen mit ad- oder disjunktiver Ein- oder Ausgangslogik

eingeführt wurden, kamen hingegen vollständig mit den formalen Ausdrucksmitteln von Synthetischen Netzen aus.

Bei der praktischen Gestaltung von hierarchisch verfeinerten Netzmodellen stehen die informationsvermehrnde oder -transformierende Verfeinerung von Makroknoten durch Subnetze im Vordergrund⁶⁵). Dies belegen die vielfältigen Makroknotenverfeinerungen, die bei der Netzrepräsentation eines Konstruktionsalgorithmus für Erreichbarkeitsgraphen und im Rahmen der Fallstudie erfolgten. Die markenbezogene Verfeinerungsvariante spielt dagegen in der Modellierungspraxis nur eine untergeordnete Rolle.

Aus theoretischer Perspektive lassen sich dagegen die Verfeinerungsmöglichkeiten, die für ein Netzmodell bei der Verwendung von Synthetischen Netzen offenstehen, im wesentlichen⁶⁶) durch drei Aspekte charakterisieren: die Fundiertheit, die Reichweitenvariabilität und die Homogenität der Modellverfeinerungen.

Die Verfeinerung eines Makroknotens geschieht stets in wohlfundierter Weise. Denn das Subnetz, das einen Makroknoten substituiert, muß speziellen Verfeinerungsanforderungen genügen. Darauf wurde schon kurz zuvor eingegangen. Die Anforderungen stellen z.B. sicher, daß das Subnetz an seinem Netzrand dieselbe topologische Qualität wie der substituierte Makroknoten besitzt. Daher ist es möglich, den Netzrand des Subnetzes auf der unteren Hierarchieebene mit dem Makroknoten aus der oberen Hierarchieebene zu identifizieren. Dadurch wird ein präzise definierter vertikaler Zusammenhang zwischen den Ebenen der Verfeinerungshierarchie konstituiert⁶⁷).

Die Verfeinerungen dürfen sich im Prinzip über beliebig viele Hierarchiestufen hinweg erstrecken⁶⁸). Daher kann der Modellierungsträger das Ausmaß, in dem er ein Modellierungsobjekt auf verschiedenen Hierarchieebenen mit unterschiedlichen Abstraktions- oder Detaillierungsniveaus⁶⁹) repräsentieren möchte, frei bestimmen⁷⁰). Aufgrund dieser Wahlfreiheit läßt sich die Spannweite, in der Abstraktions- oder Detaillierungsniveaus insgesamt überdeckt werden⁷¹), beliebig festlegen. Gleiches gilt für die Feinheit der Niveauabstufungen, die hierbei erzielt wird.

Auf allen Hierarchieebenen wird das gleiche formale Modellierungskonzept benutzt. Daher liegt trotz der unterschiedlichen Abstraktions- oder Detaillierungsniveaus ein homogenes Gesamtmodell vor⁷²). Infolgedessen kann der Modellierungsträger zwischen den Hierarchieebenen wechseln, ohne dabei der Gefahr von Konzeptionsbrüchen ausgesetzt zu sein⁷³).

Darüber hinaus kann die hierarchische Modellverfeinerung an der Hierarchiespitze durch das Vorschalten von Kanal/Instanz-Netzen ergänzt werden⁷⁴). Sie unterstützen vor allem erste grobe Annäherungen an ein Modellierungsobjekt, die sich vornehmlich auf natürlichsprachliche Umschreibungen und graphische Visualisierungen beschränken. Kanal/Instanz-Netze lassen sich ihrerseits hierarchisch verfeinern. Auf diese Weise ist es möglich, zunächst verschiedene Stufen von in- oder semi-formalen Kanal/Instanz-Netzmodellen zu durchlaufen, bevor zu durchgängig formalisierten Synthetischen Netzmodellen übergegangen wird⁷⁵). Allerdings gehen bei der Verwendung von Kanal/Instanz-Netzen und beim Übergang von dieser Netzklasse zur Klasse der Synthetischen Netze zwei der o.a. Verfeinerungscharakteristika verloren: Weder die wohlfundierte Verfeinerungsweise noch die Homogenität der formalen Modellkonstruktion auf allen Hierarchiestufen bleiben erhalten⁷⁶).

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Die Forderung nach Konstruktivität wurde anhand verschiedener Varianten von "konstruktivistischen" Positionen erläutert. Allerdings wurde dort der konstruktivistische Ansatz aus allgemeiner epistemischer Perspektive wiedergegeben. Die hier interessierende spezielle Blickwinkel der Modellgestaltung findet dagegen nur selten Beachtung. Zu den wenigen Ausnahmen zählt z.B. MEKLY (1980), S. 423.

2) Wesentlich ist, daß die Modellkonstruktion nicht "irgendwie", sondern auf systematische Weise erfolgen soll. Die Systematik der Konstruktionsweise wird durch die jeweils eingesetzten Entwurfshilfen festgelegt. Zuweilen wird der Aspekt der Systematizität auch als "Strukturiertheit" angesprochen; vgl. z.B. ULLRICH (1976), S. 0.2. In ähnlicher Weise fordert BRETZKE (1980), S. 238, Anleitungen, die einen Modellierungsträger bei der bewußten Problemstrukturierung unterstützen. Vgl. auch den Hinweis, daß unterschiedliche Arten der Objektsegmentierung zur systematischen Modellkonstruktion beitragen können.

3) Mitunter wird die Konstruktivität eines Modellierungskonzepts auch wesentlich enger ausgelegt. Es wird dann von einer Aufgabe ausgegangen, ein Modell so zu konstruieren, daß es vorgegebene Modelleigenschaften mit Sicherheit - also "per constructionem" - erfüllt. Vgl. zu dieser Auffassung z.B. MEKLY (1980), S. 423. Dabei kann z.B. an die Konstruktion von Modellen gedacht werden, die sich garantiert deadlockfrei verhalten. Falls eine solche Modellkonstruktion gelingt, kann hinsichtlich der vorgegebenen Modelleigenschaften auf eine Modellverifizierung verzichtet werden. Diese eng ausgelegte Konstruktivität wird im folgenden aber nicht zwingend vorausgesetzt. Denn sie leidet unter dem Nachteil, daß sie sich für die Gestaltung realitätsnaher Modellierungen von Prozeßkoordinierungen im Produktionsbereich bisher als zu restriktiv erweist. Darauf wird anschließend hinsichtlich zweier Ansätze näher eingegangen, die der eng definierten Konstruktivität genügen.

4) Vgl. PETRI, C. (1963), S. 386; NOE (1971), S. 371; HERZOG, O. (1973), S. 3f.; CAVARROC (1974), S. 95; FERNANDEZ (1975), S. 1; AGERWALA (1978a), S. 149; PAKAS-SKEWES (1979), S. VII u. 1f.; AGERWALA (1979), S. 85; PERL (1980), S. 11.1; MEKLY (1980), S. 422; BRETSCHEIDER (1980c), S. 41; BRETSCHEIDER (1980d), S. 25; PETERSON, J. (1981), S. 1; EBERT, J. (1981), S. 1; JOHNSON, R.R. (1982), S. 77; HACKMANN (1982), S. 83 u. 85; VIDAL-NAQUET (1982b), S. 41; HURA (1982c), S. 438; ROSENSTENGEL (1983); KIEBLER (o.J.), S. 40.

5) Zu den seltenen Ausnahmen, die sich ausdrücklich mit Konzepten für die systematische Konstruktion von Netzmodellen beschäftigen, gehören: REISIG (1983a), S. 309ff.; DITTRICH, G. (1989b), S. 8 u. 12ff.; PAGNONI (1990), S. 170ff.

Besonders interessant erscheint das Konstruktionskonzept, das VON MARTIAL und VICTOR in VON MARTIAL (1991a), S. 315ff., präsentieren (mit einem instruktiven Beispiel auf S. 320ff.). Es gehört zu einem Expertensystem für die wissensbasierte Planung von Büroarbeiten. Seine Wissensbasis enthält einfache Skelettnetze für bürotypische Vorgänge. Diese Skelettnetze werden in einem interaktiven Konstruktionsprozeß durch den Systembenutzer verfeinert und erweitert. Dabei wird der Benutzer durch Syntheseregeln (Beispiele auf S. 322) unterstützt, die zu einer systematischen Netzkonstruktion anleiten. Bemerkenswert ist der Ansatz, in der Wissensbasis Teilnetze vorzuhalten (S. 323 i.V.m. S. 322), die bei der Verfeinerung eines zunächst grob entworfenen Netzmodells herangezogen werden können. Es liegt nahe, die Wissensbasis des Expertensystems mit fortschreitender Systemnutzung inkrementell zu erweitern: Neu konstruierte Netzmodelle - oder einzelne Bestandteile daraus - werden als zusätzlich verfügbare "Teilnetze" für spätere Konstruktionsaufgaben in die Wissensbasis eingebracht.

Darüber hinaus existieren noch einige weitere Ansätze zur systematischen Modellkonstruktion. Sie erlangen aber nicht den Konkretisierungsgrad wie die voranstehenden Arbeiten. Daher werden jene Systematisierungsbeiträge nur kurz erwähnt. Ausgangspunkt ist das Urteil von BRETSCHEIDER (1980c), S. 41, das Petrinetz-Konzept unterstütze systematische Modellkonstruktion allenfalls dadurch, daß die Gerichtetheit der Netzkanten und das Verbot der unmittelbaren Verknüpfung gleichartiger Netzknoten fest vorgegeben sind. Der Verf. vermag zwar in den vorgenannten Aspekten keinen unmittelbaren Systematisierungsbeitrag zu entdecken. Aber er stimmt BRETSCHEIDER insofern zu, als dem Verknüpfungsverbot gleichartiger Netzknoten ein Charakteristikum des Petrinetz-Konzepts zugrunde liegt, das bei einer systematischen Modellkonstruktion behilflich sein kann. Es handelt sich um die Bipartition der Knotenmenge von graphischen Netzrepräsentationen. Sie spiegelt die strikte Trennung zwischen aktiven und passiven Netzkomponenten wider. Dieser Umstand mag einen Modellierungsträger dazu anregen, ein Modellierungsobjekt "systematisch" in aktive und passive Objektbestandteile zu zerlegen. Darüber hinaus zwingt das Alternieren der Schaltakte von Transitionen und der Markierungen von Stellen in Schaltprozessen dazu, bei jeder Modellierung einer aktiven Komponente (Transition) reiflich zu überlegen, welche Objektzustände (Stellenmarkierungen) der Aktivitätsausführung vorangehen müssen und welche Objektzustände nach der Aktivitätsausführung vorliegen werden. Darauf spielt auch BRETSCHEIDER (1980c), S. 41, durch seinen Hinweis auf das Alternieren von Transitionen und Stellen an. Die Systematisierungsunterstützung des Petrinetz-Konzepts erstreckt sich also auf eine doppelte Dichotomie: eine erste zwischen aktiven und passiven Objektbestandteilen sowie eine zweite zwischen Vorgänger- und Nachfolgerzuständen. Durch seine Veranlassung, bei jeder Modellkonstruktion diese doppelte Dichotomie zu beachten, übt das Petrinetz-Konzept einen "heilsamen Zwang" zur exakten Problemreflexion aus. Auf die Vorzüge

eines solchen Reflexionszwangs weist KERN, W. (1967), S. 215, ausdrücklich hin. Allerdings bezieht er sich dabei auf Modellierungskonzepte des Operations Research.

Ein weiterer Systematisierungscharakter mag darin gesehen werden, daß das Petrinetz-Konzept grundsätzlich eine kausal fundierte Modellierung von Prozessen leistet. Dadurch wird der Modellierungsträger von vornherein angehalten, bei der Repräsentation von Problemaspekten, die für veränderlich gehalten werden, nach den zugrundeliegenden kausalen Wirkungszusammenhängen Ausschau zu halten. Dies betrifft vor allem die frühe Konstruktionsphase der Problemkonzeptualisierung. Es ist bemerkenswert, daß auch die meisten Ansätze, die derzeit für die Aufgabe der Problemkonzeptualisierung größere Beachtung finden, auf kausalen Fundamenten beruhen. Dazu gehören z.B. die Interpretative Strukturmodellierung und das Konzept "kognitiver Landkarten" (cognitive mapping). Mit den kausalen Grundlagen von Konzeptualisierungsansätzen befaßt sich insbesondere MÜLLER-SILVA (1984a), S. 27, 33f., 62, 70f., 86 u. 89.

6) Die mangelnde Unterstützung bei der systematischen Konstruktion von Netzmodellen wird nur selten kritisiert. Zu den wenigen Ausnahmen gehört MEKLY (1980), S. 423. Dort wird beklagt, daß das Petrinetz-Konzept kaum Regeln für die Konstruktion von modular strukturierten und wohlverhaltenden Netzmodellen anbiete.

Die abweichende Ansicht, das Petrinetz-Konzept erlaube systematische Modellierungen, wird dagegen des öfteren vertreten; vgl. z.B. KWAN (1977b), S. 44; PETRI, C. (1979b), S. 69; AYACHE (1979a), S. 1050; AGERWALA (1979), S. 85; SCHNUPP (1981), S. 61 (als klare Entwurfsdisziplin bei der netzgestützten Gestaltung von Softwaresystemen); REISIG (1983a), S. 309. Allerdings legen die vorgenannten Quellen nicht offen, worauf sich die Beiträge des Petrinetz-Konzepts zur systematischen Modellierung konkret erstrecken sollen. Darüber hinaus wird nicht immer klar, ob sich die Autoren auf die Systematizität von entweder Modellkonstruktionen oder aber von Modellauswertungen beziehen. Die anschließenden Ausführungen werden darlegen, warum sich der Verf. diesen abweichenden Meinungen nicht anschließen vermag.

7) Daneben existieren einige weitere Beiträge zur systematischen Modellkonstruktion. Sie wurden schon kurz zuvor erwähnt.

8) Ein solcher Ansatz wurde bereits in einer früheren Anmerkung erwähnt. Dort ging es um die Synthese lebendiger oder deadlockfreier Netze, die aus garantiert lebendigen bzw. garantiert deadlockfreien Netzbausteinen aufgebaut werden. Darüber hinaus findet sich die nachfolgend beschriebene Konstruktionsweise auch bei PAGNONI (1990), S. 178ff. Allerdings werden dort keine bestimmten Netzeigenschaften garantiert.

9) Dies belegt ein Vergleich jener Netzbausteine mit den Netzmodulen, die in der Fallstudie dieser Arbeit präsentiert wurden. Vgl. insbesondere die beiden Netzbausteine, die PAGNONI (1990), S. 178, ausschließlich zuläßt.

10) Beiträge zum Petrinetz-Konzept, die sich ausdrücklich mit der systematischen Konstruktion von Netzmodellen auf der Basis von Netzmorphismen befassen, sind nur selten anzutreffen. Es herrschen allgemeine Erörterungen von Netzmorphismen vor, in denen konstruktive Anwendungsperspektiven für Netzmorphismen nur en passant anklängen. Vgl. dazu die Mehrzahl der Quellen, die an früherer Stelle zum Konzept der Netzmorphismen angeführt wurden. Zu den Ausnahmen, die den Zusammenhang zwischen Netzmorphismen und systematischer Modellkonstruktion in den Vordergrund rücken, zählen die Ausführungen von REISIG (1983a), S. 312ff. Allerdings wird dort das Konzept der Netzmorphismen nur oberflächlich angewandt. Seine Garantie von Netzeigenschaften wird nicht ausgeschöpft. Darüber hinaus wird dort der Morphismusbegriff anders als in der hier vorgelegten Arbeit angewandt. Denn REISIG spricht *horizontale* Netzerweiterungen aus Netzmorphismen an, während er vertikale Netzverfeinerungen als *inverse* Netzmorphismen bezeichnet; vgl. S. 312. Vgl. des Weiteren zur systematischen Modellkonstruktion mit der Hilfe von Netzmorphismen SHAPIRO, R. (1979), S. 109 u. 111ff.; FEHLING (1990a), S. 14ff. i.V.m. 4ff. Auch in den vorgenannten Quellen bleibt die eigenschaftsgarantierende Potenz von Netzmorphismen ungenutzt.

11) Die Invarianz solcher Netzeigenschaften ist keineswegs selbstverständlich. Vielmehr können einzelne Eigenschaften beim Wechsel zwischen verschiedenen Ebenen der Modelldarstellung verloren gehen oder auch neu entstehen. Beispielsweise kann ein konfliktionäres Netzmodell, in dem konfliktionär aktivierte Transitionen zugelassen sind, durch eine Netzerweiterung in ein konfliktfreies Netzmodell transformiert werden; vgl. ROSENSTENGEL (1991), S. 93f. Ebenso ist die umgekehrte Richtung möglich, ein konfliktfreies Netzmodell mittels einer Verfeinerung in ein konfliktionäres Netzmodell zu überführen; vgl. ROSENSTENGEL (1991), S. 35ff.

Die Invarianz von Netzeigenschaften klingt - allerdings weniger deutlich und ohne Bezugnahme auf Netzmorphismen - auch bei RAUBOLD (1972), S. 207, an. Er fordert für die verfeinernde Modellkonstruktion, die sukzessiv hervorgebrachten Konstruktionsresultate sollten sich durch Äquivalenz-Transformationen wechselseitig ineinander überführen lassen. Der Äquivalenzbegriff impliziert dabei die Konstanz von Sachverhalten, bezüglich derer sich die Resultate als "äquivalent" erweisen. Zu diesen invarianten Sachverhalten können alle Eigenschaften eines Netzmodells gehören, die einen Modellierungsträger interessieren. Einen ähnlichen Ansatz vertritt VALETTE (1978b), S. 196f. Er möchte Netzmodelle mit der Hilfe von Netztransformationen so entwerfen, daß Netzeigenschaften, die auf höheren Modellebenen zutreffen, nach Modellverfeinerungen auch noch auf den tieferen Modellebenen weitergelten. Damit wird die Invarianz der Netzeigenschaften nur in der Richtung zunehmender Verfeinerung, nicht aber in der umgekehrten Richtung gefordert.

12) Es kann auch auf die vordefinierten Netzbausteine zurückgegriffen werden, die zuvor angesprochen wurden. Daher schließen sich die beiden vorgestellten Konstruktionskonzepte keineswegs gegenseitig aus. Vielmehr lassen sie sich miteinander kombinieren. Vgl. auch die nachfolgende Anmerkung. Allerdings zielen beide Konstruktionsansätze auf unterschiedliche "Synthesephilosophien" ab. Der bausteinorientierte Ansatz stellt vornehmlich auf die horizontale Netzerweiterung ab, bei der Netzbausteine zu immer umfangreicheren Netzmodellen zusammengefügt werden. Der morphismusbasierte Ansatz konzentriert sich dagegen auf die vertikale Netzverfeinerung, bei der ein Netzmodell immer tiefer strukturiert wird. Diese verschiedenartigen Vorgehensweisen verhindern aber nicht, daß sie sich wechselseitig befruchten können. Denn es steht nichts entgegen, bei der vertikalen Modellkonstruktion - wie eingangs erwähnt - von den Netzbausteinen des horizontalen Ansatzes auszugehen. Ebenso läßt sich auf die Netzbausteine zurückgreifen, um bei der Verfeinerung eines Netzmodells einen Makroknoten durch ein bausteinartig standardisiertes Subnetz zu ersetzen.

13) Diese Vorgehensweise ist freizügiger als die Vorgabe von Konstruktionsregeln. Denn der schöpferischen Phantasie werden bei der Netzverfeinerung zunächst keine Zügel angelegt. Es muß nur nachträglich aufgezeigt werden, daß sich die Verfeinerungen morphismuskonform verhalten. Oftmals wird aber bei der Anwendung von Netz-morphismen restriktiver vorgegangen. Dabei werden zunächst Verfeinerungsregeln festgelegt, die sich nachweislich als Netz-morphismus darstellen lassen. Danach werden die Regeln zwecks Netzverfeinerung angewandt. Diese Verfeinerungsregeln können als spezielle, morphismusbasierte und verfeinerungsbezogene Ausprägung der oben erwähnten Konstruktionsregeln aufgefaßt werden.

14) Daneben wurden auch andere Entwurfshilfen angeboten, die aber aufgrund ihres stark "technisch" eingefärbten Charakters hier nicht aufgelistet werden. Davon ist z.B. die Transformation beliebiger prädikatenlogischer Formeln in ihre konjunktive Normalform betroffen. Sie ist für die Konstruktion von deklarativen Netzmodellen erforderlich, die mit der Hilfe von Synthetischen Netzen gestaltet werden sollen. Denn für die prädikatenlogische Spezifizierung der zu modellierenden Probleme wurde die Verwendung *beliebiger* Formeln zugelassen. Die systematische Konstruktion Synthetischer Netze setzt aber eine konjunktive Normalform - die Klauselform - voraus. Daher muß die vorgenannte Transformation angeboten werden, um Normalformdefizite von Formelsystemen auf systematische Weise zu überwinden.

15) Synchronisationsstellen werden in dieser Arbeit auch als Schnittstellen angesprochen. Dabei sind aber nur solche Schnittstellen i.e.S. gemeint, die in einem Netzmodell als *Stellen* definiert sind. In diesem Kapitel wird aber des öfteren auf Schnittstellen i.w.S. Bezug genommen, an denen ein System - z.B. ein Teilnetz - mit seinem Umsystem in Wechselwirkung treten kann. Bei solchen Schnittstellen i.w.S. kann es sich durchaus um einzelne Stellen eines Teilnetzes handeln. Ebenso kommen aber auch Stellen- oder Transitionenmengen in Betracht. Dies trifft vor allem auf den Rand eines Subnetzes zu, der die Schnittstelle zwischen dem Subnetz und seinem hierarchisch übergeordneten Makroknoten bildet. Ebenso können Schnittstellen als eigenständige Netze modelliert werden. Um Verwechslungen zwischen *Schnittstellen* i.e.S. und *Schnittstellen* i.w.S. auszuschließen, werden in diesem Kapitel alle Schnittstellen i.e.S. nur noch als Synchronisationsstellen angesprochen.

16) Vgl. dazu die einleitenden Erläuterungen zur Fallstudie sowie die Erläuterung von Kanal/Instanz-Netzen. Auf hierarchische Verfeinerungen von Netzmodellen wird später noch ausführlicher eingegangen.

17) Den Netzmodulen liegt das Konstruktionsprinzip der Baukastensysteme zugrunde. Es wurde schon in der Übersicht zur Fallstudie gewürdigt. Netzmodule, die in den Konstruktionszusammenhang eines Baukastensystems eingeordnet sind, werden fortan auch als Netzbausteine bezeichnet. Auf Beiträge, die das Petrinetz-Konzept zur Modellkonstruktion aus Netzbausteinen leistet, wird unter dem Aspekt der Modularität zurückgekommen.

18) Dies gilt sowohl für Synthetische Kernnetze als auch für Erweiterte Synthetische Netze. Denn die vier erstgenannten Konstruktionshilfen lassen sich auf beide Netzklassen in gleicher Weise anwenden. Nur die letztgenannten Netzmodule setzen des öfteren die speziellen Netzkonstrukte aus Erweiterten Synthetischen Netzen voraus. Der Verf. schätzt aber den konstruktiven Beitrag der Netzmodule nicht so hoch ein, daß sie schon ausreichen, um den Erweiterten Synthetischen Netzen eine hohe Konstruktivität einzuräumen. Denn die Netzmodule bleiben auf den engen Argumentationshintergrund dieser Arbeit - die Prozeßkoordinierung in Flexiblen Fertigungssystemen - beschränkt.

19) Der Verf. kann überhaupt keinen Ansatz erkennen, die systematische Konstruktion von OR-Programmen durch konkrete Entwurfshilfen zu unterstützen. Zwar existieren durchaus Werke, die sich im Kontext von OR-Programmen mit der "Kunst des Modellbaus" oder ähnlichem befassen. Vgl. dazu RIVETT (1980) und WILLIAMS, H. (1985). Aber systematische Konstruktionsanleitungen hat der Verf. in den vorgenannten Quellen nicht zu entdecken vermocht.

20) GRAI steht für: Graphes a Resultats et Activites Inter-correles. Vgl. zum GRAI-Konzept LEE-KWANG (1985b), S. 164ff.

21) Ein systematisches Raster für die Konstruktion von Produktionsmodellen wird auch seitens der CIM-KSA-Konzepts angeboten. Dabei wird allerdings dem modularen Charakter der Modellkonstruktion keine besondere Aufmerksamkeit zuteil. Statt dessen orientiert sich das Konstruktionsraster an einer systematischen Identifizierung aller "Vorgangsketten", die in einem Produktionssystem ausführbar sein sollen. Zwar ließe sich erwägen, die Vorgangsketten als wohldefinierte Module auszugestalten. Dieser Ansatz wird aber von den Beiträgen zum CIM-KSA-Konzept nicht explizit verfolgt. Vgl. zum CIM-KSA-Konzept die Quellen, die schon im Kontext prozeßorientierter Systemstrukturierungen angeführt wurden.

22) Dieser Mangel einer klar vorgegebenen Segmentierungsstrategie kommt nahezu allen Netzklassen zu. Vgl. zur mangelhaften Unterstützung der systematischen Zerlegung von Netzmodellen in Teilmodelle (Module) z.B. HINDERER (1982b), S. 238.

Eine Ausnahme bilden nur einige wenige Netzklassen, die von vornherein so definiert sind, daß ihre Netze nur aus wohlbestimmten Netzmodulen komponiert werden dürfen. Sie werden hier kurz als modulare Netzklassen bezeichnet. Sie leiden gemeinsam unter dem Nachteil, daß ihre Ausdruckskraft sehr gering bleibt. Dazu tragen sowohl die Einfachheit der erlaubten Netzmodule als auch die Restriktionen zulässiger Modulkompositionen bei. Dies wird besonders deutlich bei PAGNONI (1990), S. 170ff. (i.V.m S. 58ff.). Ihre Klasse der Kontrollnetze (control nets) bleibt auf Stelle/Transition-Netze und vier Netzmodule beschränkt. Zwei Netzmodule stellen einfache lineare Stellen- und Transitionenverknüpfungen dar. Die beiden anderen Netzmodule beschränken sich auf eine kombinierte Verzweigung und Zusammenführung. Mit diesen simplen Ausdrucksmitteln können z.B. die Modellierungsanforderungen aus der Fallstudie bei weitem nicht abgedeckt werden. PAGNONI (1990), S. 180, räumt auch explizit ein, daß ihre Kontrollnetze strukturell beschränkt blieben. Auf andere modulare Netzklassen wurde schon früher implizit eingegangen, ohne ihre Modularität ausdrücklich zu erwähnen. Es handelt sich um den Ansatz, Netzmodelle mit garantierten Eigenschaften zu konstruieren, indem auf fest vorgegebene Netzbausteine und Konstruktionsregeln zurückgegriffen wird. Die Netzbausteine lassen sich ebenso als Netzmodule auffassen. Der Vorbehalt zu geringer Ausdrucksmächtigkeit trifft auch auf diese Modellierungsansätze zu.

23) Daher möchte der Verf. keinem derjenigen Modellierungskonzepte, die bisher im Bereich der Prozeßkoordinierung bei komplexen Produktionssystemen vorgelegt worden sind, eine hohe oder gar ausgezeichnete Konstruktivität zugestehen.

24) Eine formalsprachliche Konkretisierung der Produktionsmodellmodule liegt bis heute in verbindlicher Form noch nicht vor. Zwar existieren mehrere Applikationen des GRAI-Konzepts, in denen formalsprachliche Modellierungen von Produktionssystemen vorgelegt wurden. Aber das GRAI-Konzept läßt sich mit vielen verschiedenen formalen Modellierungsansätzen kombinieren. Daher fällt es schwer zu beurteilen, welche Modellierungsergebnisse dem GRAI-Konzept zugerechnet werden sollen und welche Aspekte aus den - letztlich unabhängigen - formalen Modellierungen resultieren. Eine ähnliche Amalgamationsproblematik besteht zwar auch beim Petrinetz-Konzept. Doch sind die formalen Konstruktions- und Auswertungstechniken, die sich auf Synthetische Netze anwenden lassen, zuvor in das Kernkonzept Synthetischer Netze und seine Erweiterungen systematisch eingearbeitet worden. Daher zeichnet sich die Modellierung mit Synthetischen Netzen durch den Vorzug aus, daß sie formale Konkretisierungen von Modellkonstruktionen und -auswertungen als integrale Bestandteile eines Modellierungskonzepts anbietet. Dies reicht über das natürlichsprachliche Strukturierungsraster des GRAI-Konzepts weit hinaus.

25) Vgl. zur Präferenz modularer Modellierungen BAER, J. (1973b), S. 16; FRANK, J. (1976), S. 44; MELDMAN (1977), S. 32; MOALLA (1977), S. 90; ZACHARIADES (1977), S. 1.1f.; BLOOM, T. (1979), S. 25; LAUER (1979), S. 151; NOE (1980b), S. 370; STEINKE (1980), S. 65 u. 117; OELLERS (1981), S. 102; BUCHMANN (1982b), S. 593; SCHRÖDER, H. (1983), S. 81; HORVATH (1983), S. 92; PRIESE (1983), S. 221; HERZOG, O. (1983); SANDERS, M. (1987), S. 77f.; BOSSI (1989), S. 104f.; BEKHI (1989), S. 245; PAGNONI (1990), S. 52ff. (dort zumeist als "macros" thematisiert), insbesondere S. 58ff., u. S. 171; ESCHENBACHER (1991), S. 234; WECK (1991d), S. 9 u. 24ff.; WINTER, R. (1991), S. 4 u. 202; SCHEER (1991d), S. 137ff., insbesondere S. 139.

Der Modellierungsbegriff wird dabei so weit gefaßt, daß er auch die Modellierung von Sachverhalten durch Software-Programme umfaßt. Denn in den vorgenannten Quellen wird die Modularitätsforderung oftmals auf die modulare Softwaregestaltung bezogen.

26) Unter einem Objekt wird hier im umfassenden Sinn jedes Objekt einer Modellierung - z.B. das jeweils zu repräsentierende Koordinierungsproblem - verstanden.

27) Die innere Abgeschlossenheit der Teilobjekte verhindert nicht, daß sich die Teilobjekte ein- oder gegenseitig beeinflussen können. Sie drückt vielmehr nur aus, daß die Teilobjekte separat modelliert werden können, ohne dabei die Modellierung der anderen Teilobjekte berücksichtigen zu müssen. Für die indirekte Beachtung anderer Teilobjekte reicht es aus, die Schnittstellen des betrachteten Teilobjekts zu seiner Umgebung zu modellieren. Die Abgeschlossenheit eines Teilobjekts bezieht sich daher nur auf den Prozeß seiner Modellierung, nicht aber auf den Zusammenhang der modellierten Teilobjekte. Diese Abgeschlossenheit schlägt sich in den Modulen nieder, die aus der Modellierung der Teilobjekte hervorgehen. So betont PRIESE (1983), S. 222, daß ein Modul auf direkte Weise nur mit sich selbst zu wechselwirken vermag. Dabei kann es entweder auf seine internen Zustände oder aber auf die

Oberflächenzustände an seinen Schnittstellen Bezug nehmen. Wechselwirkungen mit anderen Modulen sind nur auf indirekte und lokale Weise über gemeinsam geteilte Schnittstellen möglich. Aus anderer Perspektive hebt NOE (1980b), S. 370, hervor, daß die Art der Verknüpfung von Modulen die modulspezifischen Eigenschaften nicht verändern soll. Auch dies spricht dafür, die Module als in sich abgeschlossene Modellkomponenten zu behandeln.

28) Die Art, in der ein Objekt segmentiert wird, stellt hier eine besondere Ausprägung der o.a. Systematizität der Konstruktion von Modellen dar.

29) Die Vereinfachung der Objektmodellierung beruht im wesentlichen darauf, daß sich die Aufmerksamkeit des Modellierungsträgers auf das jeweils betrachtete Teilobjekt fokussieren kann. Die angrenzenden oder weiter entfernten Teilobjekte brauchen dagegen wegen der Abgeschlossenheit der Teilobjekte nicht beachtet zu werden. Vgl. zur Komplexitätsbeherrschung durch modulare Objektzerlegungen im allgemeinen NOE (1975a), S. 3 u. 19 (dort allerdings nicht explizit unter den Begriff der Modularität subsumiert). Der Aspekt der überschaubaren Modulgröße wird von HORVATH (1983), S. 92, betont.

Darüber hinaus zeichnen sich modulare Objektmodellierungen durch ihre Modifikationsfreundlichkeit aus; vgl. FRANK, J. (1976), S. 45; OELLERS (1981), S. 102; HORVATH (1983), S. 92. Denn bei der Änderung von Modellierungsvoraussetzungen brauchen oftmals nur die Modellierungen einzelner Teilobjekte angepaßt zu werden. Aufgrund der Abgeschlossenheit der Teilobjekte wirken sich diese lokalen Modellanpassungen auf andere Module nicht aus. Für die Modellierungen dieser Arbeit wurde von vornherein gefordert, sie sollten gegenüber späteren Veränderungen der Modellierungsvoraussetzungen offenbleiben. Daher wird auch aus dieser Perspektive der modularen Konstruktion von Netzmodellen besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Schließlich spricht zugunsten modularer Modellierungen auch ihre Verifizierungsfreundlichkeit. Denn zunächst läßt sich die Korrektheit einzelner Module aufgrund ihres geringen Umfangs noch relativ einfach nachweisen. Wenn die korrekte Konstruktion aller Module bekannt ist, können sie auf einer höheren Modellierungsebene zu atomaren Komponenten vergrößert werden. Dann braucht auf dieser höheren Ebene nur noch das korrekte Zusammenwirken der Module überprüft zu werden. Falls die modulare Modellierung mit einer hierarchischen Modellverfeinerung gekoppelt wird, ist es möglich, die voranstehend skizzierte zweistufige Verifizierung der internen Modulfunktionsweise und des externen Modulzusammenwirkens auf mehreren Hierarchieebenen zu wiederholen. Da mit den Modulen auf der untersten Hierarchieebene begonnen werden muß, wird auch von einem "bottom up"-Vorgehensweise gesprochen (vgl. z.B. SCHEER (1991d), S. 139). Diese schrittweise vergrößernde Verifizierung fällt tendenziell leichter aus, als von vornherein die Korrektheit eines Gesamtmodells zu überprüfen. Denn die Komplexität der Verifizierung nimmt im allgemeinen mit dem Umfang des Analyseobjekts zu. Vgl. zur Verifizierungsvereinfachung des "bottom up"-Ansatzes DEVY (1979), S. 49.

30) Die Modellierung der Teilobjekte kann auf die gleichen konstruktiven Entwurfshilfen zurückgreifen, die für die Konstruktion beliebiger Objektmodelle herangezogen werden. Ebenso läßt sich die modulare Objektzerlegung in rekursiver Weise auf ihrer eigenen Ergebnisse fortgesetzt anwenden. Dies führt zu einer Segmentierung der Module in Submodule, der Submodule in Sub-Submodule usw. Diese rekursive Objektsegmentierung bewirkt eine hierarchische Objektstrukturierung, die zumeist mit dem Konzept der hierarchischen Modellverfeinerung gekoppelt wird. Dann fallen die Submodule um so feiner aus, je tiefer sie in der Segmentierungshierarchie stehen. Auf den Aspekt der Modulverfeinerung wird hier nicht weiter eingegangen. Er stellt kein Spezifikum des modularen Modellentwurfs dar. Vielmehr handelt es sich nur um eine Anwendungsform der allgemeinen Konstruktionstechnik hierarchischer Modellverfeinerung. Sie wurde schon oben kurz angesprochen und wird später weiter ausgeführt.

31) Vgl. allgemein zu modularen Facetten des Petrinetz-Konzepts MELDMAN (1977), S. 33f. u. 36; PETERSON, J. (1977), S. 237; VALETTE (1978b), S. 196f.; MEKLY (1980), S. 422; NOE (1980b), S. 370; BEYAERT (1981), S. 81; REISIG (1983a), S. 318ff. (mit einer formalen Präzisierung der Begriffe "Netzmodul" und "modulare Netzgestaltung" auf S. 318 bzw. 318f.); BEKHI (1989), S. 245; PAGNONI (1990), S. 171ff.; THOME, R. (1990), Abschnitt H 16.4, S. 46; ESCHENBACHER (1991), S. 223; SCHMITZ, P. (1991), S. V; ROSENSTENGEL (1991), S. 2 u. 9; KIEBLER (o.J.), S. 40.

Die Möglichkeit, im Rahmen des Petrinetz-Konzepts modulare Modelle zu konstruieren, wird dadurch unterstrichen, daß sich zellulare Automaten als Petrinetze darstellen lassen. Denn zellulare Automaten stellen den Inbegriff modularer Systementwürfe dar. Jede ihrer Automatenzellen stellt ein in sich abgeschlossenes Modul mit wohldefinierten Schnittstellen zu seiner Umgebung dar. Das Konzept zellulärer Automaten wurde schon kurz angesprochen. Vgl. zu ihrer Modellierung durch Petrinetze die Anregungen bei ZUSE, K. (1982), S. 70, 75ff. u. 99ff.

32) Die fehlende "natürliche" Modularität bestätigen VON MARTIAL und VICTOR mittelbar, wenn sie als Zukunftsaufgabe für ihr netzgestütztes Modellierungskonzept die "Entwicklung von Modularisierungstechniken" herausstellen (VON MARTIAL (1991a), S. 324). Den Modularitätsmangel von Petrinetzen unterstreicht auch PRIESE (1979), S. 4, aus einer anderen Betrachtungsperspektive. Er spricht Petrinetzen jede modulare Struktur ab, weil sie über keine unabhängig operierenden elementaren Komponenten verfügen. Die Knoten eines Netzes kämen als solche Elementarkomponenten nicht in Betracht. Denn bei einer konfliktionären Aktivierung hängen mindestens zwei Transitionen über mindestens eine gemeinsame Ein- oder Ausgangsstelle voneinander ab. Der Verf. teilt diese Ansicht insofern, als Petrinetze "an sich" tatsächlich keine modulare Strukturierung erkennen lassen. Dies schließt allerdings nicht aus, daß mit der Hilfe von Petrinetzen modulare Modellkonstruktionen erfolgen. Das belegt schon die Fallstudie mit

ihren Netzmodulen für die Prozeßkoordinierung. Daher kann PRIESE nicht mehr gefolgt werden, wenn er die Modularität von Netzmodellen generell in Abrede stellt. Wie weit seine Verneinung modularer Netzstrukturen reichen soll, kann aus der o.a. Quelle allerdings nicht klar entnommen werden.

33) Die Konstruktion von Netzmodellen aus einfachen Netzbausteinen wird nur mitunter explizit gewürdigt; vgl. z.B. HERZOG, O. (1973), S. 4. Aber diese Konstruktionsweise liegt mehreren Ansätzen für Netzkonstruktionen implizit zugrunde. Aus der Perspektive der Modularität wird dies anschließend näher dargelegt. Vgl. auch den Ansatz bei VON MARTIAL (1991a), S. 320ff., aus netzförmigen "Skelettplänen" und aus "Primitiven Netzen" sukzessiv umfangreichere Netzmodelle aufzubauen. Es ist offensichtlich, daß es bei den vorgenannten Netzvarianten um Netzbausteine handelt. Vgl. darüber hinaus die Ausführungen zur "bottom up"-Verifizierung von Netzmodellen.

34) Daher werden hier (Netz-)Bausteine und (Netz-)Module als synonyme Begriffe verwendet.

35) Bei der Konstruktionsalternative für Stelle/Transition-Netze, die auf der Anwendung von Netzmorphismen beruht, läßt sich dagegen kein Beitrag zu modularen Modellentwürfen erkennen.

36) Die Art der Bausteinverknüpfung richtet sich grundsätzlich nach dem Charakter der Schnittstellen, die zwischen den jeweils verknüpften Bausteinen vermitteln. Es würde den Rahmen der Beurteilung eines Modellierungskonzepts sprengen, die Optionen für die Gestaltung solcher Schnittstellen systematisch zu entfalten. Vgl. statt dessen die Übersichten bei ZELEWSKI (1986e), S. 13ff.; ZELEWSKI (1987b), S. 552ff.; BRENG (1990), S. 32ff.

37) Die nachfolgenden Ausführungen treffen sowohl auf Synthetische Kernnetze als auch auf Erweiterte Synthetische Netze zu. Sie werden daher unter dem Oberbegriff Synthetischer Netze gemeinsam angesprochen.

38) Darüber hinaus wurde auch die Netzrepräsentation des nebenläufigen Algorithmus für die Konstruktion von Erreichbarkeitsgraphen in modularer Weise konstruiert. Die Netzmodule entsprachen dabei jeweils einem Programmkonstrukt in Pseudocode-Notation.

39) Vgl. ZELEWSKI (1986e), S. 13ff.; ZELEWSKI (1987b), S. 552f.; BRENG (1990), S. 33. Darüber hinaus liegt der datenorientierte Gestaltungsansatz dem "Unternehmensdatenmodell" von SCHEER zugrunde, das in jüngerer Zeit verstärkte betriebswirtschaftliche Beachtung genießt.

40) Die charakteristische Eigenschaft Höherer Netze, strukturierte Marken zuzulassen, wirkt sich in dieser Hinsicht entscheidend aus. Denn für den Informationsaustausch zwischen Modulen reicht die unstrukturierte Basismarke im allgemeinen nicht aus. Zwar können mit ihren Kopien binär codierte Informationen repräsentiert werden. Aber diese Repräsentationsweise ist derart "fundamental", daß sie keine "praktikable" Modellierung des Informationsflusses zwischen Modulen zuläßt. Aus diesem Grund überrascht es nicht, daß in Stelle/Transition-Netzen, die nur über Kopien der Basismarke verfügen, keine datenorientierte Modulverknüpfung zustande kommt.

41) Die dezentrale Subsystemkoordinierung auf der Basis ausgetauschter Nachrichten wird vornehmlich seitens der Informatik diskutiert. Auf den Spezialfall der Multiagentensysteme wurde bereits hingewiesen. Zu diesem Gestaltungsansatz gehört ebenso die objektorientierte Programmierung. Ihre besondere Bedeutung für den Softwareentwurf wurde schon im Zusammenhang mit der objektorientierten Systemgestaltung angesprochen. Darüber hinaus läßt sich die dezentrale Subsystemkoordinierung durch Nachrichtenaustausch aber auch in betriebswirtschaftlichen Kontexten wiederfinden. Dort wird sie allerdings zumeist unter anderen Bezeichnungen thematisiert. Im Vordergrund steht vor allem das Koordinierungskonzept der pretiale Lenkung. Ihre Lenkpreise stellen nichts anderes als "Nachrichten" dar, die zur dezentralen Koordinierung von Subsystemen dienen. Allerdings werden diese Lenkpreise oftmals von einer übergeordneten Instanz vorgegeben. Dieser zentralistische Aspekt geht über den rein dezentralen Ansatz hinaus, daß Subsysteme ihre Verhaltensweisen durch Nachrichtenaustausch wechselseitig aufeinander abstimmen. Daher wird auf die pretiale Lenkung hier nicht weiter eingegangen.

42) Daneben tragen aber auch der Fluß von Kopien der Werkzeugmarke dazu bei, die Verhaltensweisen der Netzmodule für Bearbeitungs- und Lagerstationen aufeinander abzustimmen.

43) Die Modulverknüpfung erfolgte daher auf zwei Ebenen: sowohl durch einen Informations- als auch durch einen Materialfluß. Die daten- und nachrichtenorientierten Gestaltungskonzepte kannten dagegen nur einen reinen Informationsfluß für die Modulverknüpfung.

44) In dieser Hinsicht überschneidet sich die Beurteilung der Modularität mit den früheren Ausführungen zu den allgemeinen und speziellen Modellierungsfähigkeiten des Petrinetz-Konzepts. Diese inhaltliche Überlappung wird hier bewußt in Kauf genommen, um die Modularität von Netzmodellen umfassend beurteilen zu können.

45) Dadurch wird keineswegs ausgeschlossen, daß sich im Rahmen des Petrinetz-Konzepts auch andere Verknüpfungsarten für Netzmodule realisieren lassen. Aber in dieser Arbeit wurde aus zwei Gründen nur die oben geschilderte Verknüpfungsart benutzt. Erstens entsprechen Modulverbindungen, die durch den Austausch von Markenkopien zustandekommen, der Eigenart von Petrinetzen, über wohldefinierte bewegliche Objekte zu verfügen. Zweitens ist bisher keine Verknüpfungsalternative so tief erforscht worden und so weit in die praktische Gestaltung modularer Systementwürfe eingeflossen, wie es für den datenorientierten Ansatz der Fall ist.

Darüber hinaus wird auf Beiträge verwiesen, die sich intensiv mit der Aufgabe befassen, die Module von Netzmodellen durch Schnittstellen untereinander zu verbinden. Vgl. RICHTER, G. (1985a), S. 20ff.; RICHTER, G. (1985c), S. 50ff.; REISIG (1983a), S. 318f.; VOSS, K. (1983b), S. 278ff., insbesondere S. 279 u. 290. Auch dort beruht die Koordinierung der Netzmodule letztlich immer auf dem Austausch - zumindest auf der gegenseitigen Kenntnisnahme - von Markenkopien.

46) Vgl. HACK, M. (1975a), S. 13; PETRI, C. (1976b), S. 1; MURATA, T. A. (1977a), S. 415; PETERSON, J. (1977), S. 237; NOE (1980b), S. 370; BRETSCHNEIDER (1980c), S. 41; BEYAERT (1981), S. 81; PAGNONI (1990), S. 134; ROSENSTENGEL (1991), S. 9, 22 u. 37. Vgl. auch die Anmerkungen zu lokalen Aspekten des Petrinetz-Konzepts, die in dieser Arbeit mehrfach erfolgten.

Einen indirekten - aber nicht zwingenden - Hinweis auf die Lokalität des Petrinetz-Konzepts liefert das Konzept zellulärer Automaten. Dieses Automatenkonzept wurde schon kurz zuvor erwähnt. Zelluläre Automaten sind einerseits so angelegt, daß die Automatenzellen ausschließlich mit ihren unmittelbar benachbarten Automatenzellen wechselwirken können. Sie zeichnen sich daher durch eine strenge Lokalität der wechselseitigen Beeinflussung von Automatenzellen aus. Andererseits wurde in der bereits genannten Anmerkung dargelegt, daß sich zelluläre Automaten durch Petrinetze modellieren lassen. Diese Modellierungsfähigkeit spricht zugunsten der lokalen Eigenart von Petrinetzen. In der gleichen Richtung läßt sich ein Hinweis von MELDMAN (1971), S. 75, auslegen. Er hebt als Vorzug von Netzen hervor, mit ihrer Hilfe die Schwachstellen von Modellierungen lokalisieren zu können.

Abweichender Ansicht ist dagegen PRIESE (1983), S. 222. Er bestreitet die Lokalität des Petrinetz-Konzepts durch einen Hinweis auf verborgenen Konfliktauflösungen. Sie führten dazu, daß ein Netzmodul auch auf andere Netzmodule reagieren könne, die nicht mit der Schnittstelle des erstgenannten Moduls verknüpft seien. Auf diese Weise geschähe tatsächlich eine nicht-lokale Fernwirkung zwischen Netzmodulen. Allerdings entzieht sich diese Behauptung einer kritischen Nachprüfung, weil PRIESE die monierten verborgenen Konfliktauflösungen nicht konkret beschreibt. Immerhin ist PRIESE insofern zuzustimmen, als tatsächlich Varianten des Petrinetz-Konzepts existieren, deren partielle Nichtlokalität sich präzise identifizieren läßt. Dazu gehören vor allem die Selbstmodifizierenden Netze. Ihre variablen Kantengewichte können sich auf Markenkopien beziehen, die nicht auf adjazenten, sondern beliebig weit entfernten Stellen liegen. Mittels solcher Kantengewichte wird das Schalten von Transitionen, zu deren Ein- oder Ausgangskanten die variabel gewichteten Kanten gehören, den Fernwirkungen der Markierungen von nicht-benachbarten Stellen unterworfen. Daher wurden die variablen Kantengewichte von Selbstmodifizierenden Netzen aus den Erweiterungen Synthetischer Netze bewußt ausgeschlossen. Eine weitere Verletzung der Lokalität von Petrinetzen stellen globale Variablen dar, die in Schaltvorschriften von Pro-Netzen verwendet werden. An dieser Stelle könnte der Einwand erhoben werden, die Variable "Systemzeit" aus der Fallstudie besäße ebenso einen globalen Charakter. Diese Vorhaltung übersieht aber, daß die Systemzeit-Variablen ausschließlich mit der Hilfe von lokal definierten Netzkonstruktionen eingeführt wurde.

47) Da transitionsspezifische Variablenbindung ist enger definiert als die modulspezifische Variablenbindung. Denn zum gleichen Netzmodul können mehrere Transitionen gehören. Diese Differenzierung bleibt hier aber irrelevant. Denn hier interessiert nur der Sachverhalt, daß die Gültigkeit einer Variablenbindung nicht über ein Netzmodul hinausreicht. Diese Reichweitenbeschränkung wird aber durch die transitionsspezifische Variablenbindung auf jeden Fall erfüllt.

48) Auf diese Weise lassen sich die "toxischen" Fernwirkungen vermeiden, die von globalen Variablen, globalen Schaltern und ähnlichen Konstrukten ausgehen können. Im Rahmen der objektorientierten Systemgestaltung schlägt sich die Reichweitenbeschränkung von Variablen darin nieder, daß die interne Struktur und das interne Verhalten eines Objekts nach außen "verborgen" (encapsulation) werden. Vgl. BARR, R. (1989), S. 24; WAND (1989), S. 554; MOSNER (1991), S. 139. Vgl. ebenso das Konzept des "information hiding", das z.B. bei PARNAS (1972), S. , und SCHEER (1991d), S. 139, skizziert wird. Vgl. zur konzeptionellen Verwandtschaft zwischen "encapsulation" und "information hiding" WAND (1989), S. 554, Fn. 17.

49) Die hierarchische Modellverfeinerung wird oftmals unter variierenden Bezeichnungen angesprochen, z.B. als vertikale Modellstrukturierung oder als "top down"-Ansatz. Vgl. zur Bevorzugung solcher vertikaler oder hierarchischer Strukturierungs- oder Verfeinerungskonzepte RAUBOLD (1972), S. 211; BERNSTEIN (1973), S. 45; NOE (1975a), S. 3f.; LOCKEMANN (1975), S. 5; HOLT, A. (1976), S. 139; MOALLA (1977), S. 89f.; ZACHARIADES (1977), S. 1.2; JORDAN (1978), S. 8 u. 11ff.; SCHUMACHER (1978), S. 2 u. 18; JACKSON, M. A. (1979), S. 13; DEVY (1979), S. 49; LAUER (1979), S. 151; STEINKE (1980), S. 65 u. 69; YOELI (1982b), S. 1; DIRUF (1983), S. 239 u. 242; DIRUF (1984), S. 125; DITTRICH, G. (1989b), S. 4f. u. 12; BEKHI (1989), S. 245; PAGNONI (1990), S. 52ff. u. 171; TEMPELMEIER, T. (1990), S. 37ff.; THOME, R. (1990), Abschnitt K 3.1, S. 1f.; FEHLING (1990a), S. 1; ABEL, D. (1990), S. 45; VON MARTIAL (1991a), S. 314. Vgl. darüber hinaus die Anmerkungen zur hierarchischen Modellverfeinerung, die im Kontext von Kanal/Instanz-Netzen erfolgten.

50) Die hierarchische Verfeinerung von Modellen wird im wesentlichen aus zwei Gründen empfohlen. Der erste bezieht sich auf den Prozeß der Modellkonstruktion. Aus dieser Perspektive gilt die hierarchische Vorgehensweise als ein "bewährtes" oder "effektives" Mittel zur Bewältigung komplexer Modellierungsaufgaben. Vgl. z.B. SCHUMACHER (1978), S. 2; SIMON, H. (1990), S. 12; PAGNONI (1990), S. 52. Der hierarchische Konstruktionsprozeß

entspreche einerseits einem typischen menschlichen Kognitionsmuster. Bei ihm werde ebenso von abstrakten, groben Annäherungen an Aufgaben ausgegangen, um zu immer konkreteren und verfeinerten Behandlungen der gleichen Aufgabe voranzuschreiten. Andererseits erlaube das hierarchische Vorgehen, auf jeder Hierarchiestufe die vorgegebene Aufgabe so detailliert zu behandeln, wie es das gerade noch bewältigte Komplexitätsniveau ermöglicht. Der zweite Grund, der zugunsten der hierarchischen Modellverfeinerung spricht, knüpft an das *Ergebnis* der Modellkonstruktion an. Aus diesem Blickwinkel bietet ein hierarchisch strukturiertes Modell den Vorzug, das gleiche Modellierungsobjekt auf verschiedenen Abstraktions-, Detaillierungs- oder Präzisierungsebenen repräsentieren zu können. Auf diese Weise wird ein zusätzlicher Freiheitsgrad bei der Objektrepräsentation eröffnet. Vgl. ZENTES (1976), S. 33; NOE (1977), S. 2; PAGNONI (1990), S. 53 (ansatzweise); vgl. auch die Anmerkungen zur Adaptivität. Die komplementäre Vergrößerung von Modellen wird dagegen seltener herausgestellt. Zu den wenigen Beiträgen, die sich intensiv mit der Konstruktion von Grobmodellen (verdichteten Modellen) befassen, gehören z.B. SCHEER (1976), S. 52ff.; DIRUF (1980b), S. 421ff.; WITTEMANN (1985), S. 62ff.; WINTER,RO. (1991), S. 16ff. u. 255ff. (dort als "Abstraktion" thematisiert), insbesondere S. 40ff., 73ff. (detaillierter Anforderungskatalog) u. 266ff. Auch im Kontext des Petrinetz-Konzepts finden sich nur wenige Arbeiten, die auf Vergrößerungen von Netzmodellen intensiv eingehen. Dies mag daran liegen, daß sich Netzvergrößerungen nicht dazu eignen, die frühen Phasen der Modellkonstruktion zu unterstützen. Denn sie kommen nur für die nachträgliche Bearbeitung von bereits vorliegenden Netzmodellen in Betracht. Dies trifft z.B. auf Netzvergrößerungen durch Netzmorphismen zu. In ähnlicher Weise lassen sich Netzmodelle durch nachträgliche Verdichtung vergrößern. Auf solche Verdichtungsmöglichkeiten wurde schon früher anhand eines Beispiels zur Netzkompaktifizierung eingegangen. Darauf wird in diesem Kapitel noch einmal kurz zurückgekommen. Die Kompaktheit von Netzmodellen spielt auch in einem der nächsten Kapitel eine Rolle, wenn einzelne Aspekte der Benutzerfreundlichkeit des Petrinetz-Konzepts beleuchtet werden. Schließlich wurden Netzvergrößerungen ebenso schon gestreift. Dabei ging es um vereinfachte Modellverifizierungen mit der Hilfe von schrittweisen Modulvergrößerungen. Über die vorgenannten dispersen Aspekte hinaus lassen sich aber keine herausragenden Beiträge des Petrinetz-Konzepts zur Modellvergrößerung erkennen. Daher wird auf Netzvergrößerungen im folgenden nicht gesondert eingegangen. Vgl. statt dessen zu allgemeinen - aber meist recht knappen - Würdigungen der Möglichkeit, Netzmodelle zu vergrößern, HERZOG, O. (1973), S. 4; AGERWALA (1978a), S. 149; HAN (1979), S. 271; PETRI, C. (1979b), S. 69; ROSENSTENGEL (1979), S. 14; AGERWALA (1979), S. 85; WINAND (1980), S. 1252; OBERQUELLE (1980), S. 505; PERL (1980), S. 11.1; REISIG (1983a), S. 309; DITTRICH, G. (1989b), S. 6; PAGNONI (1990), S. 178f. (S. 178: "shorthands"); ROSENSTENGEL (1991), S. 34ff., 80f. u. 131f.

51) Vgl. zur hierarchischen Verfeinerungsmöglichkeit von Netzen, zur netzgestützten Modellierung auf verschiedenen Abstraktions- oder Detaillierungsebenen, zum hierarchischen Aufbau von Netzmodellen u.ä. NOE (1971), S. 366; RAUBOLD (1972), S. 212; PETRI, C. (1976b), S. 1; PETERSON, J. (1977), S. 230f.; PETRI, C. (1977a), S. 132; AGERWALA (1978a), S. 149 u. 152; VALETTE (1978b), S. 196f.; EGGERT (1978), S. 39; ROSENSTENGEL (1979), S. 14; PETRI, C. (1979b), S. 69; DEVY (1979), S. 44; HAN (1979), S. 270f.; AGERWALA (1979), S. 85; PAKAS-SKEWES (1979), S. VII u. 9; OBERQUELLE (1979a), S. A.1; SHAPIRO, R. (1979), S. 109 u. 111ff.; VALETTE (1979a), S. 43f. (dort tritt allerdings der Aspekt hierarchischer zugunsten schrittweiser Verfeinerung in den Hintergrund); WINAND (1980), S. 1252; STARKE (1980), S. 0f.; OBERQUELLE (1980), S. 488ff. u. 505; PERL (1980), S. 11.1; MEKLY (1980), S. 422; BRETSCHNEIDER (1980a), S. 24f.; BRETSCHNEIDER (1980c), S. 41f.; BRETSCHNEIDER (1980d), S. 24f.; PETERSON, J. (1981), S. 41; KRÄMER (1981), S. 468; REISIG (1983a), S. 312 i.V.m. S. 309ff. sowie S. 313ff.; RICHTER, G. (1983b), S. 212; IGEL (1986b), S. 1, 3ff. u. 7ff.; GENRICH (1988b), S. 240 u. Abb. 5 auf S. 241 (dort als "Refinement and Abstraction" von Netzknoten); DITTRICH, G. (1989b), S. 4ff.; BEKHI (1989), S. 246; PAGNONI (1990), S. 173ff.; FEHLING (1990a), S. 1ff., insbesondere S. 14ff. (mit einem durchgängig formalisierten Konzept für hierarchische Netzverfeinerungen); ABEL, D. (1990), S. 45ff. u. 55ff.; FEHLING (1990b), S. 4ff.; VON MARTIAL (1991a), S. 312ff. u. 321ff.; ROSENSTENGEL (1991), S. 35f., 80f. u. 100; SCHEER (1991d), S. 130; ESCHENBACHER (1991), S. 223; KIEBLER (o.J.), S. 7 u. 40.

Einen besonderen Aspekt hierarchischer Modellverfeinerungen beleuchtet KRÄMER (1981), S. 468f. Er hebt hervor, daß sich mit Petrinetzen auch polyhierarchische Systemstrukturen modellieren lassen. In einem polyhierarchischen Netzmodell koexistieren mehrere verschiedene, unabhängig voneinander eingeführte Verfeinerungshierarchien. Jede Verfeinerungshierarchie ist aus einem speziellen Blickwinkel hervorgegangen, aus dem die Modellverfeinerung betrieben wurde. Als hierarchiekonstituierende Verfeinerungsperspektiven kommen z.B. in Betracht (vgl. KRÄMER (1981), S. 468):

- entweder eine struktur- oder aber eine verhaltensorientierte Systembetrachtung;
- eine Konzentration auf entweder materielle Güter- oder aber immaterielle Informationsflüsse;
- eine Ausrichtung an den Modellierungsinteressen von Modellauftraggebern, Modellierungsausführenden, Modellbenutzern oder Projektmanagern, denen die Koordinierung von Modellierungsprojekten übertragen ist.

Ein anschauliches Beispiel für solche polyhierarchischen Modellverfeinerungen bietet die Abb. 6 bei KRÄMER (1981), S. 469. Im folgenden wird darauf aber nicht näher eingegangen, weil die simultane Modellierung verschiedener Verfeinerungshierarchien in dieser Arbeit keine Rolle spielt. So wurde die Fokussierung auf die Modellierung von Systemverhaltensweisen schon dargelegt. Unterschiedliche Verfeinerungshierarchien für materielle Güter- und immaterielle Informationsflüsse wurden in der Fallstudie bewußt vermieden, damit in den Netzmodulen stets beide

Flußarten benutzt werden konnten. Eine Differenzierung zwischen Modellierungsinteressen wurde ausgeklammert, weil "der" Modellierungsträger stets als eine homogene Einheit behandelt wird.

52) Die hierarchischen Verfeinerungsmöglichkeiten von *anderen* Netzklassen spielen für die hier vorgelegte Beurteilung aufgrund der früheren Festlegungen keine Rolle. Sie werden daher im folgenden nicht weiter gewürdigt. Es wird lediglich in den anschließenden Anmerkung auf einige solcher Beiträge kurz hingewiesen.

53) Zu den seltenen Ausnahmen, die sich mit einer systematischen Verfeinerung von Netzen befassen, zählen die Beiträge von REISIG (1983a), S. 309ff.; DITTRICH,G. (1989b), S. 5ff. PAGNONI (1990), S. 173ff.; FEHLING (1990a), S. 14ff.

Aber die Verfeinerungskonzepte aus den vorgenannten Quellen lassen sich auf die hier interessierenden Stelle/Transition-Netze oder Synthetischen Netze grundsätzlich nicht anwenden. Auf die besonderen Einschränkungen der Kontrollnetze von PAGNONI wurde bereits eingegangen. REISIG befaßt sich ausschließlich mit Kanal/Instanz-Netzen. Aus den Netzdefinitionen von DITTRICH,G. (1989b), S. 5, und FEHLING (1990a), S. 4, geht hervor, daß sich die beiden Autoren auf Allgemeine Netze beschränken. Sofern von Netzanschriften abgesehen wird, lassen sich die Allgemeinen Netze als unmarkierte Kanal/Instanz-Netze auffassen. Auf diesen Applikationsbereich bezieht DITTRICH,G. (1989b), S. 5, sein Verfeinerungskonzept ausdrücklich.

54) Dies wird besonders von DITTRICH,G. (1989b), S. 5, beklagt: "Für die hierarchische Systemmodellierung mit Petrinetzen fehlen ... Konstruktionsverfahren." Im Anschluß an diese Feststellung zählt DITTRICH eine Vielzahl von Verfeinerungsoptionen auf, die für Petrinetze grundsätzlich in Betracht kommen, für deren systematische Anwendung jedoch im allgemeinen keine konkreten Anleitungen bestehen. Vgl. ebenso DITTRICH,G. (1989b), S. 8.

55) Es wird nicht bestritten, daß im Rahmen von Stelle/Transition-Netzen des öfteren Verfeinerungsmöglichkeiten skizziert werden, die sich nicht auf Netzmorphismen stützen. Aber es handelt sich nur um unausgereifte, informale Andeutungen. Ein systematisch ausgearbeitetes Konzept für Netzverfeinerungen, daß die Verfeinerungsoperationen präzise definiert und dabei nicht auf Netzmorphismen Bezug nimmt, ist dem Verf. dagegen im Kontext von Stelle/Transition-Netzen noch nicht aufgefallen.

56) Besonders deutlich wird der Einsatz von Netzmorphismen zum Zwecke der Netzverfeinerung bei FEHLING (1990a), S. 6ff. u. 14ff. Allerdings bezieht er sich nicht auf Stelle/Transition-Netze, sondern auf Allgemeine Netze.

57) In analoger Weise läßt sich zwischen informationsverringernenden und informationstransformierenden Netzvergrößerungen unterscheiden. Den Regelfall stellen die informationsverringernenden Vergrößerungsformen dar. Bei ihnen wird aus einem Feinnetz durch Abstraktion von Unwesentlichem ein weniger umfangreiches Grobnetz gewonnen. Diese abstrahierende Vergrößerung liegt auch den Quellen zugrunde, die in einer früheren Anmerkung zur Vergrößerung von Netzmodellen genannt wurden. Dagegen erfolgt eine informationstransformierende Netzvergrößerung bei Kompaktifizierungen, bei denen sich der Informationsgehalt der Netzmodelle über die repräsentierten Modellierungsobjekte überhaupt nicht ändert. Statt dessen werden lediglich Niedere Netze oder weniger kompakte Höhere Netze durch Erzeugen von Marken(sub)farben und Schaltmodi in kompaktere Höhere Netze transformiert. Bei dieser Kompaktifizierung nimmt die Stellen- und Transitionenanzahl streng monoton ab. Daher werden Informationsinhalte, die zuvor in der Netztopologie enthalten waren, in die Repräsentationsformen von Marken(sub)farben oder Schaltmodi transformiert. Dabei erfolgt keine Abstrahierung von Unwesentlichem, weil alle topologisch untergegangenen Informationen in den zusätzlichen Marken(sub)farben und Schaltmodi bewahrt werden. Allerdings kann wegen der abnehmenden Knotenanzahl der kompakteren Netze hinsichtlich ihrer topologischen Netzstruktur in der Tat von einer "Vergrößerung" gesprochen werden. Die Vergrößerung kann sogar so weit gehen, daß ein maximal kompaktifiziertes Netz mit nur noch einer Stelle und nur noch einer Transition resultiert.

58) Für die dritte denkmögliche Verfeinerungsoption, die sich auf die Kanten eines Netzmodells erstreckt, sieht der Verf. keine Realisierungsansätze. Sie wird daher im folgenden nicht weiter beachtet. Alle vorgenannten Verfeinerungsweisen beziehen sich nur auf die "einfachen" Netzkomponenten der Marken, Knoten und Kanten. Darüber hinaus kommen aber noch weitere Verfeinerungsalternativen in Betracht, die sich auf Teilnetze als zusammengesetzte Netzkomponenten beziehen. Als pars pro toto wird auf die frühere Konstruktion eines Teilnetzes für eine zentrale Systemuhr verwiesen. Dort wurde abschließend ein Grobnetz präsentiert, das die zentrale Systemuhr nur noch als eine 1-Schleife modelliert. Dieses Grobnetz kann durch eines der vorangehenden detaillierten Teilnetze ersetzt werden. Dadurch wird das Grobnetz der zentralen Systemuhr auf eine Weise verfeinert, die nicht durch die nachfolgend erläuterten marken- und knotenbezogenen Netzverfeinerungen abgedeckt wird. Infolgedessen besitzen die anschließenden Ausführungen zur Verfeinerung von Synthetischen Netzen nur exemplarischen Charakter. Sie heben diejenigen Verfeinerungsoptionen hervor, die wegen ihrer Anknüpfung an einfachen Netzkomponenten besonders anschaulich sind.

59) Dies läßt sich z.B. nutzen, um ein Adreßattribut, das sich zunächst nur auf die Angabe eines Stadtnamens bezog, nachträglich durch Subattribute zu verfeinern, die sich neben dem Stadtnamen auch auf Postleitzahl, Straßename und Hausnummer erstrecken.

60) Verfeinerungsanforderungen, die mit den hier thematisierten eng verwandt sind, finden sich auch bei PAGNONI (1990), S. 173 (in Verbindung mit ihren Netzmodulen auf S. 171f.); ABEL, D. (1990), S. 45 u. 47f.

61) Weitere Konstruktionsregeln kommen hinzu. Sie legen fest, wie die Knoten des Subnetzrands mit den Knoten aus der ehemaligen Nachbarschaft des Makroknotens verbunden werden. Bei der Verfeinerungsvariante, die kurz zuvor erwähnt wurde, entfallen diese Verbindungsregeln per constructionem. Dort sorgt die Konstruktionsregel, daß ein stellenberandetes Teilnetz nur durch ein Subnetz mit identischem Stellenrand verfeinert werden darf, von selbst für eine korrekte Knotenverknüpfung. Denn der Stellenrand eines Subnetzes, das ein Teilnetz mit einer Makrotransition in seinem Innern verfeinert, fällt per constructionem mit den Knoten aus der Nachbarschaft der verfeinerten Makrotransition exakt zusammen. Eine andere Konstruktionsregel erstreckt sich auf die Verwendung von Synchronisationsstellen, die dafür sorgen, daß sich ein Subnetz für die Verfeinerung einer Makrotransition nach außen hin wie eine atomare Transition verhält. Dies wurde bei der Konstruktion von Netzmodulen, aus denen die Netzrepräsentation eines Algorithmus für die Konstruktion von Erreichbarkeitsgraphen aufgebaut wurde, besonders deutlich.

62) Daneben läßt sich auch daran denken, das Schaltverhalten einer Transition durch die Ergänzung von Nebenbedingungen oder durch die Einführung eines "Schaltgedächtnisses" zu erweitern. In beiden Fällen wird der betroffene transitionsartige Knoten des Grobnetzes durch ein Subnetz verfeinert, das neben diesem transitionsartige Knoten einen zusätzlichen stellenartigen Knoten umfaßt. Denn einerseits lassen sich Stellen zur Repräsentation von Nebenbedingungen verwenden, wenn sie mit ihren zugehörigen Transitionen entweder in 1-Schleifen eingebettet sind oder aber durch entsprechende Informationskanten verknüpft werden. Andererseits können auf einer Stelle, die mit einer Transition verknüpft ist, Kopien der Basismarke gesammelt werden, um über die Anzahl vergangener Schaltakte derselben Transition zu informieren. Durch einen verfeinernden Übergang zu Kopien einer Attributmarke ist es darüber hinaus möglich, das zurückliegende Schaltverhalten der Transition durch entsprechende Attributausprägungen zu dokumentieren. Auf beide Weisen wird ein Schaltgedächtnis realisiert, daß den nächsten Schaltakt der betroffenen Transition zu beeinflussen vermag. Beispielsweise läßt sich die Stelle "Variable" aus dem Netz der Abb. 126 als ein gemeinsames Schaltgedächtnis der zwei Mikrotransitionen pr_1 und pr_2 interpretieren. Denn die aktuelle Belegung dieser Stelle mit einer Attributmarkenkopie informiert darüber, welche Wertzuweisung durch den jeweils letzten Schaltakt einer der beiden Mikrotransitionen vorgenommen worden ist. Auf eine weitere Möglichkeit für Schaltgedächtnisse von Transitionen wurde in einer früheren Anmerkung hingewiesen, als die Eigenarten Stochastischer Netze erörtert wurden.

63) Eine Ausnahme stellen die Netzentfaltungen dar, die als Rücktransformationen von vorangegangenen Netzkompaktifizierungen erläutert wurden. Durch diese Entfaltungen steigt die Anzahl der Stellen und Transitionen im entfalteten Netz - im Vergleich zu seinem kompakteren Vorgänger - streng monoton an. Daher kann hinsichtlich der topologischen Netzstruktur durchaus von einer "Verfeinerung" die Rede sein. Allerdings wird hierdurch der Informationsgehalt des betroffenen Netzmodells nicht vermehrt. Denn die Entfaltung des kompakteren Netzes geht mit einer Reduzierung seiner Marken(sub)farben oder Schaltmodi einher. Daher werden lediglich Informationen von einer farb- und schaltbezogenen Repräsentationsform in eine topologische Erscheinungsweise transformiert. Im folgenden wird auf diesen Spezialfall der informationstransformierenden Netzverfeinerung nicht weiter eingegangen.

64) Anhand eines transitionsartigen Makroknotens mit komplexer Verknüpfungslogik wurde demonstriert, welche weiterführenden Anforderungen von einem verfeinernden Subnetz erfüllt werden müssen, um das intendierte Schaltverhalten des Makroknotens korrekt wiederzugeben. Dies wurde hinsichtlich der Permissivitäts- und Simultaneitätsdefekte von vorläufig konstruierten Subnetzen aufgezeigt, die sich nachträglich durch verbesserte Subnetzkonstruktionen heilen ließen.

65) Die gleiche Verfeinerungsstrategie, die auf einem systematischen Einsatz von Makroknoten und Subnetzen beruht, findet sich auch bei PAGNONI (1990), S. 173ff.; ABEL, D. (1990), S. 45ff.

66) Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, daß jedes Subnetz als ein Netzmodul aufgefaßt werden kann, das seinen Makroknoten verfeinert. Der Subnetzrand läßt sich dann ebenso als Schnittstelle oder "Oberfläche" des Subnetzes begreifen. Aus diesem Blickwinkel leistet die hierarchische Verfeinerung von Netzmodellen einen weiteren Beitrag zur Modularität des Petrietz-Konzepts. Allerdings wird jetzt nicht mehr die - sonst vorherrschende - horizontale Perspektive der Modellsegmentierung und Modulverknüpfung eingenommen. Vielmehr rückt nun die vertikale Einführung von Netzmodulen mit verfeinerndem Charakter in den Vordergrund. Es wird darauf verzichtet, diese Vertikalisierung des modularen Modellentwurfs weiter zu verfolgen. Denn diese Sichtweise wird im Zusammenhang mit hierarchischen Modellverfeinerungen kaum vertreten. Statt dessen wird - wenn überhaupt - eher die entgegengesetzte Position bezogen. Sie beruht auf der Gegenüberstellung von "top down"- und "bottom up"-Ansatz. Vgl. zu ihrem konträren Verhältnis z.B. VALETTE (1983), S. 265; THOME, R. (1990), Abschnitt K 3.1, S. 1f., oder SCHBER (1991d), S. 139. Die hierarchische Modellverfeinerung ist ein typischer Vertreter der "top down"-Vorgehensweise. Beide werden daher auch oftmals miteinander identifiziert. Modulare Modellentwürfe werden dagegen zumeist zum "bottom up"-Ansatz gerechnet. Dabei steht die Vorstellung im Hintergrund, daß aus einfachen Modulen immer komplexere Modelle "auf"gebaut werden. Vgl. dazu auch die "bottom up"-Verifizierung modularer

Modellentwürfe, die in einer früheren Anmerkung erwähnt wurde. Aus dieser Perspektive trifft es durchaus zu, daß hierarchische Modellverfeinerung und modularer Modellaufbau entgegengesetzt verlaufende Konstruktionsweisen darstellen. Allerdings wird dabei die oben angesprochene Möglichkeit übersehen, daß sich die Einführung von Netzmodulen ebenso mit einer hierarchischen Verfeinerung von Netzmodellen vereinbaren läßt. Daher ist SCHEER (1991d), S. 139, zuzustimmen, der "top down"- und "bottom up"-Ansatz als gleichberechtigte Alternativen für die modulare Strukturierung von (Software-)Systemen behandelt.

67) Dies kommt der Forderung nach Wohldefiniertheit oder Kohärenz entgegen, die von den Ebenen eines hierarchischen Modellentwurfs erfüllt werden soll. Vgl. zu diesem Postulat HOLT, A. (1976), S. 139; MOALLA (1977), S. 90. Am Rande wird darauf verwiesen, daß die Wohldefiniertheit des Zusammenhangs zwischen den Modellebenen dem allgemeinen Kohärenzdenken entspricht, das in der Rahmenlegung eingeführt wurde.

Auf die vertikale Verknüpfung von Teilnetzen, die zu verschiedenen Ebenen eines hierarchisch verfeinerten Netzmodells gehören, wird nur selten explizit eingegangen. Zu den Ausnahmen zählt z.B. ABEL, D. (1990), S. 45f., mit zwei anschaulichen Beispielen auf S. 46. Auch RICHTER, G. (1983b), S. 212f., spricht von der Verknüpfbarkeit der Abstraktionsebenen eines Netzmodells. BEKHI (1989), S. 246, betont, daß sich zwischen den Ebenen eines Netzmodells ein Konsistenzzusammenhang wahren läßt. DEVY (1979), S. 43, stellt den Vorzug des Petrinetz-Konzepts heraus, die Synchronisation von Teilnetzen zu erlauben, die zwar auf verschiedenen Hierarchieebenen angesiedelt sind, aber an gemeinsamen Schnittstellen in der Vertikalen aneinanderstoßen. Dagegen äußert sich VALETTE (1983), S. 265, skeptischer. Sein Einwand läuft darauf hinaus, daß die vertikale Verknüpfung zwischen Teilnetzen auf verschiedenen Hierarchieebenen weitaus schwieriger zu gestalten sei, als es für die horizontale Verknüpfung zwischen den Komponenten (Netzmodulen) eines Netzes auf derselben Hierarchieebene möglich ist. Dem widerspricht der Verf. keineswegs. Denn die wechselseitige Koordinierung von horizontal verknüpften Netzmodulen kann durch Markenkopien geschehen, die an gemeinsamen Schnittstellen ausgetauscht oder zur Kenntnis genommen werden. Dabei wird ausschließlich auf Markierungen und Schaltregeln Bezug genommen, die zum "normalen" Konstruktbereich nahezu aller Varianten des Petrinetz-Konzepts gehören. Nur Netzklassen, in denen Marken überhaupt nicht definiert sind, scheiden aus. Dazu gehören z.B. die Allgemeinen Netze. Die vertikale Verknüpfung von Teilnetzen, die zu unterschiedlichen Hierarchieebenen zählen, kann dagegen nicht auf Markierungen und Schaltregeln zurückgeführt werden. Statt dessen sind spezielle Konstruktionen erforderlich, wie z.B. jene, auf die in der voranstehenden Anmerkung hingewiesen wurde.

68) Vgl. ABEL, D. (1990), S. 45. Auf die Verwendung mehrerer Hierarchieebenen wurde in der Fallstudie vor allem bei der Modellierung des Transportsystems und von Bearbeitungsstationen ausführlich zurückgegriffen.

Die Wahlfreiheit der Stufenanzahl beruht auf dem Umstand, daß sich die Ersetzung von Makroknoten durch Subnetze auf jeden Knoten eines Netzes anwenden läßt. Es spielt dabei keine Rolle, ob der Knoten von Anfang an als ein Makroknoten ausgezeichnet wurde, ob er als Mikroknoten aus einer früheren Netzverfeinerung hervorgegangen ist oder ob er nur als "gewöhnlicher" Netzknoten vorliegt. Denn jeder Knoten kann nachträglich als ein Makroknoten interpretiert werden, um ihn einer Verfeinerung zugänglich zu machen. Daher kann die Verfeinerungsoperation, bei der ein (Makro-)Knoten durch ein Subnetz ersetzt wird, ebenso auf einen Knoten aus dem Ergebnis der Operationsausführung - also auf einen Knoten aus dem verfeinernden Subnetz - angewandt werden. Daher besitzt die Verfeinerungsoperation einen rekursiven Charakter. Vgl. dazu den Begriff rekursiver Verfeinerung bei RAUBOLD (1972), S. 211; PETRI, C. (1979c), S. 83; ABEL, D. (1990), S. 45 (allerdings nur für den Sonderfall, daß ein Subnetz durch ein Subnetz derselben Art weiterverfeinert wird). Vgl. auch die Erläuterungen zu rekursiven und induktiven Konstrukten. Im Sinne der dort getroffenen Vereinbarungen stellt die Verfeinerungsoperation strenggenommen ein induktives Konstrukt dar. Aber es wurde dort auch erwähnt, daß induktive und rekursive Konstruktionen das gleiche Phänomen der Selbstbezüglichkeit nur von zwei unterschiedlichen Richtungen her angehen. Daher wird hier darauf verzichtet, den etablierten Begriff rekursiver Verfeinerung durch den eigentlich gemeinten induktiven Verfeinerungsbegriff zu ersetzen.

69) Abstraktions- und Detaillierungsniveau werden hier als entgegengesetzte Wahrnehmungsrichtungen für das gleiche Phänomen einer hierarchisch verfeinerten Modellierung behandelt: Das Abstraktionsniveau sinkt, je tiefer in der Modellierungshierarchie hinabgeschritten wird; zugleich steigt das Detaillierungsniveau entsprechend an. Detaillierungs- und Präzisionsniveau werden als synonyme Begriffe verwendet.

70) Diese Auswahlfreiheit wird seitens der Netzplantechnik im allgemeinen nicht zugelassen. Statt dessen ist dort nur die Verwendung von höchstens zwei Hierarchieebenen üblich. Auf der unteren Ebene wird ein gewöhnlicher, flacher Netzplan konstruiert. Aus ihm kann ein Meilenstein-Netzplan abgeleitet werden, der die obere Hierarchieebene bildet. Zwar werden mitunter mehr als zwei Hierarchieebenen angedeutet. Dies bleibt aber auf informale Skizzen beschränkt, die im Rahmen der Netzplantechnik bisher nicht systematisch ausgebaut worden sind.

71) Eine ähnliche Spannweite von Abstraktionsniveaus bei hierarchisch verfeinerten Modellierungen spricht auch HURA (1982c), S. 433, an.

72) Der Homogenitätsaspekt klingt auch an bei DITTRICH, G. (1989b), S. 4: "Ohne die Methodik und Beschreibungssprache zu wechseln, ist eine phasenübergreifende Modellierung möglich".

73) Vgl. BEKHI (1989), S. 246 ("... at each level of description, the consistency of properties between different ... descriptions is maintained.").

Ein Konzeptionsbruch liegt dagegen z.B. im Rahmen der Netzplantechnik vor, wenn zwischen der unteren Ebene eines flachen Netzplans und der oberen Ebene eines Meilenstein-Netzplans gewechselt wird. Denn die formalen Auswertungstechniken für Netzpläne, die z.B. die Ermittlung von Terminen und Pufferzeiten gestatten, lassen sich nur auf der unteren Netzplanebene anwenden. Für die obere Meilensteinebene sind diese Auswertungstechniken überhaupt nicht definiert. Statt dessen können dort nur Auswertungsergebnisse übernommen werden, die auf der unteren Netzplanebene gewonnen wurden. Darüber hinaus erfolgt ein weiterer Konzeptionsbruch, sobald der flache Netzplan der unteren Ebene nicht zur Klasse der Ereignisknoten-Netzpläne gehört. In diesem Fall bedeutet der Übergang von der unteren Netzplanebene zur oberen Meilensteinebene einen Wechsel zwischen inkompatiblen Netzplanklassen. Denn ein Meilenstein-Netzplan ist per constructionem ein Ereignisknoten-Netzplan. Ein weiterer Konzeptionsbruch geschieht beim Übergang von Kanal/Instanz-Netzen zu Synthetischen Netzen.

74) Diese Option gilt auch für Stelle/Transition-Netze. Sie wird hier aber nur für Synthetische Netze beleuchtet. Die Vorgehensweise, zunächst eine grobe informale Modellierung durch Kanal/Instanz-Netze vorzunehmen, bevor zur Modellierung durch vollständig formalisierte Netzklassen übergegangen wird, findet sich auch in besonders deutlicher Ausprägung bei REISIG (1983a), S. 310f.

Darüber hinaus hat PETRI, C. (1980a), S. 6, als einen allgemeinen Anspruch des Petrinetz-Konzepts formuliert: "Interconnection between many conceptual 'levels'". Die konzeptionellen Ebenen bilden eine vielstufige Modellierungshierarchie, die auf S. 10f., insbesondere in Fig. 5 auf S. 11, näher ausgeführt wird. In diesem Mehrebenenkonzept kommen auch die Kanal/Instanz-Netze vor, und zwar auf einer der obersten Hierarchiestufen (vgl. Fig. 5).

75) Damit wird einer Forderung entgegengekommen, die von NOE (1977), S. 2, für Modellierungen des "top down approach" aufgestellt hat: Es solle möglich sein, von Grobmodellen auszugehen, die über reichhaltige informale Beschreibungsmittel verfügen und umgangssprachlich ausgerichtet sind. Danach sollten sukzessive Modellverfeinerungen zugelassen sein, die in zunehmendem Ausmaß die informalen Modellkomponenten durch präzise formale Darstellungsmittel ersetzen und dadurch auch quantitative Modelluntersuchungen erlauben.

Bei der Anwendung des Petrinetz-Konzepts liegt die Grobmodellierung durch Kanal/Instanz-Netze auf der Hand. Ebenso offensichtlich ist der Einsatz von Synthetischen Netzen, die eine vollständig formalisierte und quantitativ auswertbare Feinmodellierung gestatten. Lediglich die *sukzessive* Formalisierung von Netzmodellen harmoniert nicht vollständig mit NOE's Postulat. Denn der Übergang von Kanal/Instanz-Netzen zu Synthetischen Netzen bedeutet einen konzeptionellen Bruch, bei dem sich der Formalisierungsgrad *abrupt* ändert. Denn Synthetische Netze stellen von vornherein durchgängig formalisierte Konstrukte dar. Sie lassen sich direkt quantitativ auswerten. Nur innerhalb der Klasse von Kanal/Instanz-Netze ist eine schrittweise Zunahme des Formalisierungsgrads möglich. Dies kann dadurch geschehen, daß Anschriften von Netzkomponenten, die zunächst natürlichsprachlich verfaßt waren, bei einer Netzverfeinerung durch formalsprachlich definierte Anschriften ersetzt werden. Vgl. dazu den früheren Hinweis, der die sprachliche Offenheit der Anschriften von Kanal/Instanz-Netzen hervorhob. Allerdings erreichen Kanal/Instanz-Netze niemals eine vollständige Formalisierung, weil das Schaltverhalten ihrer Transitionen grundsätzlich nicht formal festgelegt wird. Daher verbleibt stets ein Formalisierungssprung beim Übergang von Kanal/Instanz-Netzen zu Synthetischen Netzen, der sich zumindest auf die Schaltregel erstreckt.

Es könnte der Einwand erhoben werden, daß auch in Synthetischen Netzen eine schrittweise zunehmende Formalisierung möglich sei. Zu diesem Zweck mag auf die Makroknoten mit komplexer Verknüpfungslogik verwiesen werden, deren Funktionsweise zunächst natürlichsprachlich beschrieben und erst danach durch verfeinernde Subnetze formal ausgedrückt wurde. Diese Vorhaltung verwechselt aber die didaktische Perspektive, das Konzept der Makroknoten in anschaulicher Weise einzuführen, mit der tatsächlichen Definition von Makroknoten. Denn jeder Makroknoten ist in einem Synthetischen Netz von vornherein vollständig formal definiert. Dabei kann auf zwei unterschiedliche Weise vorgegangen werden:

- Entweder wird ein Makroknoten als kompakte graphische Notation für das zugrundeliegende, verfeinernde Subnetz aufgefaßt. Der Makroknoten wird in diesem Fall durch sein vollständig formalisiertes Subnetz definiert. Ein solcher Makroknoten steht daher für die Verwendung in Netzmodellen erst dann zur Verfügung, wenn zuvor schon die formale Subnetzdefinition erfolgt ist.
- Oder die Funktionsweise des Makroknotens wird durch eine knotenspezifische, aber formalsprachlich verfaßte Schaltregel definiert. Dann braucht kein definitorischer Rückgriff auf ein verfeinerndes Subnetz zu erfolgen. Der Makroknoten kann sofort verwendet werden.

In dieser Arbeit wurde die erste, derivative Definitionsweise vorgezogen. Allerdings würde es keine Schwierigkeiten bereiten, die zunächst erfolgte, natürlichsprachliche Erläuterung der Funktionsweise eines Makroknotens in eine entsprechende formalsprachliche Definition der Makroknoten-Schaltregel zu übersetzen. Beispielsweise läßt sich die Schaltregel eines Makroknotens mit zwei adjunktiv verknüpften Eingangskanten durch eine einfache Fallunterscheidung definieren, die sich an den vier kombinatorisch möglichen Fällen aus der "Wahrheitstafel" für die logische Adjunktion von zwei atomaren Formeln ausrichtet. Auf analoge Weise kann für alle anderen Makroknoten mit komplexer Verknüpfungslogik vorgegangen werden.

76) Dies ändert aber nichts an den oben aufgelisteten Vorzügen der hierarchischen Modellverfeinerung, die auf Synthetischen Netzen basiert. Denn Kanal/Instanz-Netze gehören nicht mehr zur Klasse der Synthetischen Netze. Daher wird die Beurteilung Synthetischer Netze durch die *zusätzliche* Anwendung von Kanal/Instanz-Netzen nicht berührt.

9.2.2.2.1.2 Modellauswertung

Die Analysierbarkeit¹⁾ eines Modellierungskonzepts betrifft die Vielfalt der Auswertungsmöglichkeiten, die das Konzept für seine Modelle offeriert. Dieses Kriterium erschließt die analytische Dimension der Modellierungsgüte. Ihm wird eine ähnlich große Bedeutung wie der Ausdrucksmächtigkeit des Petrinetz-Konzepts eingeräumt. Denn das beträchtliche analytische Potential des Petrinetz-Konzepts ist weithin anerkannt²⁾. Dabei werden des öfteren unterschiedliche Facetten der Analysierbarkeit von Petrinetzen hervorgehoben³⁾:

- Einsichten in die Strukturen modellierter Objekte⁴⁾;
- Überprüfung dynamischer Systemeigenschaften⁵⁾;
- Studium des modellierten Objektverhaltens in Abhängigkeit von hypothetischen, verhaltensbeeinflussenden Entscheidungen ("What if"-Analysen)⁶⁾;
- Anwendbarkeit formaler mathematischer Auswertungstechniken⁷⁾, insbesondere auf Basis der Linearen Algebra⁸⁾, für die Gewinnung "strenger analytischer" Erkenntnisse⁹⁾.

In dieser Arbeit wurde das analytische Potential des Petrinetz-Konzepts in zwei verschiedenen Dimensionen entfaltet. Einerseits wurde ein Spektrum aus statischen und dynamischen Netzeigenschaften präsentiert. Andererseits wurden Auswertungstechniken vorgestellt, mit deren Hilfe untersucht werden kann, ob Netzmodelle die vorgenannten Eigenschaften erfüllen. Für das Studium von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen wurden folgende Eigenschaften von Netzmodellen ausführlicher behandelt:

- Beschränktheit¹⁰⁾, einschließlich der Untersuchung von Engpässen¹¹⁾;
- Deadlocks¹²⁾;
- Lebendigkeit¹³⁾;
- Livelocks¹⁴⁾;
- Finalität¹⁵⁾, d.h. Erreichung von Sachzielen;
- Optimalität¹⁶⁾, also extremale Erfüllung von Formalzielen;
- Terminieren¹⁷⁾;
- Robustheit;
- Promptheit, die sich als Vorstufe zur Analyse des Realzeitverhaltens eines Modells verstehen läßt;
- Reversibilität.

Hinzu kommt die Eigenschaft der Modellkonsistenz¹⁸⁾. Sie kann allerdings im strengen Sinne der prädikatenlogischen Widerspruchsfreiheit nur für deklarative Netzmodelle untersucht werden. Für die operationalen Netzmodelle, die in dieser Arbeit bevorzugt wurden, läßt sich aber immerhin noch eine schwächere Form der Modellkonsistenz überprüfen. Sie beruht auf der Einhaltung von Integritätsbedingungen.

Für die voranstehend aufgelisteten Netzeigenschaften wurde schon an früherer Stelle aufgezeigt, daß sie produktionswirtschaftlich interessante Einsichten in Netzmodelle vermitteln¹⁹⁾. Die Breite dieser Eigenschaftspalette unterstreicht bereits das herausragende analytische Potential des Petrinetz-Konzepts. Als aufschlußreich erweist sich auch ein Seitenblick auf die Modelleigenschaften, die im Rahmen im Rahmen von Netzplantechnik und OR-Programmen Beachtung finden. Dort dominiert ausschließlich der Aspekt der Optimalität²⁰⁾. Das Petrinetz-Konzept deckt diesen Gesichtspunkt zwar ebenso ab. Doch ermöglicht es darüber hinaus die Analyse weiterer Modelleigenschaften, die in den beiden vorgenannten Modellierungskonzepten weitgehend unbeachtet bleiben. Hinzu kommt noch die beachtliche Analysetiefe, die bei der Untersuchung von Modelleigenschaften erreicht werden kann. Dies wurde besonders deutlich im Rahmen der Ro-

bustheitsanalyse von Netzmodellen. Ihre Erkenntnisoptionen reichen deutlich über jene Fragestellungen hinaus, die sonst bei der Untersuchung von robusten Modellen thematisiert werden²¹⁾.

Die Klassen der Stelle/Transition-Netze, der Synthetischen Kernnetze und der Erweiterten Synthetischen Netze unterscheiden sich bei der Untersuchung der o.a. Netzeigenschaften nicht wesentlich²²⁾. Daher kommt ihnen gemeinsam ein "ausgezeichnetes" analytisches Potential zu, wenn die Dimension der auswertbaren Netzeigenschaften beurteilt wird. Ein differenzierteres Bild bietet sich dagegen bei der Betrachtung der zweiten Dimension der Analysierbarkeit, den Auswertungstechniken für Netzmodelle. Für die Untersuchung der Eigenschaften von Netzmodellen wurden vorgestellt:

- die Deduktionsanalyse,
- die Invariantenanalyse,
- die Reduktionsanalyse,
- die Erreichbarkeitsanalyse,
- die Simulationsanalyse.

Alle fünf Auswertungstechniken lassen sich auf Stelle/Transition-Netze ohne Schwierigkeiten anwenden. Für Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze kommen dagegen nur noch Erreichbarkeits- und Simulationsanalysen in Betracht. Denn die rigiden Einschränkungen, denen die drei erstgenannten Auswertungstechniken unterliegen, werden durch die Ausdrucksmächtigkeit Synthetischer Netze gesprengt. Die Deduktionsanalyse scheidet aus, sobald z.B. zugelassen wird, daß Transitionen mehrere, untereinander konjunktiv verknüpfte Ausgangskanten umfassen. Dann liegen operationale Netzmodelle vor, auf die sich die prädikatenlogischen Untersuchungskonzepte der Deduktionsanalyse nicht mehr anwenden lassen. Die Invariantenanalyse leidet schon bei "gewöhnlichen" Höheren Netzen unter erheblichen Schwierigkeiten. Werden sogar 1-Schleifen oder Informationskanten zugelassen, wie es schon bei Synthetischen Kernnetzen der Fall ist, kann die Invariantenanalyse überhaupt nicht mehr eingesetzt werden. Auf Schwierigkeiten der Invariantenanalyse wurde auch schon im Zusammenhang mit der Verifizierung von Netzmodellen eingegangen. Die Reduktionsanalyse ist bisher ohnehin nur für Stelle/Transition-Netze, zumeist sogar nur für Teilklassen von Stelle/Transition-Netzen, gearbeitet worden.

Es liegt nahe, die Analysierbarkeit von Synthetischen Kernnetzen und von Erweiterten Synthetischen Netzen negativ zu beurteilen, weil drei von fünf Auswertungstechniken auf diese beiden Netzklassen nicht angewendet werden können. Dieser Schluß wäre jedoch voreilig. Denn die Erreichbarkeitsanalyse reicht für beide Varianten Synthetischer Netze vollkommen aus, um alle oben vorgestellten Netzeigenschaften zu untersuchen, die für die Modellierung von Prozeßkoordinierungen von besonderem Interesse sind²³⁾. Folglich bietet es sich an, die Dimension des analytischen Potentials, die sich auf die verfügbaren Auswertungstechniken bezieht, in zwei Subdimensionen aufzuspalten.

Einerseits interessiert die Vielfalt von Auswertungstechniken, die sich im Rahmen einer Netzklasse einsetzen lassen. In dieser Hinsicht schneiden Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze wegen ihrer Beschränkung auf nur zwei Analysearten deutlich schlechter als Stelle/Transition-Netze ab. Denn Stelle/Transition-Netze gestatten die Anwendung aller fünf o.a. Analysearten. Allerdings unterliegen alle drei Netzklassen einer wesentlichen Einschränkung. Für keine von ihnen ist bis heute eine Sensitivitätsanalyse²⁴⁾ entwickelt worden²⁵⁾. Dies ist bedauerlich²⁶⁾. Denn aus produktionswirtschaftlicher Perspektive, vor allem auch aus dem Blickwinkel des Operations Research, gehören Sensitivitätsanalysen zu den Auswertungstechniken, die jedes Modellierungskonzept anbieten sollte²⁷⁾.

Andererseits kann aber auch die Analysefähigkeit jener Auswertungstechniken betrachtet werden, die sich auf eine Netzklasse anwenden lassen. Dabei werden als Maßstab der Analysefähigkeit die Netzeigenschaften zugrundegelegt, die mit Hilfe der einsetzbaren Auswertungs-

techniken untersucht werden können. Aus diesem Blickwinkel zeichnen sich Stelle/Transition-Netze wiederum durch die beste Beurteilung aus. Dieses Urteil ist trivial, weil Stelle/Transition-Netze ohnehin den Einsatz aller fünf Auswertungstechniken ermöglichen. Folglich kommt Stelle/Transition-Netzen auch die gesamte Analysefähigkeit dieser fünf Techniken zu. Doch Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze stehen kaum schlechter da. Denn ihre Erreichbarkeitsanalyse gestattet die Untersuchung aller zuvor angesprochenen, "besonders interessanten" Netzeigenschaften. Lediglich einige wenige Netzeigenschaften, die ausschließlich den drei nicht anwendbaren Auswertungstechniken zugänglich sind, können nicht analysiert werden. Davon sind aber nur solche Netzeigenschaften betroffen, die für die Modellierung praktischer Koordinierungsprobleme allenfalls "peripheres" Interesse besitzen²⁸⁾.

Im wesentlichen handelt es sich dabei nur um drei Eigenschaften von Netzmodellen, die mit der Hilfe von Synthetischen Netzen gestaltet worden sind. Erstens kann die Konsistenz von operationalen Netzmodellen im strengen prädikatenlogischen Sinn der Widerspruchsfreiheit nicht nachgewiesen werden²⁹⁾. Denn die Deduktionsanalyse, die hierzu erforderlich wäre, läßt sich auf operationale Netzmodelle grundsätzlich nicht anwenden³⁰⁾. Zweitens ist es für hierarchisch verfeinerte Netzmodelle im allgemeinen nicht möglich aufzuzeigen, daß bestimmte Netzeigenschaften von übergeordneten Grobnetzen bei ihrer Verfeinerung durch Subnetze notwendig aufrechterhalten werden³¹⁾. Zu diesem Zweck müßte auf die Netzmorphismen zurückgegriffen werden können, die im Rahmen der Reduktionsanalyse die Invarianz ausgezeichneter Netzeigenschaften garantieren. Die Netzmorphismen lassen sich aber - zumindest bis heute - weder auf Synthetische Kernnetze noch auf Erweiterte Synthetische Netze anwenden. Drittens können die S- und die T-Invarianten eines Netzmodells nicht ermittelt werden, wenn es einen unendlichen Erreichbarkeitsgraphen besitzt³²⁾. Dies wäre nur mit Hilfe der Invariantenanalyse möglich, die aber für Synthetische Netze ausgeschieden wurde.

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Vgl. zur Forderung nach Analysierbarkeit NOE (1975a), S. 5; ULLRICH (1976), S. 0.2 u. 0.6; ZACHARIADES (1977), S. 1.3; SCHUMACHER (1978), S. 18; VALETTE (1978a), S. 378; MOLLOY (1982), S. 914; VALETTE (1982c), S. 3; BEKHI (1989), S. 245 (indirekt als "formal means" einer "mathematical basis").
- 2) Vgl. PETRI,C. (1963), S. 386; PATIL (1971), S. 1; HACK,M. (1972), S. 2; LAUTENBACH (1974a), S. 187; ULLRICH (1974), S. 150; HACK,M. (1974b), S. 156; FERNANDEZ (1975), S. 1; HACK,M. (1975a), S. 13; HOLT,A. (1976), S. 146 u. 149; BERTHELOT (1976), S. 202; AZEMA (1976b), S. 109; MURATA,TA. (1976c), S. 36; PETRI,C. (1977a), S. 221; MURATA,TA. (1977a), S. 412; PETERSON,J. (1977), S. 238; BAUMERS (1977), S. 3; THIELER-MEVISSSEN (1977), S. 2; MURATA,TA. (1977c), S. 2; PETERSON,J. (1978a), S. 144; SZLANCO (1978), S. 75; HAN (1978a), S. 166; EGGERT (1978), S. 39; MOALLA (1978b), S. 374; AGERWALA (1978a), S. 149; VALETTE (1978b), S. 182; AGERWALA (1979), S. 85; GRIESE,W. (1979), S. 1; MURATA,TA. (1979a), S. 807; MEMMI (1979), S. 92; OBERQUELLE (1979a), S. A.1; JENSEN (1980b), S. 1; OBERQUELLE (1980), S. 505; PETERSON,J. (1981), S. IX; JENSEN (1981a), S. 1; HURA (1982c), S. 433 u. 438; HEINEMANN (1982), S. 187; HACKMANN (1982), S. 85; GIRAULT (1982a), S. 0.1; VIDAL-NAQUET (1982b), S. 41; MONTEL (1983a), S. 293; o.V. (1983c), S. 1; BEKHI (1989), S. 245; DITTRICH,G. (1989b), S. 4; BAUDIN (1990), S. 38; THOME,R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 5f.; ROSENSTENGEL (1991), S. 2 u. 5.
- 3) Die nachfolgenden Aspekte werden so vorgetragen, wie sie in den angeführten Quellen thematisiert sind. Deswegen läßt sich nicht vermeiden, daß sie sich partiell überschneiden. Z.B. können Struktureinsichten auch Erkenntnisse über die dynamische Struktur von modellierten Objekten bedeuten. Zumeist wird der Strukturbegriff in den Quellen aber nur auf statische Objektstrukturen bezogen.
- 4) Vgl. KRÄMER (1981), S. 461.
- 5) Vgl. BRETSCHNEIDER (1980a), S. 34; WINAND (1980), S. 1237 u. 1252f.; STAHLKNECHT (1982), S. 120; ROSENSTENGEL (1991), S. 2.
- 6) Vgl. WINAND (1980), S. 1252 (dort allerdings in der speziellen Variante von hypothetischen Ausgangssituationen); ROSENSTENGEL (1991), S. 46 u. 100. Vgl. zur Beantwortung von "What if"-Fragen durch die Auswertung von Netzmodellen die Ausführungen zu projektiven Simulationsanalysen.
- 7) Vgl. SCHROFF (1974), S. 1; AGERWALA (1978a), S. 149; JOHNSON,R.R. (1982), S. 75; SCHESCHONK (1982a), S. 104; HACKMANN (1982), S. 22.
- 8) Vgl. LOCKEMANN (1978), S. 79; AZEMA (1980), S. 604; MEKLY (1980), S. 422.
- 9) Bezugspunkt dieser Beurteilung sind im allgemeinen die simulativen Auswertungstechniken, denen nur ein "tendenzielles Herantasten" an Modelleigenschaften zugebilligt wird. Der Verf. möchte sich dieser Einschätzung jedoch nicht anschließen. Er hat an anderer Stelle dargelegt, daß auch durch Simulationen von Netzmodellen "strenge" Einsichten gewonnen werden können, die gewöhnlich nur von analytischen Auswertungstechniken erwartet werden. Dazu gehört vor allem die Ermittlung optimaler Schaltprozesse, die gestatten, daß vorgegebene Formalziele ihre erwünschten Maxima oder Minima annehmen.
- 10) Die Möglichkeit, die Beschränktheit - oder die Sicherheit - von Netzmodellen zu analysieren, wird z.B. betont bei ZACHARIADES (1977), S. 1.13; PETRI,C. (1980a), S. 1; WINAND (1980), S. 1252. Umgekehrt kann auch hervor gehoben werden, daß sich Netzmodelle hinsichtlich ihrer Unbeschränktheit untersuchen lassen; vgl. VALK (1983b), S. 3; VALK (1983c), S. 343.
- 11) Vgl. zur Forderung, Modellierungskonzepte sollten das Studium von Engpässen zulassen, VIEFHUES (1982), S. 148; TAYLOR,B. (1982), S. 854; vgl. auch ansatzweise MOALLA (1977), S. 90 (Beeinträchtigungen der Systemleistungsfähigkeit). Auf die Eignung des Petrinetz-Konzepts, Existenz und Ausmaß von Engpässen aufzuzeigen, HERZOG,O. (1973), S. 3; HAN (1978a), S. 166; PETRI,C. (1980a), S. 1.
Darüber hinaus wird auch die Forderung von VIEFHUES (1982), S. 148, erfüllt, die komplementäre Erkenntnis abundanter Kapazitätsvorhaltung müsse ebenso möglich sein.
- 12) Die Eignung des Petrinetz-Konzepts, Modelle hinsichtlich ihrer Deadlocks zu untersuchen, wird auch hervor gehoben bei: HERZOG,O. (1973), S. 3; STEWEN (1975), S. 463; ZAVE (1976), S. 35; HERZOG,O. (1976a), S. 297f.; HERZOG,O. (1976c), S. 130ff.; DEVY (1979), S. 44; STARKE (1980), S. 2; PETRI,C. (1980a), S. 1; WINAND (1980), S. 1252; BERTHELOT (1980a), S. 281ff.; AZEMA (1980), S. 602f.; GELENBE (1982), S. 223; HOLZMANN (1991), S. 184 u. 186; STAHLKNECHT (1991), S. 161.
Ebenso wird mitunter die eng verwandte Möglichkeit betont, die Existenz toter Transitionen zu erkennen; vgl. PETERSON,J. (1981), S. 90; VALK (1983b), S. 3; VALK (1983c), S. 343.
- 13) Vgl. zur positiven Würdigung des Sachverhalts, die Lebendigkeit von Netzmodellen analysieren zu können, WINAND (1980), S. 1252; THOME,R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 5.

14) Livelocks stellen zyklische Teilprozesse dar, die sich potentiell unendlich oft wiederholen lassen. Die Möglichkeit, mit Hilfe des Petrinetz-Konzepts zyklische Modellkomponenten aufzudecken, findet Beachtung bei NOE (1980c), S. 389; GRILL (1982), S. 42.

15) Dies könnte auch THOME,R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 6, mit seiner Feststellung meinen, daß sich Netzmodelle eignen, um das "Zielverhalten von Aktivitäten und Prozessen" zu überprüfen.

16) Vgl. THOME,R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 6 (siehe die voranstehende Anmerkung).

17) Diese Eigenschaft kann von Modellierungskonzepten, die auf vorherrschenden systemtheoretischen oder (prädikaten)logischen Problemkonzeptualisierungen beruhen, nicht überprüft werden; vgl. PNUELI (1979), S. 3. Denn die analytische Behandlung des Terminierens von Modellen erfordert eine konzeptionelle Anreicherung um Aspekte von temporalen oder modalen Logiken. Das Petrinetz-Konzept eignet sich dagegen vorzüglich, um das Terminieren von Netzmodellen zu untersuchen. Vgl. auch die Erläuterungen zur Modellierung temporaler Sachverhalte mit Petrinetzen. Vgl. ebenso die Hinweise auf modallogische Aspekte des Petrinetz-Konzepts. Daher besitzt das Petrinetz-Konzept hinsichtlich der Terminierungseigenschaft eine bemerkenswerte analytische Überlegenheit gegenüber zahlreichen konkurrierenden Modellierungskonzepten, die auf systemtheoretischer oder prädikatenlogische Basis beruhen. Dies klingt auch bei MELDMAN (1977), S. 33, an, wenn er Beiträge des Petrinetz-Konzepts für die Entwicklung einer dynamischen Logik hervorhebt.

18) Vgl. HRUSCHKA (1980a), S. 268 (im Kontext der Konsistenzprüfung von Software-Programmen).

19) Die produktionswirtschaftliche Relevanz der Netzeigenschaften wurde jeweils in denjenigen Kapiteln erläutert, in denen die Eigenschaften jeweils vorgestellt wurden. Daher kann der Ansicht von GRIESE,W. (1979), S. 1, nicht gefolgt werden: Er behauptet, daß sich durch die Untersuchung von Petrinetzen keine praktisch verwertbaren Ergebnisse erzielen ließen. Eine weniger radikale, aber immer noch geringschätzige Meinung vertritt HOLZMANN (1991), S. 185. Er glaubt, die analytische Kraft von Netzmodellen überstiege nicht die Auswertungsmöglichkeiten von endlichen Zustandsautomaten. Dabei übersieht er jedoch die Fülle der oben angesprochenen, produktionswirtschaftlich interessanten Netzeigenschaften. Beispielsweise werden alle Aspekte der Nebenläufigkeit von endlichen Zustandsautomaten nicht abgedeckt.

20) Vgl. dazu auch die kritische Erörterung des "Optimierungsdenkens".

21) Vgl. dazu einerseits die verschiedenen Robustheitsmaße und die Einbindung von Robustheitsaspekten in Erreichbarkeitsanalysen. Vgl. andererseits die "gewöhnlichen" Robustheitsuntersuchungen in den Quellen, die im Robustheitskontext angeführt wurden.

22) Ein Unterschied könnte allenfalls hinsichtlich der Promptheit von Netzmodellen gesehen werden. Denn ihre Untersuchung setzt voraus, daß einzelne Transitionen als Melde- und andere Transitionen als Anweisungstransitionen ausgezeichnet werden. Diese besonderen Transitionskategorien werden erst für Erweiterte Synthetische Netze als semantische Bereicherung vorgesehen. Allerdings zeigte bereits die Diskussion der Auswertungsmöglichkeiten, die für das Kernkonzept Synthetischer Netze bestehen, daß auch schon dort die Eigenschaft der Promptheit thematisiert werden kann. Dies ist sogar auch im Kontext von Stelle/Transition-Netzen möglich. Denn die Auszeichnung von Melde- und Anweisungstransitionen läßt sich im Prinzip für jede Netzklasse vornehmen, ohne ihre formale Netzdefinition zu verändern. Daher wird die Promptheitsanalyse von Netzmodellen hier nicht als Besonderheit von Erweiterten Synthetischen Netzen angesehen.

23) Daher wurde der Erreichbarkeitsanalyse von Netzmodellen in dieser Arbeit besondere Aufmerksamkeit zuteil.

24) Sensitivitätsanalysen werden hier als Untersuchungen darüber verstanden, in welchem Ausmaß sich eine Modelleigenschaft ändert, wenn Modellkomponenten variiert werden. Sensitivitätsanalysen beziehen sich also auf zwei Variablen: einerseits die Veränderung einer Modelleigenschaft und andererseits die Variation von Modellkomponenten. Je nachdem, welche von diesen beiden Variablen als Bezugspunkt gewählt werden, lassen sich zwei verschiedenartige Varianten der Sensitivitätsanalyse unterscheiden:

- Die komponentenorientierte Sensitivitätsanalyse untersucht für eine vorgegebene, nicht-leere Menge von Modellkomponenten, wie stark sich eine Modelleigenschaft verändert, wenn die betrachteten Modellkomponenten um einen entweder infinitesimal kleinen oder aber endlich großen Betrag variiert werden.
- Die eigenschaftsorientierte Sensitivitätsanalyse ermittelt für eine vorgegebene Modelleigenschaft, in welchem Ausmaß sich mindestens eine Komponente des untersuchten Modells verändern läßt, ohne daß hierdurch die Konstanz der Modelleigenschaft aufgehoben wird.

Die gleiche Dichotomie findet sich z.B. bei GÖTZE,U. (1991), S. 307. Dabei orientiert er sich an Entscheidungsmodellen für Input/Output-Systeme. Als Modelleigenschaft betrachtet er den Wert einer Zielfunktion. Die Modellkomponenten erstrecken sich bei GÖTZE auf Input- und Outputgrößen. DINKELBACH (1969), S. 26f., behandelt zunächst für Entscheidungsmodelle nur den ersten Fall der komponentenorientierten Sensitivitätsanalyse. Als Modellkomponenten dienen beliebige Modellparameter (Koeffizienten). Als Modelleigenschaft dient wiederum der Wert einer Zielfunktion. Später, auf S. 71f., führt DINKELBACH (1969) dann aber auch die eigenschaftsorientierte

Variante der Sensitivitätsanalyse für Lineare Programme ein. Dabei benutzt er die Koeffizienten einer Zielfunktion als variable Modellkomponenten. Der Zielfunktionswert einer optimalen Programmlösung wird als konstante Modelleigenschaft angesetzt. Die dichotome Fragestellung von Sensitivitätsanalysen findet sich ebenso bei BLOHM (1988), S. 221, und PERRIDON (1991), S. 100. Dagegen befaßt sich DINKELBACH (1976), Sp. 3530ff., nur mit komponentenorientierten Sensitivitätsanalysen. MÜLLER-MERBACH (1973), S. 150 u. 153, sowie ELLINGER (1990a), S. 90, begrenzen dagegen die Sensitivitätsanalyse auf ihre eigenschaftsorientierte Variante. Für die komponentenorientierte Variante sehen sie dagegen den Begriff der parametrischen Planungsrechnung vor.

In dieser Arbeit wird ein weit gefaßtes Konzept der Sensitivitätsanalyse vertreten, das die beiden o.a. Varianten einschließt. Hinsichtlich des hier untersuchten Petrinetz-Konzepts sind die Eigenschafts- und Komponentenfestlegungen netzspezifisch anzupassen. Beispielsweise kann sich die Sensitivitätsanalyse eines Netzmodells auf die Modelleigenschaft der Lebendigkeit erstrecken. Ebenso ist es möglich, die Sensitivitätsanalyse auf die Modelleigenschaft der Optimalität anzuwenden. Als Komponente eines Netzmodells, die bei einer Sensitivitätsanalyse variiert wird, bietet sich insbesondere seine Ausgangsmarkierung an. Es kann aber auch die Sensitivität gegenüber variierenden Schaltstrategien untersucht werden. Des weiteren kommt in Betracht, die Schaltwerte von Transitionen als "Parameter" aufzufassen, deren Ausprägungen variiert werden. Eine komponentenorientierte Sensitivitätsanalyse, die auf die Modelleigenschaft der Optimalität und eine parametrisch formulierte Modellkomponente bezogen wird, entspricht dem üblichen Ansatz des Operations Research für Sensitivitätsanalysen.

Vgl. zu ausführlicheren Beschreibungen der Auswertungstechnik "Sensitivitätsanalyse" DANTZIG (1966), S. 305ff.; DINKELBACH (1969), S. 25ff. u. 71ff.; RAJU (1971), S. 133ff.; MÜLLER-MERBACH (1973), S. 150ff.; HAX, H. (1974), S. 36f.; DINKELBACH (1976), Sp. 3531ff.; KERN, W. (1987), S. 119f.; BLOHM (1988), S. 220ff.; ELLINGER (1990a), S. 89ff. (sowie S. 137ff. i.V.m. S. 90); GÖTZE, U. (1991), S. 307ff.; PERRIDON (1991), S. 100ff.; vgl. auch die Anmerkungen von DIRUF (1984), S. 123, zu "Empfindlichkeitsanalysen".

25) Allenfalls kann in der Möglichkeit, "What if"-Anfragen zu beantworten, eine rudimentäre Ausprägung von Sensitivitätsanalysen gesehen werden. Diese Einstellung findet sich z.B. bei PRESSMAR (1982), S. 344, und DIRUF (1984), S. 123 (in bezug auf Empfindlichkeitsanalysen). Besonders deutlich wird die Verwandtschaft von "What if"-Anfragen und Sensitivitätsanalysen bei GEOFFRION (1980), S. 26ff. Dort wird der spezielle Ansatz der *adaptiven* "What if"-Analysen vorgestellt. Sie zeichnen sich durch zwei Charakteristika aus. Erstens basieren sie auf Optimierungsmodellen. Zweitens wird eine "What if"-Anfrage nicht schlicht dadurch beantwortet, daß die unmittelbar betroffenen Modellkomponenten variiert und die zugehörigen Zielfunktionsveränderungen ermittelt werden. Vielmehr erfolgt nach der Komponentenvariation eine erneute Ermittlung der optimalen Modelllösung(en). Als Auswirkungen der Komponentenvariationen werden schließlich die "reoptimierten" Zielfunktionswerte ausgewiesen. Es ist offensichtlich, daß diese Art der adaptiven "What If"-Analyse mit der komponentenorientierten Sensitivitätsanalyse zusammenfällt. Um dies zu erkennen, braucht lediglich der optimale Zielfunktionswert als diejenige Modelleigenschaft ausgezeichnet zu werden, dessen Sensitivität gegenüber Variationen von Modellkomponenten interessiert. Jedoch läßt sich mit der Hilfe von "What if"-Analysen die Sensitivität eines Netzmodells nur erforschen, indem die Fragestellungen variiert werden. Solche Variationen fallen in der Regel unsystematisch, mühselig und unvollständig aus. Daher rechnet der Verf. "What if"-Anfragen noch nicht zum Bereich der Sensitivitätsanalysen. Von Sensitivitätsanalysen möchte er erst dann sprechen, wenn die untersuchten Variationen eine klar erkennbare Systematik befolgen.

26) Allerdings muß sich im Fehlen einer Sensitivitätsanalyse für Netzmodelle kein grundsätzlicher Mangel des Petrinetz-Konzepts manifestieren. Denn aus dem Umstand, daß "bis heute" noch keine Sensitivitätsanalyse für Netzmodelle vorliegt, folge keineswegs zwangsläufig, daß dies auch für alle Zukunft so sein müsse. Vielmehr hat der Verf. durch die Robustheitsanalyse bereits eine Auswertungstechnik vorgelegt, die sich im Prinzip als eine inverse Sensitivitätsanalyse auffassen läßt. Denn Robustheit und Sensitivität von Modellen verhalten sich invers zueinander. Daher sind keine größeren Schwierigkeiten bei dem Unterfangen zu erwarten, die Robustheitsanalyse in eine Sensitivitätsanalyse zu überführen. In dieser Arbeit wurde aber darauf verzichtet, diesen Ansatz konkret auszuführen. Er ließ nicht erwarten, über die Robustheitsanalyse hinaus zu vollkommen neuartigen Einsichten zu gelangen, die seine Mühen gerechtfertigt hätten. Andere Ansätze für eine Sensitivitätsanalyse stellen die Untersuchungen der "strukturellen" Deadlockfreiheit oder Lebendigkeit von Netzmodellen dar. Dort wird gezeigt, daß die Modelleigenschaft der Deadlockfreiheit bzw. Lebendigkeit konstant fortbesteht, und zwar für jede beliebige Variation der Modellkomponente "Ausgangsmarkierung". Daher erfolgt eine eigenschaftsorientierte Sensitivitätsanalyse. Diese Analyseansätze bleiben aber von rudimentärer Qualität, weil sie nur auf Netzmodelle angewendet werden können, die erheblichen Einschränkungen unterliegen.

27) Vgl. zu entsprechenden Empfehlungen, Sensitivitätsanalysen in Modellierungen einzubeziehen, RAJU (1971), S. 133; DINKELBACH (1976), Sp. 3535f.; ZACHARIADES (1977), S. 1.3; VIEFHUES (1982), S. 148; DIRUF (1984), S. 126; KERN, W. (1987), S. 5.

Auch aus der speziellen Perspektive des Petrinetz-Konzepts läßt sich der Wunsch nach Sensitivitätsanalysen rechtfertigen. In diesem Zusammenhang wird auf die parametrische, aber nicht-stochastische Simulationsanalyse von Netzmodellen verwiesen. Mit ihrer Hilfe kann z.B. untersucht werden, welche Ausstattung eines modellierten Produktionssystems mit Transportrobotern am vorteilhaftesten ist. Zu diesem Zweck wird die Anzahl der Kopien von

Transportmittelmarken variiert, die zur Ausgangsmarkierung des Netzmodells gehören. Für jede Variation des Parameters "Kopienanzahl" muß das zugrundeliegende Netzmodell erneut einer simulativen Auswertung unterzogen werden. Dies bereitet beträchtlichen Simulationsaufwand. Er könnte eingespart werden, wenn es gelänge, die Variationen des Parameters "Kopienanzahl" durch eine Sensitivitätsanalyse des Netzmodells abzudecken. Zu diesem Zweck müßte die Modellsensitivität gegenüber Variationen der Ausgangsmarkierung untersucht werden. Eine solche Sensitivitätsanalyse von Netzmodellen steht jedoch noch nicht zur Verfügung. Daher kann auch noch nicht beurteilt werden, ob die Einsparung mehrfach wiederholter Netzsimulationen durch den Ressourcenverzehr einer Sensitivitätsanalyse kompensiert - oder gar übertroffen - wird.

28) Welche Netzeigenschaften aus produktionswirtschaftlicher Perspektive "besonders interessant" sind, wurde bereits durch den o.a. Eigenschaftskatalog ausgewiesen. Natürlich kann die Einschätzung des Verf., die sich in diesem Katalog niederschlägt, angezweifelt werden. Zu seiner Verteidigung möchte er aber die Gegenfrage erheben, in welchen produktionswirtschaftlichen Modellierungen nach der prädikatenlogischen Widerspruchsfreiheit, nach der Eigenschaftskonservierung bei Modellverfeinerungen oder nach der Existenz von Netzinvarianten geforscht wird. Eben diese Aspekte bilden aber die Modelleigenschaften, die hier als "peripher" eingestuft werden. Vgl. dazu die nachstehenden Ausführungen.

29) Eine weniger strenge Variante der Modellkonsistenz, die an die Erfüllung von Integritätsbedingungen geknüpft ist, kann aber auch im Rahmen von Simulations- und Erreichbarkeitsanalyse untersucht werden. Diese Art der Konsistenzanalyse ist daher auch für Synthetische Kernnetze und für Erweiterte Synthetische Netze zugänglich.

30) Dies wurde schon kurz zuvor erwähnt. Falls jedoch die Netzmodelle, die auf der Verwendung von Synthetischen Netzen beruhen, als deklarative Netzmodelle konstruiert wurden, ist auch die strenge prädikatenlogische Konsistenzprüfung möglich.

31) Die Invarianz der betroffenen Netzeigenschaften kann dann ihrerseits als eine Metaeigenschaft des betrachteten Netzmodells untersucht werden.

32) In Netzmodellen mit endlichen Erreichbarkeitsgraphen können aber alle S- und T-Invarianten durch eine vollständige Untersuchung ihrer Erreichbarkeitsgraphen festgestellt werden. Denn die Definitionen von S- und T-Invarianten knüpfen ausschließlich an Netzmarkierungen und Erreichbarkeitsmengen an. Die umfassende Untersuchung dieser Konstrukte ist in Erreichbarkeitsgraphen mit endlicher Knotenmenge immer möglich.

Wegen der Finitheitsprämisse dieser Arbeit spielen unendliche Erreichbarkeitsgraphen ohnehin keine Rolle. Daher wird dem Mangel der Erreichbarkeitsanalyse, S- und T-Invarianten von Netzmodellen mit unendlichen Erreichbarkeitsgraphen aufzudecken, keine größere Bedeutung zugemessen. Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, daß sich oftmals nicht erkennen läßt, welchen Beitrag die Erkenntnis der Invarianten eines Netzmodells zur Bearbeitung des modellierten Realproblems leisten könnte. Diese Problematik wurde bereits erläutert. Aus den vorgenannten Gründen wiegen die Analysedefizite bei S- und T-Invarianten weitaus geringer als die beiden voranstehenden Aspekte, die sich auf die prädikatenlogische Modellkonsistenz und auf die garantierte Invarianz von Modelleigenschaften gegenüber Modellverfeinerungen bezogen.

9.2.2.2.2 Modellierungsträger

9.2.2.2.2.1 Benutzerfreundlichkeit

Die Benutzerfreundlichkeit¹⁾ eines Modellierungskonzepts stellt ein Gemenge verschiedener Aspekte dar²⁾. Dazu gehören z.B. die unmittelbare Einsichtigkeit und Übersichtlichkeit der Konzeptanwendung³⁾. Ebenso können die Vertrautheit mit bereits Bekanntem⁴⁾ oder die leichte Erlernbarkeit⁵⁾ eine bedeutsame Rolle spielen. Auch wird des öfteren die Kommunikations-⁶⁾ und Dokumentationsfreundlichkeit⁷⁾ von Modellierungskonzepten gefordert. Eine Konkretisierung und Systematisierung dieser Aspekteveielfalt erfolgt in dieser Arbeit nicht⁸⁾. Statt dessen wird ein intuitives Vorverständnis zugrundegelegt, das in der betrieblichen Modellierungspraxis hinsichtlich "benutzerfreundlicher" Konzepte weitgehend geteilt wird⁹⁾.

Einen entscheidenden Beitrag zur Benutzerfreundlichkeit des Petrinetz-Konzepts¹⁰⁾ leistet die Anschaulichkeit von Netzmodellen¹¹⁾. Die Modellanschaulichkeit beruht vor allem¹²⁾ auf der graphischen Visualisierung von Petrinetzen¹³⁾. Die Visualisierung kann an drei Ebenen der graphischen Repräsentation von Netzmodellen anknüpfen:

- ❑ Die statische Struktur eines Netzmodells läßt sich durch einen Graphen repräsentieren, der die Netztopologie wiedergibt¹⁴⁾. Grob gesprochen handelt es sich um den Zusammenhang der Knoten und Kanten eines Netzmodells.
- ❑ Die dynamische Struktur eines Netzmodells wird durch einen Erreichbarkeitsgraphen dargestellt¹⁵⁾.
- ❑ Die zulässigen Verhaltensweisen eines Netzmodells können durch einen Markenfluß veranschaulicht werden¹⁶⁾. Bei den fließenden Markenkopien handelt es sich um zeitlich und räumlich veränderliche Anschriften desjenigen Graphen, der die statische Netzstruktur repräsentiert.

Die kognitive Adäquanz graphischer Repräsentationsformen wurde in dieser Arbeit schon mehrfach ausführlicher behandelt¹⁷⁾. Daher braucht sie hier nicht mehr detailliert erläutert zu werden. Statt dessen werden nur einige Facetten der Anschaulichkeit von graphisch visualisierten Netzmodellen¹⁸⁾ herausgestellt¹⁹⁾:

- ❑ Sie zeichnen sich durch große *Übersichtlichkeit* aus²⁰⁾.
- ❑ Komplexe Sachverhalte lassen sich *kompakt* darstellen²¹⁾.
- ❑ Es erfolgt eine *klare* Trennung zwischen Struktur-²²⁾ und Verhaltensaspekten: Strukturelle Zusammenhänge zwischen Problemdeterminanten spiegeln sich in der Art wider, in der die Knoten und Kanten eines netzrepräsentierenden Graphen²³⁾ miteinander verknüpft sind. Verhaltensaspekte äußern sich dagegen in Markenflüssen.
- ❑ Ausgewählte Modellaspekte können durch graphisch-visuelle Gestaltungsmittel *prägnant* dargestellt werden. Dazu gehören z.B. verdeutlichende Netzanschriften, Schattenwürfe als Hinweise auf Verfeinerungen, Fettdruck und Komponentenvergrößerungen²⁴⁾. Farbige Hervorhebungen kommen ebenso in Betracht²⁵⁾.
- ❑ *Qualitative* Einsichten in strukturelle Zusammenhänge werden durch die Visualisierung des topologischen Netzzusammenhangs gefördert²⁶⁾.
- ❑ *Quantitative* Sachverhalte lassen sich durch Markenkopien veranschaulichen, die auf natürliche Weise gezählt werden können.

- Graphisch visualisierte Netzmodelle verhalten sich *anschlußfähig*²⁷⁾. Denn ihr rein topologischer Knoten- und Kantenzusammenhang läßt sich durch natürlich- oder formalsprachliche Anschriften bereichern²⁸⁾. Die Ausdrucksmächtigkeit und unmittelbare Verständlichkeit natürlicher Sprache verhilft zu "leicht lesbaren" Netzmodellen²⁹⁾. Formalsprachen sorgen dagegen für Präzision und Kompaktheit der Darstellungsweise³⁰⁾.
- Graphische Repräsentationsformen sind in Wirtschafts-, Sozial- und Politikwissenschaften weit verbreitet³¹⁾. Daher vermitteln sie ein Gefühl der *Vertrautheit*³²⁾.
- Netzgraphiken gestatten *leicht verständliche* Modellierungen³³⁾. Dies gilt insbesondere auch dann, wenn die zugrundeliegenden Modellierungszusammenhänge komplex und formal anspruchsvoll sind. Daher können graphisch visualisierte Netzmodelle auch von "gewöhnlichen" Mitarbeitern ohne größere Schwierigkeiten angewandt werden, die keine näheren Kenntnisse über das Petrinetz-Konzept besitzen³⁴⁾. Die Mitarbeiter brauchen noch nicht einmal über eine ausgeprägte formale Vorbildung zu verfügen³⁵⁾.
- Netzgraphiken erweisen sich als *kommunikationsfördernd*³⁶⁾. Sie eignen sich vorzüglich als gemeinsame Gesprächsgrundlage, wenn sich mehrere Personen über Modellierungsvorhaben³⁷⁾ oder -ergebnisse³⁸⁾ verständigen möchten³⁹⁾. Dazu tragen mehrere Aspekte bei:
 - ☞ Graphische Visualisierungen lassen sich als ein illustrierendes Kommunikationsmedium einsetzen⁴⁰⁾. Die leichte Verständlichkeit von Netzgraphiken gestattet es, daß sich Gesprächsteilnehmer mit unterschiedlichsten Vorbildungen⁴¹⁾ und Denkstilen⁴²⁾ in diesem Medium gemeinsam artikulieren. Daher bieten sich Netzgraphiken u.a.⁴³⁾ an, um bei Modellierungsprozessen die Kommunikation zwischen "Experten" und "gewöhnlichen" Mitarbeitern zu stimulieren⁴⁴⁾.
 - ☞ Die kompakte graphische Darstellungsweise gestattet es, aufwendige natürlichsprachliche Umschreibungen von Sachverhalten zu vermeiden⁴⁵⁾. Diese Kommunikationsstraffung wirkt sich oftmals positiv auf die Gesprächsbereitschaft der Beteiligten aus⁴⁶⁾.
 - ☞ Durch die prägnante graphische Hervorhebung einzelner Modellierungsaspekte kann die Kommunikation auf das Wesentliche fokussiert werden.
- Die graphische Repräsentationsweise bedeutet einen *Kompromiß* zwischen zwei extremen Modellierungsformen⁴⁷⁾:
 - ☞ Rein natürlichsprachliche Modellierungen sind ausdrucksmächtig und intuitiv verständlich. Sie leiden aber unter gravierenden Präzisionsmängeln und großem Umfang.
 - ☞ Rein formalsprachliche Modellierungen erweisen sich als präzise und kompakt. Ihr Ausdrucksreichtum und ihre Verständlichkeit lassen aber viele Wünsche offen.

Zwischen diesen beiden Extremen nehmen graphisch repräsentierte Netzmodelle eine mittlere Position ein. Dies schlägt sich darin nieder, daß sie einen beachtlichen Ausdrucksreichtum⁴⁸⁾ und unmittelbare Anschaulichkeit⁴⁹⁾ mit Präzision⁵⁰⁾ und Kompaktheit⁵¹⁾ kombinieren. Infolgedessen genießen graphische Repräsentationen in der Modellierungspraxis breite Akzeptanz⁵²⁾.
- Netzgraphiken eignen sich zur benutzerfreundlichen Dokumentation von Modellierungsergebnissen⁵³⁾. Dies folgt unmittelbar aus den vier vorgenannten Vorzügen der graphischen Repräsentationsweise⁵⁴⁾.

Die vielfältigen Vorzüge der graphischen Visualisierung von Netzmodellen zeichnen Petrinetze generell als ein benutzerfreundliches Modellierungskonzept aus. Darin stimmen alle drei Netzklassen, die in dieser Arbeit betrachtet werden, überein.

Allerdings wäre es zu kurz gegriffen, die Benutzerfreundlichkeit des Petrinetz-Konzepts nur anhand von Netzgraphiken zu beurteilen. Denn zahlreiche Aspekte seines Modellierungspotentials lassen sich erst dann entfalten, wenn auf formalsprachlich verfaßte Netzmodelle zurückge-

griffen wird. Dies trifft insbesondere auf die Analyse interessanter Netzeigenschaften zu. Hier hilft die Anschaulichkeit graphischer Modelldarstellungen kaum weiter⁵⁵).

Die Benutzerfreundlichkeit formaler Netzmodelle fällt deutlich geringer aus, als es für Netzgraphiken aufgezeigt werden konnte. Die geringsten Schwierigkeiten bereiten noch Stelle/Transition-Netze. Ihre Formalisierung läßt sich auch durch ungeübte Modellierungsträger, die zuvor keine Erfahrungen mit Petrinetzen sammeln konnten, relativ leicht durchschauen⁵⁶). Dazu trägt vor allem der einfache arithmetische Charakter ihrer Schaltregel bei. Die formale Komplizierung von Netzmodellen nimmt aber rasch zu, wenn zu Synthetischen Kernnetzen oder gar Erweiterten Synthetischen Netzen übergegangen wird. Ihre formalen Konstrukte entziehen sich weitgehend einem intuitiven Verständnis. Prädikatenlogik, sortierte Algebren, Multimengen und ähnliche Formalismen können nicht in Anspruch nehmen, eine benutzerfreundliche Modellierung zu ermöglichen⁵⁷). Die formalen Netzkonstrukte erlauben noch nicht einmal, in ihrer symbolischen Notation an bereits etablierte Modellierungskonzepte anzuschließen⁵⁸). Beispielsweise liegen der prädikatenlogische Formelapparat und Sortierungen von Variablen weit außerhalb desjenigen Rahmens, in dem sich die formalen Notationen von Netzplänen oder OR-Programmen bewegen. Daher fehlt es formalen Netzmodellen auch an einer vertrauten äußeren Erscheinungsweise⁵⁹). Hohe Konstruktkomplexität und geringe Vertrautheit können Akzeptanzhürden errichten⁶⁰), die den Gebrauch formalsprachlich präzisierter Netze in der Modellierungspraxis erheblich behindern⁶¹).

Die mangelhafte Benutzerfreundlichkeit formaler Netzmodelle gilt nicht nur für die hier vorgestellten Synthetischen Netze. Sie trifft vielmehr auf alle Höheren Netze zu, also z.B. auch auf Prädikat/Transition-Netze. Die formalen Grundlagen der Höheren Netze fallen generell so anspruchsvoll aus, daß sich ihre Netzmodelle oftmals nur noch von "Netzexperten" konstruieren und auswerten lassen⁶²). Solche Experten sind in der betrieblichen Modellierungspraxis, um die es in den hier vorgelegten Untersuchungen geht, zumindest derzeit nicht anzutreffen. Leider ist es aber auch nicht möglich, auf den Umgang mit Höheren Netzen zu verzichten. Denn die Ausdrucksmächtigkeit Höherer Netze wird im allgemeinen benötigt, um realistische Problemstellungen mit Netzmodellen repräsentieren zu können. Dafür sprechen im wesentlichen zwei Gründe. Entweder reicht die Modellierungsfähigkeit von Niederen Netzen, wie z.B. Stelle/Transition-Netzen, für die Repräsentation von Sachverhalten grundsätzlich nicht aus⁶³). Oder ihre Anwendung führt schnell zu überaus voluminösen und komplexen Netzmodellen, die sich kaum noch verstehen und handhaben lassen⁶⁴). In beiden Fällen kann nur der Übergang zu Höheren Netzen Abhilfe schaffen⁶⁵).

Um die Benutzerfeindlichkeit von ausdruckskräftigen formalen Netzmodellen einzudämmen, wurde bei Synthetischen Netzen eine Trennung zwischen Netzgraphik und Netzlegende eingeführt. Die Netzgraphik dient aufgrund ihrer graphischen Anschaulichkeit der benutzerfreundlichen Präsentation eines Netzmodells. Anschriften von Netzkomponenten wurden in der Netzgraphik nur in dem Ausmaß verwendet, wie sie zum besseren Verständnis der Modellierung beitragen. Die Netzlegende gewährleistet durch ihre formalsprachliche Konstitution die Präzision des Netzmodells. Zugleich vermittelt die Netzlegende den Zugriff auf leistungsfähige Auswertungstechniken, mit deren Hilfe Erkenntnisse über interessante Modelleigenschaften gewonnen werden können.

Die Diskrepanz, die zwischen Netzgraphiken und formalen Netzmodellen hinsichtlich ihrer Benutzerfreundlichkeit besteht, schlägt sich auch in der Erlernbarkeit des Petrinetz-Konzepts nieder. Zwar wird seine leichte Erlernbarkeit des öfteren gerühmt⁶⁶). Dieses Urteil läßt sich jedoch nur dann glaubhaft aufrechterhalten, wenn es auf die Visualisierung graphisch repräsentierter Netzmodelle eingeschränkt wird⁶⁷). Allenfalls kann es noch auf die Klasse der Stelle/Transition-Netze bezogen werden. Auf formale Modellierungen mit Synthetischen Netzen trifft die leichte Erlernbarkeit aber kaum noch zu. Andernfalls müßte überzeugend nachgewiesen werden, daß die oben erwähnten prädikatenlogischen und algebraischen Grundlagen keine kognitiven Hürden darstellen. Das vermag sich der Verf. aber nicht vorzustellen.

Schließlich trägt das Petrinetz-Konzept zur benutzerfreundlichen Modellierung auch dadurch bei, daß es eine flexible Anpassung von Netzmodellen an unterschiedliche Benutzerbedürfnisse gestattet. Darauf wird später aus der Perspektive der Adaptivität ausführlicher eingegangen. Daher wird hier nur ein illustrierendes Beispiel angeführt. Es erstreckt sich auf den "Zoom"-Effekt⁶⁸⁾ von netzgestützten Modellierungen: Einzelne Bereiche eines Netzmodells, die für den Modellierungsträger von besonderem Interesse sind, lassen sich in den Vordergrund seiner graphischen Visualisierung rücken. Dabei kann die betrachtete Netzgraphik sowohl lokal verfeinert als auch lokal vergrößert werden⁶⁹⁾. Auf diese Weise kann sich der Modellierungsträger stets auf jenen Modellausschnitt konzentrieren, der ihn besonders interessiert. Dabei steht es in der Freiheit des Modellierungsträgers, Umfang und Detaillierungsniveau des Ausschnitts selbst zu bestimmen. Er ist lediglich denjenigen Restriktionen unterworfen, die durch das Medium⁷⁰⁾ der Netzpräsentation vorgegeben sind⁷¹⁾. Dazu gehören vor allem⁷²⁾ die verfügbare Präsentationsfläche⁷³⁾ und die optische Auflösung⁷⁴⁾ des Präsentationsmediums.

Der "Zoom"-Effekt bietet sich insbesondere bei der Modellierung umfangreicher Realprobleme an. Ausgangspunkt ist die Erfahrung, daß die Netzgraphiken der Gesamtmodelle selbst dann, wenn die Netze hierarchisch verfeinert und modular konstruiert wurden, in der Regel recht umfangreich ausfallen. Darüber hinaus kann die dreidimensionale Visualisierung von hierarchischen Netzkonstruktionen zu stark ineinander verschachtelten, überaus intransparenten Darstellungen führen⁷⁵⁾. Daher schätzt der Verf. die dreidimensionale Gesamtpräsentation von hierarchisch gegliederten, "tiefen" Netzmodellen im allgemeinen nicht als benutzerfreundlich ein.

Statt dessen bevorzugt er einen Ansatz, bei dem die Stärken Automatischer Informationsverarbeitungssysteme⁷⁶⁾ ausgenutzt werden, um eine anschauliche und flexible Präsentation von Modellausschnitten zu gewährleisten. Dabei wird die graphische Repräsentation eines "tiefen" Netzmodells von einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem insgesamt vorgehalten. Der Modellierungsträger betrachtet über eine graphische Benutzerschnittstelle aber nur jeweils diejenigen Aspekte des graphisch visualisierten Netzmodells, die ihm aktuell besonders interessant erscheinen. Dabei kann er sich einerseits auf einzelne Hierarchieebenen konzentrieren (vertikale Fokussierung). Andererseits ist er in der Lage, auf einer Hierarchieebene einen bestimmten Bezirk aus dem nunmehr "flachen" Teilmodell auszuwählen (horizontale Fokussierung). Diese beiden Fokussierungsoptionen nutzen den zuvor erwähnten "Zoom"-Effekt aus⁷⁷⁾.

Auf diese Weise kann der Modellierungsträger z.B. auf der obersten Hierarchieebene beginnen, indem er zunächst das am stärksten vergrößerte Netzmodell betrachtet. Daraus wählt er einen interessanten Modellausschnitt aus, um ihn anschließend verfeinert darstellen zu lassen. Diese Verfeinerung hat zugleich auf eine tiefere Hierarchieebene der Modellrepräsentation geführt. Durch dieses kombinierte horizontale und vertikale "Zoomen" wurde vom Automatischen Informationsverarbeitungssystem ein verfeinerter Ausschnitt aus dem Gesamtmodell in den Vordergrund gerückt. Nur dieser Modellausschnitt wird an der graphischen Benutzerschnittstelle in übersichtlicher Weise visualisiert. Der Modellierungsträger kann sich innerhalb dieses Ausschnitts wiederum auf einzelne Bereiche fokussieren und sie abermals verfeinern. Ebenso ist es möglich, einzelne Netzbereiche zu vergrößern. Dadurch werden ihre ehemals visualisierten Details in den Hintergrund des Automatischen Informationsverarbeitungssystems zurückverlagert. Es steht im Belieben des Modellierungsträgers, wie er die horizontalen Bereichseingrenzungen und die vertikalen Verfeinerungen oder Vergrößerungen vornimmt. Daher kann er selbst bestimmen, wie er mittels seiner horizontalen und vertikalen Fokussierungen durch die graphische Repräsentation des gesamten Netzmodells "navigiert"⁷⁸⁾. Zugleich stellt der fokussierende "Zoom"-Effekt während der Erforschung der gesamten Netzgraphik sicher, daß an der Benutzerschnittstelle immer nur ein anschaulicher Netzausschnitt angezeigt wird⁷⁹⁾.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Die Forderung nach Benutzerfreundlichkeit wird im Kontext von Modellierungskonzepten nur selten explizit erhoben; vgl. etwa STAUDINGER (1990), S. 174 u. 176 (auf S. 174 als "Ease of Use") . Dagegen wird sie im Zusammenhang mit Automatischen Informationsverarbeitungssystemen, die u.a. auch zur Implementierung von Modellierungskonzepten dienen, oftmals ausgesprochen. Dabei wird auch von leichter Benutzbarkeit u.ä. gesprochen. Vgl. z.B. SCHUMACHER (1978), S. 18; VALETTE (1982c), S. 2.

2) Vgl. ZIEGLER, J. (1990), S. 27.

3) In dieser Hinsicht läßt sich allgemein von der "Intelligibilität" eines Modellierungskonzepts sprechen. Sie wird in zahlreich variierenden Formulierungen thematisiert. So werden beispielsweise unmittelbar verständliche, leicht nachvollziehbare, anschauliche, transparente, übersichtliche, überschaubare, klare, plastische oder auch "gut lesbare" Modellierungen gewünscht. Vgl. zu Forderungen dieser Art LITTLE, J. (1970), S. B-470; KRYCHA (1972), S. 16; NOE (1975a), S. 4; ULLRICH (1976), S. 0.2 u. 0.6; BUSCH, R. (1977), S. 9; ZERVOS (1977), S. 16; SCHUMACHER (1978), S. 1 u. 18; JORDAN (1978), S. 8f.; AYACHE (1979a), S. 1050; JACKSON, M.A. (1979), S. 8; CZERANOWSKY (1980), S. 54; STEINKE (1980), S. 65; OELLERS (1981), S. 104; PRESSMAR (1982), S. 338f.; HORVATH (1983), S. 94; ESTER (1989), S. 12, 47f., 61, 74f. u. 127f.; DITTRICH, G. (1989b), S. 1; JÄHNICHEN (1990), S. 5 (in bezug auf Spezifikationen).

Mitunter wird als ein Aspekt der Intelligibilität hervorgehoben, aus der modellierten Struktur eines Systems solle sich - zumindest in groben Zügen - auch sein Verhalten erkennen lassen. Vgl. JORDAN (1978), S. 8 u. 37. Diese Forderung wird hier aber nicht erhoben. Denn die Komplexität der hier interessierenden Produktionssysteme (Flexiblen Fertigungssysteme) liegt so hoch, daß es vermessen wäre zu hoffen, das Systemverhalten durch bloßes Betrachten der Struktur von Produktionsmodellen zu durchschauen.

Da der Begriff der Intelligibilität nicht weit verbreitet ist, wird er im folgenden nicht in den Vordergrund gerückt. Statt dessen werden die Formulierungsvarianten, die zu Beginn dieser Anmerkung aufgeführt wurden, als Synonyma verwendet. Insbesondere wird dabei auf den vertrauten Begriff der Anschaulichkeit zurückgegriffen.

4) Vgl. HINTZ (1987), S. 116.

Das Unterfangen, die Benutzerfreundlichkeit eines Modellierungskonzepts anhand seiner Vertrautheit zu beurteilen, erweist sich allerdings als problematisch. Denn es impliziert ein Festhalten an bereits Bekanntem. Das Kriterium der Konzeptvertrautheit suggeriert, ein Konzept sei um so benutzerfreundlicher, je weniger es von den vorhandenen Kenntnissen und Fähigkeiten eines Modellierungsträgers abweicht. Benutzerbedürfnissen werde am ehesten entsprochen, wenn erworbenes fachliches Know how weiterverwendet werden könne. Dies mag in der Modellierungspraxis oftmals zutreffen. Aber zugleich wird das Bild eines lethargischen, prinzipiell innovationsfeindlichen Konzeptanwenders gezeichnet. Statt dessen läßt sich ebenso an einen aufgeschlossenen Modellierungsträger denken, der sich vom intellektuellen Reiz des Neuartigen fesseln läßt. Aus seiner Perspektive wirkt ein wohlvertrautes Modellierungskonzept eher langweilig und unattraktiv. Wenn dieser Standpunkt eingenommen wird, erweist sich die weitreichende formale Fundierung des Petrinetz-Konzepts als ein herausragender Beitrag zu einer benutzerfreundlichen Modellierung. Die Interessantheit des Modellierungskonzepts erscheint dann wichtiger als die bequeme Einbindung in Altvertrautes. Der Verf. möchte sich nicht zu einem Urteil verleiten lassen, welcher Benutzertyp in "der" betrieblichen Modellierungspraxis tatsächlich vorherrscht. Diese Frage kann nur durch entsprechende empirische Studien beantwortet werden.

5) Vgl. FRANK, J. (1976), S. 48; OELLERS (1981), S. 104; HORVATH (1983), S. 94 (als kurze Einarbeitungszeit); HERZOG, O. (1983); ESTER (1989), S. 60; HILTZ (1990), S. 749; DÖRNHÖFER (1991), S. 130; SHACKEL (1991b), S. 25.

Indirekt wird der Aspekt der Erlernbarkeit auch von PFOHL (1977), S. 276, gestreift. Er beurteilt ein Konzept u.a. nach dem Ausmaß, in dem kognitive Fähigkeiten und Sachwissen vorausgesetzt werden. Tendenziell wird ein Modellierungskonzept um so schwerer zu erlernen sein, je höhere Kognitions- und Wissensansprüche es stellt.

6) Vgl. zur Forderung nach Kommunikabilität LITTLE, J. (1970), S. B-470; NOE (1975a), S. 4f.; ULLRICH (1976), S. 0.6; BUSCH, R. (1977), S. 10; PFOHL (1977), S. 278 (als "Grad der Kommunikationsfähigkeit"); MÜLLER-SILVA (1984a), S. 25 u. 69. Die Kommunikabilität erstreckt sich im weitesten Sinne ebenso auf das Bedürfnis, daß Modellierungsergebnisse, die von einem Konzeptanwender erarbeitet worden sind, von möglichst vielen anderen Personen nachvollzogen werden können; vgl. JORDAN (1978), S. 8 u. 11. Darüber hinaus rechnet NOE (1975a), S. 4, auch noch die Kommunikation von Automaten untereinander sowie die Kommunikation zwischen Automaten und Menschen dazu. So weit wird hier aus der Perspektive der Benutzerfreundlichkeit nicht gegangen. Allerdings wird später auf indirekte Kommunikationswirkungen von interaktiven Netzmodellierungen zurückgekommen.

7) Vgl. zur Anforderung der Dokumentationsfreundlichkeit BERNSTEIN (1973), S. 1; FRANK, J. (1976), S. 48; VALETTE (1978a), S. 378; OELLERS (1981), S. 104; VALETTE (1982c), S. 2; HORVATH (1983), S. 94; HERZOG, O. (1983); GASS (1990), S. 62 u. 64; STAUDINGER (1990), S. 177f.

8) Beiträge, die sich um eine Präzisierung des Begriffs "Benutzerfreundlichkeit" (usability) bemühen, finden sich z.B. bei ZIEGLER, J. (1990), S. 27ff.; STAUDINGER (1990), S. 176f(f.); HILTZ (1990), S. 749ff. (dort als Maßstäbe für die subjektive Benutzerzufriedenheit thematisiert); SHACKEL (1991b), S. 21ff., insbesondere S. 24f.; CHAPANIS (1991), S. 362f., sowie weitere Beiträge im Sammelband SHACKEL (1991a). Ebenso kann auf Untersuchungen verwiesen werden, die sich mit Akzeptanzfaktoren befassen. Denn die Benutzerfreundlichkeit eines Konzepts wird wesentlich dadurch geprägt, in welchem Ausmaß es solchen Akzeptanzfaktoren gerecht wird. Ausführliche Akzeptanzstudien erfolgen vor allem hinsichtlich der Benutzung Automatischer Informationsverarbeitungssysteme. Ihre Erkenntnisse lassen sich auf die Akzeptanz von Modellierungskonzepten ohne Schwierigkeiten übertragen. Vgl. zu Untersuchungen von Akzeptanzfaktoren PRESSMAR (1982), S. 326ff.; HILTZ (1990), S. 739ff., insbesondere S. 744ff. u. 751ff.; MERTENS (1991a), S. 248ff.

Zwar fließen die Anregungen, die in den vorgenannten Quellen vorgefunden werden, in die anschließenden Erörterungen ein. Aber die Anregungen bleiben disparat und oftmals einzelfallbezogen. Sie lassen keinen überzeugenden Ansatz erkennen, um die Benutzerfreundlichkeit eines Modellierungskonzepts allgemein zu beurteilen. Die oftmals widersprüchlichen Einzelergebnisse von Akzeptanzstudien stellen z.B. HILTZ (1990), S. 742f., und MERTENS (1991a), S. 251, heraus. Vgl. auch am Rande HUBER, G.P. (1983), S. 68 (bezogen auf kognitive Stilstudien). PRESSMAR (1982), S. 334 u. 341 (er geht auf S. 326ff. aber auch auf implementierungsunabhängige Akzeptanzfaktoren ein), hebt den Einzelfallbezug von Akzeptanzuntersuchungen hervor.

Darüber hinaus müßte die Benutzerfreundlichkeit eines Modellierungskonzepts auf diejenigen Vorstellungen bezogen werden, die über einen "typischen" Konzeptanwender herrschen. Vgl. CHAPANIS (1991), S. 388. Gehaltvolle Typisierungen für die hier interessierende betriebliche Modellierungspraxis, insbesondere im Bereich der Prozeßkoordinierung komplexer Produktionssysteme, stehen jedoch nicht zur Verfügung. Statt dessen beziehen sich Studien, in denen eine Typisierung von Benutzergruppen erfolgt, zumeist auf die Anwender von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen. Ob die dort gesammelten allgemeinen Erkenntnisse auf die Modellierung von Produktionssystemen und -prozessen übertragen werden können, bleibt offen. Hinzu kommt, daß Untersuchungen über die kognitiven Stile von Systembenutzern unter erheblichen methodischen Unzulänglichkeiten leiden; vgl. dazu die fundamentale Kritik von HUBER, G.P. (1983), S. 567ff. Es würde den Erkenntnisrahmen dieser Arbeit übersteigen, die Typisierungslücke im hier interessierenden produktionswirtschaftlichen Modellierungsbereich durch entsprechende empirische Studien schließen zu wollen. Statt dessen wird dort, wo die Charakterisierung der Konzeptanwender eine größere Bedeutung erlangt, auf die jeweils zugrundeliegenden Annahmen über "typische" Modellierungsträger hingewiesen. Vgl. dazu die früheren Hinweise auf Attituden gegenüber stochastischen Einflußgrößen, die in der betrieblichen Praxis vorherrschen.

9) Das Vorverständnis wird durch die nachfolgend angeführten Facetten der Benutzerfreundlichkeit von Modellierungen expliziert.

10) Die Benutzerfreundlichkeit des Petrinetz-Konzepts wird als solche kaum explizit erwähnt. Zu den seltenen Ausnahmen zählen AGERWALA (1973), S. 81, und ROSENSTENGEL (1991), S. 4. Dort wird die Annehmlichkeit der Modellierung von Prozeßkoordinierungen angesprochen.

11) Die Anschaulichkeit von Netzmodellen umschließt synonyme Auszeichnungen, wie z.B. die Modelltransparenz oder -verständlichkeit. Sie schließt hier alle Aspekte der Intelligibilität ein, die in einer der voranstehenden Anmerkungen exemplarisch erwähnt wurden. Vgl. zur Anschaulichkeit (Intelligibilität) von Netzmodellen PATIL (1971), S. 5; AGERWALA (1973), S. 81; AGERWALA (1974a), S. 4 u. 9f.; HACK, M. (1974b), S. 57; AGERWALA (1975), S. 218 u. 221; TOURRES (1976), S. 217; PETERSON, J. (1977), S. 249; KRIEG, B. (1977), S. 1; KWAN (1977a), S. 608; KWAN (1977b), S. 44; GOTTSCHALK, W. (1977), S. 877; AGERWALA (1978a), S. 149; AGERWALA (1978b), S. 309; HEIMERDINGER (1978), S. 163; MEMMI (1978c), S. 505; PETRI, C. (1979c), S. 83; HAN (1979), S. 270f.; PRIESE (1979), S. 4; OBERQUELLE (1979a), S. A.1; VALETTE (1979b), S. 157; KERAMIDIS (1979), S. 14; AGERWALA (1979), S. 85; MEMMI (1979), S. 92; WINAND (1980), S. 1251; GENRICH (1980a), S. 154; STARKE (1980), S. 4; OBERQUELLE (1980), S. 505; MEKLY (1980), S. 422; BRETSCHNEIDER (1980a), S. 20; BRETSCHNEIDER (1980c), S. 41 (leichte Verständlichkeit und Selbsterklärung der Netzsymbolik; gemeint sind wohl die Graphiksymbole von Netzdarstellungen); BRETSCHNEIDER (1980d), S. 25; HACKMANN (1981), S. 372; STAHLKNECHT (1982), S. 120; JOHNSON, R.R. (1982), S. 75; CARSTENSEN (1982), S. 53; HACKMANN (1982), S. 22 u. 83; YOELI (1982b), S. 8; HURA (1982c), S. 438; REISIG (1983a), S. 309; MONTEL (1983a), S. 293; VALK (1983d), S. 311; ROSENSTENGEL (1983); FIDELAK (1988b), S. 8; BEKHI (1989), S. 246; PAGNONI (1990), S. 164; ABEL, D. (1990), S. 41f.; THOME, R. (1990), Abschnitt K 2.2, S. 1; SCHMITZ, P. (1991), S. V; ROSENSTENGEL (1991), S. 2 u. 5; ESCHENBACHER (1991), S. 223 (allerdings nur in bezug auf kleine Netzmodelle); BECKER, B. (1991), S. 30 (jedoch mit Einschränkungen); KIEBLER (o.J.), S. 40. Die vorgenannten Quellen beziehen sich in der Regel - zumindest implizit - auf graphisch visualisierte Netzmodelle.

12) Daneben trägt zur Benutzerfreundlichkeit auch die kognitive Adäquanz der Netzrepräsentation durch *mathematische* Graphen bei. Sie spielt allerdings eine wesentlich geringere Rolle als die nachfolgend diskutierte Visualisierung solcher Graphen.

13) Auf die Anschaulichkeit von visualisierten graphischen Netzrepräsentationen wurde auch schon im Kontext Allgemeiner Netze eingegangen. Abweichender Ansicht ist dagegen KELLER,R. (1975a), S. 1. Er hält andere graphische Visualisierungsformen für anschaulicher als Petrinetze. KELLER demonstriert seine Ansicht anhand eines Beispiels (S. 2). Sein Exempel bezieht sich jedoch auf ein speziell informationstechnisches Problem. Darüber hinaus bleibt es auf die ausdruckschwache Klasse der Stelle/Transition-Netze beschränkt. Mit Höheren Netzen ließe sich die behauptete Umständlichkeit der Netzmodellierung rasch beseitigen.

14) Vgl. die Ausführungen zur graphischen Repräsentation Allgemeiner Netze.

15) Vgl. die Erläuterung von Erreichbarkeitsgraphen für Stelle/Transition-Netze.

16) Vgl. die Hinweise, die im Rahmen der Simulationsanalyse von Netzmodellen erfolgten.

17) Vgl. vor allem die Ausführungen im Kontext Allgemeiner Netze und im Zusammenhang mit der Simulationsanalyse von Netzmodellen. Vgl. ebenso die Quellen, die in den zugehörigen Anmerkungen angeführt wurden. Vgl. auch die späteren Erläuterungen zur Interaktivität des Petrinetz-Konzepts und zu seiner Integrationsqualität.

18) Die nachfolgenden Aspekte werden mitunter nicht explizit auf die graphische Visualisierung von Netzmodellen bezogen. Statt dessen werden sie des öfteren entweder nur als Vorzüge von graphischen Darstellungsweisen oder aber nur als Vorteile von Petrinetzen herausgestellt. Vgl. dazu die Quellen in den kommenden Anmerkungen. Von diesen verschiedenartigen Bezugspunkten wird hier aber abgesehen. Denn sie werden in der Visualisierung von graphisch repräsentierten Petrinetzen gemeinsam angesprochen.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß sich die hier vorgetragenen Argumente zugunsten der Benutzerfreundlichkeit auf die *Visualisierung* eines graphisch repräsentierten Netzmodells beziehen. Demgegenüber wird später aus dem Blickwinkel der Interaktivität die *graphische Netzrepräsentation* eine herausragende Rolle spielen. Dabei geht es um den Schnittstellencharakter des *mathematischen* Graphen, der ein Netzmodell repräsentiert.

19) Die Facetten heben jeweils einen bestimmten Blickwinkel auf das gemeinsam zugrundeliegende Phänomen "Anschaulichkeit" oder "kognitive Adäquanz" hervor. Aufgrund dieser gemeinsamen Basis liegt es nahe, daß sich die Facetten inhaltlich überschneiden. Es wird daher kein Versuch unternommen, sie streng voneinander abzugrenzen.

20) Vgl. BRETSCHNEIDER (1980a), S. 24 (im Vergleich mit Programmablaufplänen bei der Modellierung der Ablaufstrukturen von Software-Programmen).

21) Vgl. zur Kompaktheit von (graphisch repräsentierten) Netzmodellen trotz komplexer Modellierungsobjekte CAVARROC (1974), S. 95; KWAN (1977b), S. 44; HEIMERDINGER (1978), S. 163; BERTHELOT (1982b), S. 251; BERTHELOT (1982d), S. 23; MONTEL (1983a), S. 293; ABEL,D. (1990), S. 21 u. 41f.

Einen recht speziellen Kompaktheitsvorteil des Petrinetz-Konzepts stellen ZISMAN (1977), S. 31, und PICHLER,F. (1978), S. 27, dar. Sie betrachten die Aufgabe, einen Prozeßablauf in seinen unterschiedlichen Prozeßzuständen zu modellieren. Für diesen Zweck werden eine Darstellungsweise als Zustandsautomat und eine Repräsentation durch ein Petrinetz miteinander verglichen. Dabei erweist sich das Netzmodell als kompakter. Dabei dient die Anzahl der Knoten, die für die graphische Repräsentation von Zustandsautomat und Petrinetz erforderlich ist, als Kompaktheitsmaßstab. Das Petrinetz erfordert weniger Knoten. Im Netzmodell wird jeder Prozeßzustand durch eine Netzmarkierung ausgedrückt. Die Vielfalt der Prozeßzustände kann daher durch eine Markierungsvielfalt des Netzmodells abgedeckt werden, ohne daß hierfür eine große Knotenanzahl im Netzmodell erforderlich ist. Bei der Anwendung eines Zustandsautomaten muß dagegen jeder Prozeßzustand durch einen zustandsspezifischen Knoten repräsentiert werden. Denn Markierungen sind dort unbekannt. Daher fällt die Knotenanzahl des Zustandsautomaten wesentlich größer als beim Petrinetz aus. Dies bedeutet zugleich, daß die Repräsentation der Gesamtheit aller Prozeßzustände durch Zustandsautomaten weitaus weniger kompakt ausfällt, als es beim Einsatz von Petrinetzen möglich ist. In ähnlicher Weise wird von FREEDMAN (1988b), S. 333f., nachgewiesen, daß Netzmodelle wesentlich kompaktere Repräsentationen nebenläufiger Prozesse zulassen als Zustand/Transition-Diagramme. Die gleiche Argumentation findet sich bei ABEL,D. (1990), S. 20f., in bezug auf Zustandsgraphen (für endliche Automaten).

Auf den ersten Blick scheint der Kompaktheit von Netzmodellen die vielfach variierte Vorhaltung zu widersprechen, Petrinetze würden bei der Modellierung von Realproblemen rasch so umfangreich, detailliert oder unübersichtlich, daß sie sich kaum noch verstehen und ebensowenig praktisch handhaben ließen. Vgl. zu solchen Ansichten GOSTELOW (1971), S. 8 (Schwerfälligkeit); BERNSTEIN (1973), S. 80 (Unübersichtlichkeit); BYRN (1974), S. III-30 (in bezug auf Vektor-Additions-Systeme, die zu reinen Stelle/Transition-Netzen äquivalent sind); HACK,M. (1975a), S. 14f.; KELLER,R. (1975a), S. 1f.; FERNANDEZ (1975), S. 1; COOPRIDER (1976), S. 26; SCHIFFERS (1977), S. II; AGERWALA (1978b), S. 305; GENRICH (1979a), S. 124; REISIG (1979a), S. 220; VALETTE (1979b), S. 156; DEVY (1979), S. 43; THIELER-MEVISSSEN (1979), S. 24; GRIESE,W. (1979), S. 1; PERL (1980), S. 11.1; HEINEMANN (1980), S. 3; GENRICH (1980a), S. 37 u. 46; HRUSCHKA (1980c), S. 13; STARKE (1980), S. 34; EBERT,J. (1981), S. 327; NELSON,R.A. (1982), S. 53; VALETTE (1982a), S. 208; ROUCAIROL (1982a), S. 1; BERTHELOT (1982b), S. 251; BERTHELOT (1982d), S. 23; HINDERER (1982b), S. 238; HEINEMANN (1982), S. 187; BEKHI (1989), S. 245; ABEL,D.

(1990), S. 3 u. 45; BAUDIN (1990), S. 38; THOME, R. (1990), Abschnitt H 16.4, S. 45 (als unverhältnismäßig hoher Abbildungsaufwand); ESCHENBACHER (1991), S. 223; HOLZMANN (1991), S. 185.

Die vorgenannten Quellen beziehen sich aber inhaltlich zumeist nur auf die einfach strukturierten Klassen der Bedingung/Ereignis- oder Stelle/Transition-Netze. Lediglich bei ABEL wird deutlich, daß er sich nicht nur auf solche Niederen Netze bezieht. Darauf wird in Kürze zurückgekommen. Solange jedoch Netzmodelle auf Niedere Netze beschränkt bleiben, verwundert es keineswegs, daß bei der Verwendung *dieser* Netze oftmals unübersichtlich große Netzmodelle resultieren. Dabei wird jedoch übersehen, daß sich mit ausdrucksmächtigeren Netzklassen - insbesondere mit den verschiedenen Spielarten der Höheren Netze - durchaus kompakte Netzmodelle für anspruchsvolle Realprobleme gestalten lassen. Dies hebt z.B. ABEL, D. (1990), S. 41f., für Prädikat/Transition-Netze und Gefärbte Netze ausdrücklich hervor. Dies unterstreicht er durch ein ausführlich kommentiertes Beispiel auf S. 35ff. Die Möglichkeit, mit Höheren Netzen zu kompakteren und anschaulicheren Netzmodellen zu gelangen, klingt auch an bei GENRICH (1979a), S. 124, und HEINEMANN (1980), S. 3f. Darüber hinaus kann sogar jedes Höhere Netz so weit verdichtet werden, daß es - nebst adjazenten Kanten - nur noch aus einer Stelle und einer Transition besteht. Daher läßt sich *im Prinzip* jedes Netzmodell äußerst kompakt als ein Höheres Netz mit nur noch zwei Knoten rekonstruieren. Allerdings wurde auch schon deutlich gemacht, daß auf eine derart extreme Kompaktifizierung im Interesse der Modelltransparenz bewußt verzichtet wird. Vgl. dazu den Hinweis zur "kontrollierten" Kompaktifizierung.

Wenn extreme Verdichtungen unterbleiben, kann selbst die Anwendung von Höheren Netzen zu umfangreichen Netzmodellen führen. Beispielsweise wurde in der Fallstudie ein Netzmodell mit nahezu 3.000 Knoten konstruiert. Daher ließe sich *prima facie* der Einwand erheben, Höhere Netze besäßen bei "realistischen" Problemstellungen keinen Kompaktheitsvorteil. So bezweifelt etwa PERL (1980), S. 11.1, ob die äußerliche Komplexitätsreduzierung durch Verringerung des Modellumfangs für praktische Modellierungszwecke ausreicht. Auch ABEL, D. (1990), S. 45, weist darauf hin, daß Netzmodelle bei der detaillierten Modellierung umfangreicher Realitätsausschnitte unübersichtlich würden. Dabei ist in Rechnung zu stellen, daß ABEL zuvor die Kompaktifizierungsmöglichkeiten, die von Höheren Netzen eröffnet werden, ausführlich gewürdigt hat (S. 35ff.). Daher bezieht sich seine Kritik an der Unübersichtlichkeit vermutlich auch auf Höhere Netze. Vorbehalten dieser Art läßt sich aber auf zweifache Weise begegnen.

Erstens vernachlässigen sie zumeist, daß sich umfangreichere Netzmodelle sowohl vergrößern als auch modular zerlegen lassen. Beide Techniken gestatten es, selbst umfangreiche Realitätsausschnitte in übersichtlichen, kompakten Netzmodellen einzufangen. Mit Hilfe der Netzvergrößerung ist es möglich, detaillierte Netzmodelle unter Abstraktion von weniger Wichtigem zu verdichten. Damit wird aber nur dem Ziel der Kompaktifizierung Rechnung getragen. Denn auf die Detailliertheit der Modellierung wird im Vollzug der Abstraktionen bewußt verzichtet. Die modulare Netzsegmentierung gestattet es dagegen, ein großes Netzmodell in übersichtliche, kompakte Teilmodelle (Netzmodule) aufzuspalten. Dabei wird die Detailliertheit der Modellierung in den einzelnen Netzmodulen aufrechterhalten. Abstraktion von weniger Wichtigem und Bewahrung von Details lassen sich schließlich durch hierarchische Netzverfeinerungen miteinander kombinieren. Wenn die Verfeinerungen so durchgeführt werden, daß einzelne Knoten aus den Grobnetzen durch Netzmodule ersetzt werden, besitzen die Feinnetze weiterhin den übersichtlichen und kompakten Charakter von modularen Modellkonstruktionen. Daher gestattet die Verschränkung von hierarchischen und modularen Konstruktionsstrategien, Realprobleme selbst dann noch mit übersichtlichen und - auf der Modulebene - kompakten Netzmodellen zu repräsentieren, wenn die modellierten Realitätsausschnitte umfangreich und detailliert konzeptualisiert wurden. Diese hierarchisch-modulare Konstruktion von Netzmodellen wurde im Rahmen der Fallstudie exemplarisch demonstriert. Auch von ABEL, D. (1990), S. 45ff., wird sie ausdrücklich als ein Mittel gewürdigt, um realistische Problemstellungen mit Netzen auf übersichtliche Weise zu modellieren. Zwar bezieht sich ABEL explizit nur auf die hierarchische Netzverfeinerung. Aber er nimmt seine Verfeinerungen so vor, daß "nebenbei" wohldefinierte Netzmodule resultieren; vgl. Abb. 4.1 b) auf S. 46. Allerdings gelangt BECKER, B. (1991), S. 30, zu der gegenteiligen Einschätzung, hierarchisch verfeinerte Netzmodelle verlören durch Verschachtelung ihre Anschaulichkeit. Dieses Urteil vermag der Verf. nicht nachzuvollziehen. Es würde lediglich dann verständlich sein, wenn BECKER ein derart verfeinertes Netzmodell auf allen Hierarchieebenen *zugleich* darstellen möchte. In der Tat muß damit gerechnet werden, daß eine solche dreidimensionale Darstellung für ein "tiefes" Netzmodell rasch unübersichtlich wird. Jedoch sind hierarchisch-modular konstruierte Netzmodelle keineswegs auf solche dreidimensionalen Modellpräsentationen angewiesen. Vielmehr liegt einer ihrer Vorzüge darin, daß sich der Modellbenutzer auf jene Hierarchieebenen und Netzmodule fokussieren kann, die ihn aktuell interessieren. Darauf wird am Ende des Kapitels anhand des "Zoom"-Effekts näher eingegangen.

Zweitens kann Kritik gegenüber umfangreichen Netzmodellen nur so lange aufrechterhalten werden, wie die Kompaktheit eines Modells in absoluter Weise verstanden und auf ein Modell als Ganzes bezogen wird. Dann ist es aber trivial festzustellen, daß sich ein *umfangreiches* Realproblem bei hinreichender *Detailliertheit* der Modellierung nur durch "große" Modelle repräsentieren läßt. (Vgl. zur Voraussetzung von umfangreichen und detailreichen Modellierungsobjekten ABEL, D. (1990), S. 45.) Unter den gleichen Voraussetzungen würde auch jedes andere Modellierungskonzept zu ähnlich umfangreichen Problemrepräsentationen führen. Daher besitzt das absolute und holistische Kompaktheitsverständnis für die Beurteilung von Modellierungskonzepten keine überzeugende Differenzierungskraft. Infolgedessen zieht es der Verf. vor, Kompaktheitsurteile einerseits in *relativer* Weise auf - faktische oder hypothetische - alternative Modellierungen zu beziehen (Absolutheitsverzicht). Andererseits wird in Erinnerung ge-

rufen, daß an dieser Stelle nicht die Kompaktheit von vollständigen Netzmodellen thematisiert wird. Vielmehr wird nur der *Teilaspekt* ihrer graphischen Repräsentation gewürdigt (Holismusverzicht). Auf die nicht-graphischen Aspekte von Netzmodellen wird erst später - mit deutlich abweichenden Ergebnissen - eingegangen. Aus dieser zweifach eingeschränkten Perspektive erweist sich die graphische Repräsentation des Netzmodells aus der Fallstudie immer noch als eine relativ kompakte Modellierung. Zwar wurden keine alternativen Modellierungen des gleichen Realproblems auf dem gleichen Detaillierungsniveau zu Vergleichszwecken vorgelegt. Aber praktische Erfahrungen mit dem Einsatz von OR-Programmen oder Netzplänen werden jeden Dritten rasch zustimmen lassen, daß mit jenen alternativen Modellierungskonzepten die Bearbeitung der gleichen Modellierungsaufgabe *ceteris paribus* erheblich umfangreicher ausgefallen wäre (sofern ihre Modellierungsfähigkeit überhaupt dazu ausgereicht hätte). Darüber hinaus manifestiert sich in der Fallstudie die relative Kompaktheit des graphisch repräsentierten Netzmodells auch unmittelbar: Es brauchen lediglich die Netzgraphiken der Teilmodelle mit den jeweils korrespondierenden Netzlegenden verglichen zu werden. Die erheblich kompaktere Repräsentationsform der Netzgraphiken ist dabei offensichtlich.

22) Hiermit sind nicht nur Zusammenhänge der statischen, sondern ebenso der dynamischen Struktur gemeint. Denn die kausale Interpretation der Kanten eines Netzes, die im Kontext Synthetischer Netze besonders herausgestellt wurde, bietet einen unmittelbaren Zugang zur Netzdynamik.

23) Damit sind sowohl Graphen, welche die Netztopologie repräsentieren (statische Netzstruktur), als auch Erreichbarkeitsgraphen (dynamische Netzstruktur) gemeint.

24) Vgl. die Notation von Obligatkanten in Relation zur Notation "gewöhnlicher" Netzkanten.

25) Vgl. ROSENSTENGEL (1983). Beispielsweise bietet es sich an, in Netzmodellen zwischen zwei Kategorien von Markenflüssen zu unterscheiden: einerseits Flüsse von Markenkopien, die reale Objekte repräsentieren (z.B. Werkstücke oder Transportmittel), und andererseits Flüsse von Markenkopien, die formale Objekte wiedergeben (z.B. Informationen oder Formelgültigkeiten). Die Markenflüsse können sowohl durch eine Einfärbung der Markenkopien als auch durch eine farbige Gestaltung der betroffenen Netzkanten und -knoten auseinandergehalten werden. Darüber hinaus läßt sich innerhalb dieser beiden Flußkategorien durch weitere farbliche Nuancierungen zwischen verschiedenen Objektarten differenzieren. Dadurch kann etwa zwischen Werkstück- und Werkzeugflüssen unterschieden werden. Ebenso kommen psychologische Aspekte der Farbwahrnehmung, Abstufungen von Farbintensitäten sowie Blinkeffekte in Betracht, um die Dringlichkeit von Produktionsaufträgen hervorzuheben. Beispielsweise lassen sich die Kopien von Werkstück- und Auftragsmarken, die zu einem Eilauftrag gehören, durch grelle Rottöne herausstellen. Oder ihnen wird durch eine blinkende Darstellung besonderes Gewicht verliehen. Darüber hinaus ist es möglich, Areale eines Produktionsmodells, die von einer Produktionsstörung betroffen sind, durch das Einfärben der zugehörigen Netzknoten und -kanten hervorzuheben. Statt dessen können solche gestörten Produktionsareale auch durch kleine "Flaggen" kenntlich gemacht werden.

Vgl. zu solchen optischen Effekten ALDINGER (1985a), S. 90. Er stellt im Zusammenhang mit Leitständen heraus, daß sich die menschliche Wahrnehmung bei der Koordinierung komplexer Produktionssysteme mit der Hilfe von farblichen Hervorhebungen auf das jeweils Wesentliche lenken läßt. WECK (1991e), S. 118 u. 122, spricht die oben erwähnten Blinkeffekte und "Flaggen" an. Leider standen dem Verf. nicht die editier- und drucktechnischen Mittel zur Verfügung, um die skizzierten optischen Anreicherungen von graphisch visualisierten Netzmodellen zu benutzen.

26) MÜLLER-SILVA (1984a), S. 38, hebt die anschauliche Einfachheit von gerichteten Graphen hervor. Sie folge daraus, daß die Graphen erlauben, Probleme ohne quantitative Formelapparate zu repräsentieren. Statt dessen beschränken sich die gerichteten Graphen auf qualitative, topologische Ausdrucksmittel. Diese nicht-quantitative Ausdrucksweise kommt menschlichen Denkgewohnheiten entgegen. Vgl. dazu die Ausführungen zur kognitiven Adäquanz von graphischen Repräsentationsformen.

27) Der Aspekt der Anschlußfähigkeit wird noch einmal aufgenommen, wenn die Interpretierbarkeit des Petrinetz-Konzepts beurteilt wird. Dort handelt es sich aber nicht um den Anschluß an sprachlich verfaßte Ausdrucksmittel, sondern um den Anschluß an Realprobleme.

28) Den speziellen Aspekt, Graphen durch *quantitative* Ausdrücke anzureichern, hebt MÜLLER-SILVA (1984a), S. 40f., hervor.

29) Vgl. BAER, J. (1977), S. 395.

30) Die hier vorgetragenen Qualifizierungen von natürlich- und formalsprachlichen Ausdrucksmitteln stellen nur grobe Tendenzurteile dar. Sie beruhen auf den Eigenarten von formal- und natürlichsprachlichen Ausdrucksweisen, die früher anläßlich der semiotischen Rahmenlegung ausführlicher dargelegt wurden.

31) Vgl. MÜLLER-SILVA (1984a), S. 47f.; GLOVER (1990), S. 7ff.

32) Deshalb bietet sich die graphische Repräsentation von Netzmodellen an, um potentielle Akzeptanzbarrieren bei solchen Modellierungsträgern zu überwinden, die sich bisher mit Petrinetzen noch nicht befaßt haben. Für die Im-

plementierung des Petrinetz-Konzepts in der betrieblichen Modellierungspraxis kann dies eine entscheidende Rolle spielen. Implementierungsaspekte liegen aber außerhalb der hier interessierenden Beurteilung von Stärken und Schwächen des Petrinetz-Konzepts. Sie werden daher nicht weiter vertieft.

33) Die leichte Verständlichkeit von graphisch repräsentierten Petrinetzen ist weithin anerkannt. Vgl. dazu die Quellen, die in einer früheren Anmerkung die Intelligibilität von Netzmodellen belegten.

34) Vgl. CAVARROC (1974), S. 95; NELSON, R.A. (1982), S. 53; SCHESCHONK (1982a), S. 104; THOME, R. (1990), Abschnitt K 2.2, S. 1 (in bezug auf "Betriebspraktiker").

35) Vgl. TAYLOR, B. (1982), S. 846 u. 853 (ohne Bezug auf Petrinetze).

36) Vgl. ROSENSTENGEL (1983); BEKHI (1989), S. 246; DITTRICH, G. (1989b), S. 3; SCHMITZ, P. (1991), S. V; ROSENSTENGEL (1991), S. 129. ROSENSTENGEL und WINAND sprechen in diesem Zusammenhang sogar ausdrücklich von "Kommunikationsnetzen"; vgl. ROSENSTENGEL (1991), S. 104, 116ff. u. 129f. Vgl. auch die Quellen, die in den nachfolgenden Anmerkungen zu speziellen Aspekten der Kommunikationsförderung angeführt werden. Darüber hinaus wird später auf kommunikationsfördernde Nebenwirkungen von interaktiven Modellierungskonzepten eingegangen.

37) Darauf legt ROSENSTENGEL (1983) besonderen Wert.

38) Diesen Aspekt betont TAYLOR, B. (1982), S. 846 (allerdings ohne Bezug auf Petrinetze).

39) Vgl. zu den Kommunikationsschwierigkeiten, die bei der Modellierung komplexer Probleme durch mehrere Personen drohen, MÜLLER-SILVA (1984a), S. 18f.

Die Multipersonalität von Modellierungsprozessen spielt vor allem an der Schnittstelle zwischen Modellkonstruktion und Modellauswertung eine große Rolle. Denn in der Modellierungspraxis ist es oftmals der Fall, daß die Modellkonstruktoren nur ihre Resultate bereitstellen, aber mit der späteren Modellauswertung nicht mehr befaßt sind. Dann kann es rasch zu Mißverständnissen und Frustrationen kommen, weil konstruktionsorientierte Mitarbeiter häufig einen anderen Denkstil pflegen als ihre auswertungsorientierten Kollegen: Erste bevorzugen tendenziell eine ausdrucksmächtige Modellierungsweise; letzte bevorzugen dagegen den Aspekt der Lösungseffizienz. Auf den Widerstreit zwischen Ausdrucksmächtigkeit und Lösungseffizienz wurde schon anhand des Modellierungsdilemmas eingegangen. Um ein wohlhabendes Zusammenwirken zwischen Modellkonstruktoren und Modellauswertern sicherzustellen, ist im allgemeinen eine enge Kommunikation zwischen beiden Personengruppen erforderlich; vgl. YOELI (1982b), S. 2. Ein tendenzielles Auseinanderklaffen der Denkstile der vorgenannten Personengruppen klingt auch bei PRESSMAR (1982), S. 334 u. 346, an. Es bestehe ein "natürlicher Dissens" (S. 334) zwischen den Entwicklern von Planungssystemen und den späteren Systemnutzern. Dabei lassen sich die Entwickler mit den hier angesprochenen Modellkonstruktoren identifizieren, während die Systemnutzer den Modellauswertern entsprechen.

40) Schon an früherer Stelle wurde hervorgehoben, daß Netzmodelle des öfteren benutzt werden, um Kommunikationsprozesse durch anschauliche Illustrationen zu unterstützen. Des öfteren wird auch außerhalb des Petrinetz-Konzepts empfohlen, (visualisierte) Graphen wegen ihrer Anschaulichkeit und leichten Verständlichkeit als Kommunikationsmedium über Modellierungsergebnisse zu verwenden. Vgl. z.B. PRITSKER (1966b), S. 273; TAYLOR, B. (1982), S. 846 u. 853; SZYPERSKI (1983), S. 110 u. 112; GLOVER (1990), S. 9 u. 15f. Vgl. auch allgemein zur Empfehlung, "bildhafte Darstellungen" als Kommunikationsmittel einzusetzen, DIRUF (1983), S. 240 u. 243f.; DIRUF (1984), S. 126.

41) Auf den Aspekt der Vorbildung wurde schon kurz zuvor eingegangen, als festgestellt wurde, daß sich Netzgraphiken wegen ihrer leichten Verständlichkeit ohne formale Vorbildung handhaben lassen. Da überhaupt keine besondere Vorbildung vorausgesetzt wird, bleibt der unkomplizierte Umgang mit graphisch visualisierten Netzmodellen trotz unterschiedlichster Vorbildungen erhalten.

42) Auf verschiedenartige Denkstile wurde schon in einer früheren Anmerkung hingewiesen. Dort ging es um die Kommunikation zwischen Personengruppen, die sich vornehmlich entweder mit der Konstruktion oder aber mit der Auswertung von Modellen befassen. Vgl. zur Zusammenführung solcher Denkstile die anschließende Anmerkung.

43) Ein anderer Bereich, in dem Netzgraphiken ihre kommunikationsstimulierende Kraft zu entfalten vermögen, betrifft die Überwindung zwischen unterschiedlichen Denkstilen. Dies gilt insbesondere auch für die Kommunikation von "Experten" untereinander. Dieser Aspekt klingt an, wenn das Petrinetz-Konzept als intra- und interdisziplinäres Kommunikationsmedium gewürdigt wird; vgl. GENRICH (1976b), S. 4; PETRI, C. (1979c), S. 83; HACKMANN (1981), S. 372; HACKMANN (1982), S. 1, 22 u. 85. Die Stimulierung der intra- und interdisziplinären Kommunikation, die vom Petrinetz-Konzept ausgehen soll, wird der Forderung von PFOHL (1977), S. 278, nach "Kommunikationsfähigkeit ... für Fachleute" gerecht. Zu ihrer Einlösung trägt auch die Integrationsqualität des Petrinetz-Konzepts bei, die an anderer Stelle behandelt wird. Das Petrinetz-Konzept läßt sich aus dieser Perspektive als eine konzeptionelle Schnittstelle auffassen. Es stellt eine einheitliche, graphisch unterstützte Sprache zur Verfügung. Mit ihrer Hilfe können sich Fachleute, die auf verschiedenartige Konzepte spezialisiert sind, über ihre Arbeitsergebnisse verständigen. Vgl. dazu vor allem die Ausführungen zur Verwendung des Petrinetz-Konzepts als

einheitlichkeitsstiftendes Referenzkonzept. Auch MÜLLER-SILVA (1984a), S. 18f., empfiehlt, bei der Modellierung komplexer Probleme durch "interdisziplinäre Expertengruppen" eine einheitliche Modellierungssprache einzusetzen, um die Verständigung der Fachleute untereinander zu fördern.

44) Vgl. KWAN (1977a), S. 608; BRETSCHNEIDER (1980c), S. 41; HACKMANN (1982), S. 85; ROSENSTENGEL (1983). Die Kommunikationshilfe, die insbesondere den "gewöhnlichen" Mitarbeitern zugute kommt, entspricht der Anforderung von PFOHL (1977), S. 278, ein Konzept auch nach seiner "Kommunikationsfähigkeit für Nicht-Fachleute" zu beurteilen.

45) Vgl. ROSENSTENGEL (1983).

46) ROSENSTENGEL (1983) legt überzeugend dar, daß umfangreiche natürlichsprachliche Ergebniserläuterungen in der Modellierungspraxis erhebliche Kommunikationsbarrieren errichten können. Sie wirken auf die Zuhörer oftmals so ermüdend, daß die Rezeptionsbereitschaft nach kurzer Zeit drastisch sinkt. Diese Gefahr besteht bei kompakten Präsentationen von Netzgraphiken nicht.

In ähnlicher Weise beklagt SCHNEIDER, H.-J. (1978), S. 34, eine "Kommunikationsproblematik": Die Beschreibung komplexer Systeme durch natürliche Sprache oder einfache graphische Veranschaulichungen stoße an die Grenzen praktischer Handhabbarkeit. Denn über Beschreibungsprozesse und -ergebnisse könne nicht mehr in der erforderlichen Eindeutigkeit und Präzision kommuniziert werden. Auch diese Schwierigkeiten werden durch Netzgraphiken überwunden. Denn ihre formalsprachliche Beschriftungsmöglichkeit schafft die erforderliche Beseitigung von Mehrdeutigkeiten und Präzisionsmängeln. Darüber hinaus wird auf die Gestaltung Synthetischer Netze verwiesen. Dort sind die Netzgraphiken unmittelbar mit formalsprachlich verfaßten Netzlegenden gekoppelt.

47) Vgl. zum nachfolgend skizzierten Kompromißcharakter graphischer Repräsentationsformen AYACHE (1979a), S. 1050.

Der Kompromißaspekt hängt mit dem o.a. Gesichtspunkt der Anschlußfähigkeit eng zusammen. Dennoch handelt es sich um verschiedene Sachverhalte. Denn aus der Kompromißperspektive wird hervorgehoben, daß Netzgraphiken *weder* mit rein natürlichsprachlichen *noch* mit rein formalsprachlichen Modellierungen zusammenfallen. Insofern handelt es sich um eine Abgrenzung von natürlichen und formalen Sprachen. Aus dem Blickwinkel der Anschlußfähigkeit wird dagegen herausgestellt, daß sich *sowohl* einzelne natürlichsprachliche *als auch* einzelne formalsprachliche Anschriften in ein graphisch visualisiertes Netzmodell aufnehmen lassen. Dies bedeutet eine Einbeziehung von natürlichen und formalen Sprachen.

Es könnte der Einwand erhoben werden, daß der Graph, der ein Netzmodell repräsentiert, bereits ein formalsprachliches Konstrukt darstellt. Folglich sei es unzulässig, diese graphische Netzrepräsentation gedanklich von formalsprachlichen Modellierungen bzw. Anschriften abzuheben. Diese Vorhaltung übersieht jedoch, daß hier nicht der *mathematische* Graph einer Netzrepräsentation, sondern die *Visualisierung* einer graphischen Netzrepräsentation behandelt wird. Die Visualisierung stellt aber - im Gegensatz zu mathematischen Graphen - kein formalsprachliches Konstrukt dar.

48) Vgl. dazu den Hinweis auf die Anschlußfähigkeit von graphisch visualisierten Netzmodellen.

49) Das wurde oben explizit ausgesprochen.

50) Die Präzision beruht auf der formalsprachlichen Anschlußfähigkeit. Hinzu kommt die Erfassung quantitativer Aspekte durch zählbare Markenkopien. Vgl. auch zur positiven Würdigung der Präzision von (graphisch visualisierten) Netzmodellen LOCKEMANN (1975), S. 11; PETRI, C. (1976b), S. 11; TOURRES (1976), S. 217; PETRI, C. (1977a), S. 132; KWAN (1977a), S. 608; HAN (1978a), S. 166; AGERWALA (1978a), S. 149; AGERWALA (1979), S. 85; GIRAULT (1982a), S. 14; YOELI (1982b), S. 8; KIEBLER (o.J.), S. 40.

51) Dies wurde ebenso schon kurz zuvor explizit dargelegt.

52) Auf die hohe Akzeptanz graphischer Repräsentationsformen deutet ihre große Verbreitung hin. Der Verbreitungsaspekt wurde schon kurz zuvor angesprochen.

53) Vgl. HAN (1979), S. 270; BRETSCHNEIDER (1980d), S. 25; HACKMANN (1981), S. 372; HACKMANN (1982), S. 85; ROSENSTENGEL (1983).

Es existieren auch schon Empfehlungen, auf welche Weise die Visualisierungen von umfangreichen, graphisch repräsentierten Netzmodellen aus einfachen Graphiksymbolen systematisch aufgebaut werden sollen, um schließlich wohlstrukturierte Dokumentation der Netzgraphiken zu erhalten. Richtungsweisend für diesen Dokumentationsansatz ist die Arbeit von OBERQUELLE (1981b). Er stützt sich seinerseits auf eine graphische Semiotik (*semiotique graphique*), die von BERTIN im Jahr 1974 konzipiert wurde; vgl. OBERQUELLE (1981b), S. 1.1. OBERQUELLE erläutert diese graphische Semiotik zunächst ausführlich (S. 2.3ff.). Später leitet er daraus Kompositionsregeln für Netzgraphiken ab (S. 4.1ff.). Sein Ansatz für die Dokumentation von Netzgraphiken findet sich ebenso bei OBERQUELLE (1981a), S. 5ff.; OBERQUELLE (1982a), S. 13f.; REISIG (1982d), S. 8f.

Einen besonderen Aspekt der Dokumentationsfreundlichkeit von Netzmodellen schneidet PAGNONI (1990), S. 164, an. Sie befaßt sich mit der Dokumentation von *Modellanwendungen*. Dabei werden in einem Netzmodell Schalt-

prozesse zunächst geplant und später ausgeführt. Diese Prozeßausführungen lassen sich als Netzabwicklungen behandeln. Daher können sie als Geschehnisnetze dargestellt werden. Die graphischen Repräsentationen der Geschehnisnetze eignen sich vorzüglich, um die tatsächlichen Ausführungen der geplanten Schaltprozesse zu dokumentieren. Die Dokumentationsfreundlichkeit dieses Ansatzes beruht im wesentlichen auf seiner kompakten und anschaulichen Explizitheit. Denn in einem Netzmodell sind zwar alle zulässigen Schaltprozesse enthalten. Sie werden dort aber erst durch die Konstruktion des Erreichbarkeitsgraphen expliziert. Der Erreichbarkeitsgraph fällt für Netzmodelle, die reale Koordinierungsprobleme repräsentieren, so groß aus, daß er sich kaum übersichtlich dokumentieren läßt. Aber selbst wenn der Erreichbarkeitsgraph auf die jeweils geplanten Schaltprozesse eingeschränkt wird, so bleibt er in seiner Konstruktion immer noch recht unanschaulich. Insbesondere zwingt er die Benutzer von Netzmodellen dazu, sich von den Knoten- und Kantenbedeutungen in Netzen auf die *andersartigen* Knoten- und Kantenbedeutungen in Erreichbarkeitsgraphen umzustellen.

Diese Schwierigkeiten werden durch die Anwendung von Geschehnisnetzen vermieden. Jedes Geschehnisnetz repräsentiert die Ausführung von genau einem geplanten Schaltprozeß explizit. Die Geschehnisnetze fokussieren sich auf genau diejenigen geplanten Prozeßausführungen, die einen Modellierungsträger tatsächlich interessieren. Daher fallen Geschehnisnetze wesentlich kompakter aus als vollständige Erreichbarkeitsgraphen. Darüber hinaus sind Geschehnisnetze anschaulicher als Erreichbarkeitsgraphen, die auf die geplanten Schaltprozesse eingeschränkt wurden. Denn in Geschehnisnetzen werden die Knoten- und Kantenbedeutungen aus dem zugrundeliegenden, prozeßspezifisch "abgewickelten" Netzmodell nahezu unverändert übernommen. Lediglich eine Besonderheit ist zu beachten. In Netzmodellen wird jede Transition nur genau einmal dargestellt, kann aber - sofern sie jeweils aktiviert ist - beliebig oft geschaltet werden. In Geschehnisnetzen repräsentiert dagegen jeder transitionsartige Knoten genau einen Schaltakt einer Transition. Falls dieselbe Transition im selben Schaltprozeß mehrfach geschaltet wird, enthält das prozeßspezifische Geschehnisnetz entsprechend viele transitionsartige Knoten: je einen Knoten für jeden Schaltakt derselben Transition. Diese Besonderheit folgt notwendig aus der Funktion von Geschehnisnetzen, die *tatsächlichen Ausführungen* von Schaltprozessen wiederzugeben. Gerade deswegen empfehlen sich Geschehnisnetze für die Dokumentation von Prozeßausführungen. Dies hat PAGNONI (1990) auf S. 164ff., insbesondere S. 166ff., anhand einfacher Beispiele demonstriert.

In späteren Arbeiten könnte untersucht werden, ob sich dieser Ansatz zu einer schritthaltenden Dokumentation von Prozeßausführungen ausbauen läßt. Aus theoretischer Perspektive bereitet es keine Schwierigkeiten, für jeden Schaltprozeß, der in einem Netzmodell ausgeführt wird, das zugehörige Geschehnisnetz zu konstruieren. PAGNONI (1990), S. 165, hat für diesen Zweck bereits einen einfachen Konstruktionsalgorithmus vorgelegt. Die praktische Anwendung dieses Konstruktionsalgorithmus ist jedoch mühselig. Daher ist an eine schritthaltende Dokumentation von Prozeßausführungen erst zu denken, wenn auf Unterstützungsleistungen der Automatischen Informationsverarbeitung zurückgegriffen werden kann. Dieser Aspekt wird an anderer Stelle ausführlicher behandelt. Die Netzeditoren und -analysatoren, die dort angesprochen werden, lassen sich durch den o.a. Konstruktionsalgorithmus erweitern. Sobald dies geschehen ist, kann z.B. *während* der simulativen Auswertung eines Netzmodells das Geschehnisnetz für den ausgeführten Schaltprozeß automatisch generiert werden. Das Geschehnisnetz tritt neben die anschauliche - aber vergängliche - Visualisierung des Markenflusses am Bildschirm als eine ebenso anschauliche, aber dauerhafte Dokumentation der Prozeßausführung. In dieser Arbeit wurde die automatengestützte Implementierung von Synthetischen Netzen allerdings nur vorbereitet, jedoch nicht konkret ausgeführt. Daher müssen die voranstehenden Gedankenskizzen für eine schritthaltende Dokumentation von Prozeßausführungen einer späteren Netzimplementierung vorbehalten bleiben. Vgl. dazu auch den expliziten Implementierungsvorbehalt bei PAGNONI (1990), S. 164.

54) So sorgt der Ausdrucksreichtum für die Vollständigkeit der Ergebnisdokumentation. Die unmittelbare Anschaulichkeit verhilft zu klaren und leicht "lesbaren" Dokumenten. HACKMANN (1981), S. 372, spricht in diesem Zusammenhang von selbstdokumentierenden Netzgraphiken, die u.a. noch durch erläuternde Texte und Abbildungen ergänzt werden können. Die Präzision graphischer Netzmodelle erlaubt korrekte und eindeutige Ergebnisfixierungen. Die Kompaktheit ermöglicht übersichtliche Netzdarstellungen.

Vgl. darüber hinaus die Anmerkungen zur schritthaltenden Dokumentation von Netzmodellen. Sie läßt sich durch die interaktive Nutzung von automatengestützten Entwicklungsumgebungen realisieren. Auch ROSENSTENGEL (1983) würdigt die besondere Eignung des Petrinetz-Konzepts zur schritthaltenden Dokumentation während der Modellentwicklung. Allerdings hebt er nicht auf interaktiv genutzte Automatische Informationsverarbeitungssysteme ab. Vielmehr denkt er an eine Vielfalt von Netzgraphiken, die den Modellierungsprozeß als "Handskizzen" begleiten.

Schließlich tragen zur Dokumentationsfreundlichkeit des Petrinetz-Konzepts Bemühungen bei, die seine Standardisierung betreiben. Denn Darstellungs- und Interpretationsstandards unterstützen durch ihre zeit- und raumüberbrückende Verbindlichkeit, daß die Verfasser und die Leser von dokumentierten Modellen ein gemeinsames Modellierungsverständnis teilen. Auf die Standardisierung des Petrinetz-Konzepts wird an anderer Stelle näher eingegangen. Allerdings wird dort auch aufgezeigt, daß sich einheitliche Konzeptstandards bislang weder umfassend durchgesetzt haben noch von allen Gruppierungen in der "Petrinetz-Gemeinde" gewünscht werden.

55) Die meisten Netzeigenschaften lassen sich erst mit Hilfe der Auswertungstechniken überprüfen, die in einem früheren Teilband ausführlicher vorgestellt werden. Allenfalls einfache Erkenntnisse über statische Netzeigenschaften, insbesondere über die Netztopologie, können durch unmittelbare Anschauung von Netzgraphiken gewonnen werden. Dazu gehört z.B. die Untersuchung, ob ein Netzmodell zur Klasse der Synchronisationsgraphen gehört. Zu diesem Zweck reicht es aus festzustellen, ob mindestens eine Stelle mit mehreren Ein- oder mehreren Ausgangskanten existiert.

56) Vgl. ROSENSTENGEL (1983).

57) Ein solches Urteil hängt von Präsuppositionen darüber ab, welche intellektuellen Fähigkeiten beim "typischen" Benutzer eines Modellierungskonzepts vorausgesetzt werden können. Strenggenommen müßte dies durch empirische, vor allem kognitionspsychologische Untersuchungen geklärt werden. Sie liegen aber außerhalb des Erkenntnisrahmens dieser Arbeit. Statt dessen wird hier ein Modellierungsträger unterstellt, der in formaler Hinsicht nur über einfache Grundkenntnisse verfügt. Ohne sich auf die genauen Inhalte und Grenzen dieser Grundkenntnisse festzulegen, erwartet der Verf. keine vehemente Opposition, wenn er die o.a. Aspekte - wie z.B. Prädikatenlogik und sortierte Algebren - nicht zu diesen formalen Grundkenntnissen rechnet. Dies unterstreicht DITTRICH, G. (1989b), S. 2, mit der Feststellung: "Rein formale, mathematisch orientierte Notationen (algebraische Spezifikation) behindern die Kommunikation zwischen der Entwickler- und der Anwendergruppe." Der ausdrücklich erwähnte Formalismus von algebraischen Spezifikationen spielt auch bei Synthetischen Netzen eine eminente Rolle.

58) Vgl. zum Wunsch nach Kontinuität in der Verwendung symbolischer Notationsformen CZERANOWSKY (1980), S. 54.

59) Bemerkenswert ist die Diskrepanz zwischen der mangelhaften Vertrautheit formaler Netzmodelle einerseits und der großen Vertrautheit von graphischen Modellvisualisierungen andererseits. Dies mag ein Grund dafür sein, daß Petrinetze mitunter auf ein rein visuelles Kommunikationsinstrument reduziert werden. Abweichender Ansicht ist lediglich JOHNSON, R.R. (1982), S. 74. Er attestiert Petrinetzen eine ausreichende Vertrautheit, allerdings auch nur hinsichtlich des Einsatzes Automatischer Informationsverarbeitung.

60) Vgl. zu den Akzeptanzhürden mangelnder Vertrautheit PRESSMAR (1982), S. 341.

61) Übereinstimmender Ansicht sind ROSENSTENGEL und WINAND. Sie heben hervor, die erheblichen mathematischen Voraussetzungen des Petrinetz-Konzepts hätten seine Verbreitung maßgeblich behindert. Gleiches gelte infolge seiner einseitigen Orientierung an (formalen) Konzepten der Informatik. Diese formalen Hürden seien im wesentlichen Schuld daran, daß Netzmodelle in Rahmen von Operations Research und Betriebswirtschaftslehre keine nennenswerte Beachtung gefunden haben. Vgl. ROSENSTENGEL (1991), S. VII u. 2. Dieses Verbreitungsargument bedarf allerdings einer Einschränkung. Denn in neuerer Zeit ist das Petrinetz-Konzept schon auf einige betriebswirtschaftlich ausgerichtete Modellierungen angesetzt worden. Vgl. dazu die Hinweise in der Einleitung dieser Arbeit. Jedoch haben diese Beiträge im betriebswirtschaftlichen Bereich - einschließlich des Operations Research - noch keine größere Beachtung gefunden. Vgl. dazu die Einschätzung von SCHMITZ und SZYPERSKI in SCHMITZ, P. (1991), S. V.

62) Vor dieser Gefahr hat ROSENSTENGEL (1983), eindringlich gewarnt.

63) Das trifft beispielsweise auf die Repräsentation von Prioritäten oder von zeitbezogenen Einflußgrößen zu.

64) In einer früheren Anmerkung wurde schon auf die verbreitete Ansicht hingewiesen, Petrinetze würden bei der Modellierung von Realproblemen rasch überaus umfangreich und detailliert werden. Diese mangelnde Kompaktheit stünde ihrem Verständnis und ihrer praktischen Handhabung entgegen. In der vorgenannten Anmerkung wurde aber auch schon dargelegt, daß die Quellen, in denen jene Ansicht vertreten wird, sich im allgemeinen auf Niedere Netze, wie z.B. Stelle/Transition-Netze, beziehen.

65) Es wurde bereits ausführlich dargelegt, daß Höhere Netze beträchtlich größere allgemeine und spezielle Modellierungsfähigkeiten besitzen als Stelle/Transition-Netze. Die größere Kompaktheit von Höheren Netzen beruht darauf, daß sich Niedere Netze oftmals als Entfaltungen oder Abwicklungen von Höheren Netzen begreifen lassen. Diese Kompaktifizierung kommt allerdings nur für jene Sachverhalte in Betracht, die von beiden Netzkategorien repräsentiert werden können.

66) Vgl. KWAN (1977a), S. 608; HEIMERDINGER (1978), S. 161; WINAND (1980), S. 1252; HACKMANN (1981), S. 372; STAHLKNECHT (1982), S. 120; REISIG (1983a), S. 309; SCHMITZ, P. (1991), S. V; ROSENSTENGEL (1991), S. 2; KIEBLER (o.J.), S. 41.

67) Die unmittelbare Anschaulichkeit und intuitive Verständlichkeit von Netzgraphiken legen es nahe, daß ihre Anwendung leicht erlernt werden kann.

Die Einschränkung der leichten Erlernbarkeit auf graphisch visualisierte Netzrepräsentationen geht auch aus Einlassungen von GENRICH (1980a), S. 154, und ROSENSTENGEL (1983) hervor. Sie betonen, daß "gewöhnliche" Netz-

anwender ("Nichtspezialisten") nur einige wenige und einfache Regeln erlernen müßten, um Netzmodelle auf *informale* Weise handhaben zu können.

68) Vgl. WINAND (1980), S. 1252; PERL (1980), S. 11.f.; IGEL (1986b), S. 1 (mittelbar durch: "Sukzessives Verfeinern erlaubt das Arbeiten mit überschaubaren Teilsystemen."); ROSENSTENGEL (1991), S. 37 (dort thematisiert als die "Chance, sich jeweils auf das ... Wesentliche der betrachteten einzelnen Prozesse zu konzentrieren"). Analoge Konzentrationstechniken werden auch bei der visuellen Präsentation der Abhängigkeitsgraphen von Hypertext-Strukturen diskutiert; vgl. dazu FEINER (1988), S. 205f. ("scrollable window", "focal points" und "fisheye views").

69) Auf die Verfeinerungs- und Vergrößerungsmöglichkeiten von Netzmodellen wurde bereits im Zusammenhang mit der Konstruktivität des Petrinetz-Konzepts eingegangen. Das "Zoomen" eines Netzbereichs erstreckt sich zunächst nur auf dessen Verfeinerung. Jede Netzvergrößerung kann aber als die Umkehrung eines - gedanklich vorangehenden - Zoomprozesses vorgestellt werden. Daher werden hier Verfeinerungen und Vergrößerungen von Netzmodellen gemeinsam als Anwendungsmöglichkeiten eines weit aufgefaßten "Zoom"-Effekts behandelt.

70) Als Medien für die Darstellung visualisierter Netze werden einerseits Printmedien und andererseits Bildschirme von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen berücksichtigt.

71) Die Präsentationsbeschränkungen, denen Netzmodelle für reale Probleme unterliegen, sind schon früh in Erscheinung getreten. So hat z.B. bereits NOE (1971), S. 371, über die physikalischen Grenzen geklagt, die Bildschirme von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen bei der (graphischen) Darstellung von Netzmodellen errichten. Vgl. auch FEINER (1988), S. 205f., zur Diskussion ähnlicher Präsentationsschwierigkeiten, die bei den Abhängigkeitsgraphen von Hypertext-Strukturen auftreten.

72) Daneben läßt sich daran denken, auf welche Darstellungsdimensionen das Präsentationsmedium beschränkt ist - oder durch Entscheidungen des Präsentationsverantwortlichen eingeengt wird. Printmedien erlauben z.B. zunächst nur eine zweidimensionale Darstellung von flachen Netzen. Die dritte Darstellungsdimension kann aber durch perspektivische Netzpräsentationen so simuliert werden, daß der Eindruck von "plastischen", die räumliche Tiefe ausnutzenden Netzen resultiert. Gleiches gilt im Prinzip auch für Automatische Informationsverarbeitungssysteme. Darüber hinaus erschließen aber Automatische Informationsverarbeitungssysteme - im Gegensatz zu Printmedien - die vierte Darstellungsdimension. Denn die Visualisierung von Schaltprozessen, die in einem Netzmodell ablaufen, läßt sich am Bildschirm durch einen entsprechenden Markenfluß ohne größere Schwierigkeiten verwirklichen.

Im Kontext des hier thematisierten "Zoom-Effekts" interessiert zunächst nur die zweidimensionale Darstellungsmöglichkeit für Netze. Sie reicht aus, um den jeweils interessierenden Netzausschnitt zu präsentieren. In dieser Hinsicht lassen weder Printmedien noch Automatische Informationsverarbeitungssysteme besondere Restriktionen erkennen. Allerdings kann das Verständnis für den jeweils betrachteten Netzausschnitt dadurch gefördert werden, daß seine verfeinernde oder vergrößernde Einbettung in das zugrundeliegende Gesamtmodell visualisiert wird. Hierfür ist die dritte Darstellungsdimension erforderlich, weil Netzverfeinerungen und -vergrößerungen in hierarchischer Weise erfolgen. Printmedien und Automatische Informationsverarbeitungssysteme gestatten zwar solche dreidimensionalen Netzdarstellungen grundsätzlich. Aber sie unterliegen dabei doch deutlicheren praktischen Einschränkungen. Denn die perspektivische Präsentation von tiefen Netzen erfordert bei der Verwendung von Printmedien bereits erhebliches graphisches Geschick. Dennoch stoßen oftmals schon kleine Beispielnetze rasch an die Grenze der visuellen Unübersichtlichkeit. Vgl. dazu die perspektivisch projizierten Visualisierungen von tiefen Netzen bei FEHLING (1990a), S. 15, 23 (!) u. 33, und FEHLING (1991), S. 376 u. 379 (!); vgl. auch das Beispiel am Ende dieses Kapitels (Abb. 214). Im Bereich Automatischer Informationsverarbeitungssysteme wird die dritte Darstellungsdimension zur Zeit sogar nur von kaum einem Softwareprogramm so beherrscht, daß es in der Lage wäre, aus der formalen Spezifikation eines tiefen Netzes seine perspektivische Präsentation zu generieren. Allenfalls kann mit konventionellen Graphikprogrammen gearbeitet werden, mit deren Hilfe ein tiefes Netz genau so wie in Printmedien "gezeichnet" wird. In diesem Fall ist wiederum das entsprechende graphische Geschick des Programmbenutzers erforderlich.

Die Automatische Informationsverarbeitung bietet jedoch eine interessante Zukunftsperspektive für die echte dreidimensionale Darstellung tiefer Netze, die nicht auf die perspektivische Nachempfindung der dritten Dimension beschränkt bleibt. Es handelt sich um das holographische Speichern und Wiederabrufen von optischen Informationen. Diese Technik läßt sich grundsätzlich benutzen, um die dreidimensionale Topologie von hierarchisch verfeinerten oder vergrößerten Netzmodellen als plastisches Hologramm im Raum zu präsentieren. Innerhalb eines solchen Hologramms kann auch derjenige Modellausschnitt, der einen Modellierungsträger aktuell besonders interessiert, in seinen Verfeinerungs- oder Vergrößerungszusammenhang eingebettet werden. Dabei läßt sich der Modellausschnitt z.B. farbig hervorheben. Zur Zeit bleibt diese holographische Präsentation tiefer Netze jedoch eine ferne Zukunftsperspektive. Immerhin liegen schon einige bemerkenswerte Resultate aus der Erforschung holographischer Speicher- und Wiederabruftechniken für optisch codierte Informationen vor; vgl. BECKER, P. (1979), S. 27ff.; BOLLE (1980), S. 59ff.; BELL, T. (1986), S. 50f.; ABU-MOSTAFA (1987), S. 55ff. (besonders deutlich hinsichtlich der Reproduktion dreidimensionaler Bildinformationen auf S. 56); GRAEFEN (1991), S. 78 (als Andeutung).

73) Bei der Verwendung von Printmedien handelt es sich in der Regel um die Seitengröße. Beim Einsatz Automatischer Informationsverarbeitungssysteme gibt die Bildschirmgröße den Ausschlag. Denn für beide Fälle gilt: Netz-

darstellungen bleiben nur so lange übersichtlich, wie ihre visuelle Präsentation auf eine Print- oder Bildschirmseite beschränkt werden kann.

74) Die optische Auflösung spielt bei Printmedien zumeist keine restriktive Rolle. Dies gilt zumindest dann, wenn "professionelle" Drucktechniken wie Laserdrucker oder Photosatz verwendet werden. Dagegen erweist sich die optische Auflösung beim Einsatz Automatischer Informationsverarbeitungssysteme oftmals als eine Einschränkung der Benutzerfreundlichkeit. Denn die Auflösung vorherrschender Bildschirmtypen reicht - im Vergleich zu Printmedien - nur für recht grobe Netzpräsentationen aus. Zwar bieten hochauflösende Bildschirme, die zusammen mit den zugrundeliegenden Graphikprozessoren und Graphikkarten auf die Präsentation von optisch dichten Graphiken zugeschnitten sind, einen Ausweg. Vgl. dazu z.B. die Überblicksdarstellungen bei JACOBI (1991), S. 58 u. 60, sowie GRAEFEN (1991), S. 70ff. Aber ihre heute noch erheblichen Anschaffungskosten wirken im allgemeinen prohibitiv. Sie gelangen in betriebswirtschaftlichen Einsatzbereichen - abgesehen vom CAD-Bereich - kaum zur Anwendung. Darüber hinaus vermag die Flimmerfreiheit von hochauflösenden Bildschirmpräsentationen heute oftmals noch nicht zu befriedigen; vgl. JACOBI (1991), S. 60 (bezüglich der interlacing-Technik); GRAEFEN (1991), S. 78 (insbesondere die dort thematisierte 72 Hz-Schwelle für die Vertikalfrequenz). Aufgrund der voranstehend skizzierten Einschränkungen können hochauflösende Bildschirme die hohe Auflösungsdichte und Flimmerfreiheit von professionellen Printmedien zur Zeit nicht erreichen.

75) Vgl. BECKER, B. (1991), S. 30.

76) Gemeint sind hiermit die hohe Kapazität für die Informationsspeicherung und die große Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit. Die hohe Speicherkapazität dient dazu, um alle Informationen über ein Netzmodell innerhalb eines Automatischen Informationsverarbeitungssystems vorzuhalten. Die große Verarbeitungsgeschwindigkeit wird hingegen genutzt, um aus dieser gespeicherten Informationsgesamtheit rasch jene Modellierungsausschnitte zu erzeugen, die vom Modellierungsträger an der Benutzerschnittstelle gewünscht werden.

77) Daher lassen sich die vertikale und die horizontale Fokussierung ebenso als vertikales bzw. horizontales "Zoomen" bezeichnen.

78) Der Begriff des "Navigierens" wird hier in bewußter Anlehnung an den gleichlautenden Terminus technicus für das Erforschen von Hypertext-Dokumenten verwendet. Auf das Hypertext-Konzept wurde schon zu Beginn dieser Arbeit aufmerksam gemacht. In den Quellen, die dort genannt wurden, finden sich ausführliche Erläuterungen, wie die Navigation durch Hypertext-Dokumente ausgestaltet werden kann.

Allerdings wird dort auch das Phänomen beschrieben, daß sich ein Dokumentbenutzer beim Navigieren durch ein Hypertext-Dokument verirren kann: Er verliert den Überblick, an welcher Dokumentstelle er sich aktuell befindet oder wie er an eine gewünschte Dokumentstelle gelangen kann. Für diese Schwierigkeit ist der plastische Ausdruck "lost in hyperspace" geprägt worden; vgl. LATZ (1990), S. 336; FISCHER, R. (1991), S. 64.

Eine analoge Gefahr droht bei umfangreichen Netzmodellen, durch deren graphische Repräsentation ein Modellierungsträger in der oben skizzierten Weise navigiert. Auch hier kann die Orientierung darüber verloren gehen, welchen Ausschnitt aus dem gesamten Netzmodell der Modellierungsträger aktuell betrachtet oder wie er einen gewünschten Modellausschnitt zu erreichen vermag. Daher ließe sich - wiederum in Anlehnung an das Hypertext-Konzept - vom Risiko des "lost in netspace" reden. Um dieses Risiko zu verringern, sind entsprechende Navigationshilfen vorzusehen.

Als eine einfache Navigationshilfe drängen sich die graphischen Visualisierungen von Makroknoten auf, die in dieser Arbeit eingeführt wurden. Ihre schattierte Darstellung läßt den Modellierungsträger unmittelbar erkennen, daß er einen solchen Knoten verfeinern lassen kann. Derart schattierte Makroknoten lassen sich im Rahmen moderner graphischer Informationsverarbeitungssysteme als plastisch hervorgehobene "buttons" implementieren. Der Systembenutzer kann eine "Maus" benutzen, um den "button" eines Makroknotens "anzuklicken". Dabei wird der Makroknoten durch sein verfeinerndes Subnetz ersetzt. Um dieses Subnetz in seinen Details an der graphischen Benutzerschnittstelle besser betrachten zu können, läßt es sich - entweder automatisch oder aber auf einen ausdrücklichen Benutzerwunsch hin - in den Vordergrund rücken. In komplementärer Weise ist es möglich, in der Visualisierung einer Netzgraphik ein Teilnetz optisch hervorzuheben, wenn es auf einer höheren Hierarchieebene zu einem Makroknoten verdichtet wird. Die optische Auszeichnung des Teilnetzes kann z.B. durch eine farbige oder eine grau schraffierte Unterlegung des Teilnetzbereichs geschehen. Abermals liegt es nahe, den Systembenutzer in die Lage zu versetzen, durch ein "Anklicken" der Bereichsunterlegung die automatische Teilnetzverdichtung zu einem Makroknoten zu veranlassen.

Die beiden zuvor skizzierten Navigationshilfen unterstützen einen Modellierungsträger dadurch, daß sie ihm anzeigen, durch welche Knotenverfeinerungen oder Teilnetzverdichtungen er innerhalb eines hierarchisch konstruierten Netzmodells in vertikaler Richtung hinab- bzw. hinaufzusteigen vermag. Ähnliche Hilfestellungen lassen sich vorstellen, um horizontale Fokussierungen zu erleichtern. Beispielsweise kann dem Modellierungsträger die Option angeboten werden, durch Verschieben eines "Fensters" mit variabler Größe jenes Teilnetz festzulegen, auf das er sich im folgenden konzentrieren möchte. Das umgebende Restnetz derselben Hierarchieebene wäre dann an der graphischen Benutzerschnittstelle auszublenden.

Navigationshilfen der vorgenannten Art sind aus dem Bereich der graphischen Informationsverarbeitung im Prinzip bekannt. Dabei stehen Implementierungen von Hypertext-Konzepten im Vordergrund. Vgl. z.B. FEINER (1988), S. 205ff. (insbesondere auf S. 205 zu verschiebbaren Fenstern); NASTANSKY (1990b), S. 521ff. (insbesondere die Abbildungen auf S. 522 u. 524 zu den anklickbaren "buttons"). Jedoch sind dem Verf. bislang noch keine automatengestützte Entwicklungsumgebungen für Netzmodelle bekannt geworden, die solche Navigationshilfen bereits anbieten. Es handelt sich daher lediglich um Anregungen für künftige informationstechnische Beiträge zum Petrinetz-Konzept. Noch weiter in die Zukunft reicht die Vorstellung, einen Grobübersicht über ein gesamtes Netzmodell als dreidimensionales Hologramm zu gewähren. Durch einen intensiven Lichtpunkt läßt sich darin die aktuelle Position desjenigen Modellausschnitts anzeigen, der an der Benutzerschnittstelle als übersichtliche Netzgraphik präsentiert wird. Jede Veränderung des Modellausschnitts würde zu einer entsprechenden Verlagerung des Lichtpunkts im Hologramm führen. Auf diese Weise erhielte der Modellierungsträger jederzeit einen - im engsten Wortsinne - anschaulichen Einblick, wie er aufgrund seiner Modellierungsaktivitäten durch das zugrundeliegende Gesamtmodell navigiert. Mit einem "lost in net space" wäre kaum noch zu rechnen. Jedoch bleibt die Idee, Navigationspositionen und -bewegungen in Hologrammen zu illuminieren, derzeit auf die Sphäre spekulativer Visionen beschränkt.

79) Zur Verdeutlichung werden in den nachfolgenden Abb. 214 bis 217 die Visualisierungen eines extrem vereinfachten, hierarchisch konstruierten und graphisch repräsentierten Netzmodells skizziert. Die erste Abbildung zeigt die projizierte dreidimensionale Gesamtansicht des Netzmodells. Die unterbrochenen, vertikal verlaufenden Linien veranschaulichen, welche Knoten und Subnetze auf den verschiedenen Hierarchieebenen des Gesamtmodells einander zugeordnet sind. Die wechselseitigen Zuordnungen gehen ebenso aus den Knotenindizierungen hervor. Obwohl ein rudimentäres Netzmodell zugrundeliegt, das bei weitem nicht den Umfang von Netzmodellen für interessante Realprobleme erreicht, fällt die verschachtelte Projektion der hierarchischen Netzgraphik bereits recht unübersichtlich aus.

Die drei anschließenden Abbildungen präsentieren hingegen übersichtliche Modellausschnitte, die aus verschiedenen Fokussierungen eines Modellierungsträgers resultieren: Abb. 215 zeigt nur das Grobnetz, das sich dem Modellierungsträger bietet, wenn er sich auf die oberste Hierarchieebene des Netzmodells konzentriert (vertikale Fokussierung). Dort lenkt der Modellierungsträger seine Aufmerksamkeit auf denjenigen Bereich, der durch die unterbrochene fette Linie eingegrenzt ist (horizontale Fokussierung). Zugleich wählt er den Makroknoten einer Transition für eine Verfeinerung aus. Es resultiert der partiell verfeinerte Modellausschnitt, dessen graphische Visualisierung die Abb. 216 wiedergibt. Durch eine weitere Makroknotenverfeinerung gelangt der Modellierungsträger schließlich zum Modellausschnitt der Abb. 217.

Ein Vergleich der ersten Abbildung mit den drei letzten Abbildungen läßt erahnen, daß die benutzergesteuerte Visualisierung einzelner Modellausschnitte jeweils eine größere Transparenz besitzt als die Projektion der dreidimensionalen Gesamtansicht eines hierarchisch verfeinerten Netzmodells. Jeder einzelne Modellausschnitt fokussiert die Aufmerksamkeit auf die aktuell interessierenden Netzaspekte. Zugleich wird die Informationsüberlastung vermieden, die bei der projizierten Gesamtansicht durch jene Netzaspekte verursacht wird, die für den Modellierungsträger unwichtig sind. Beispielsweise hegt der Modellierungsträger in dem hier betrachteten Netzmodell kein näheres Interesse an der (Makro-)Transition t_2 . Daher wird diese Transition bereits bei der ersten Ausschnittbildung ausgeblendet. In der Gesamtansicht des hierarchischen Netzmodell muß dagegen auf jeder Hierarchieebene entweder diese Transition oder aber ihr verfeinerndes Subnetz berücksichtigt werden.

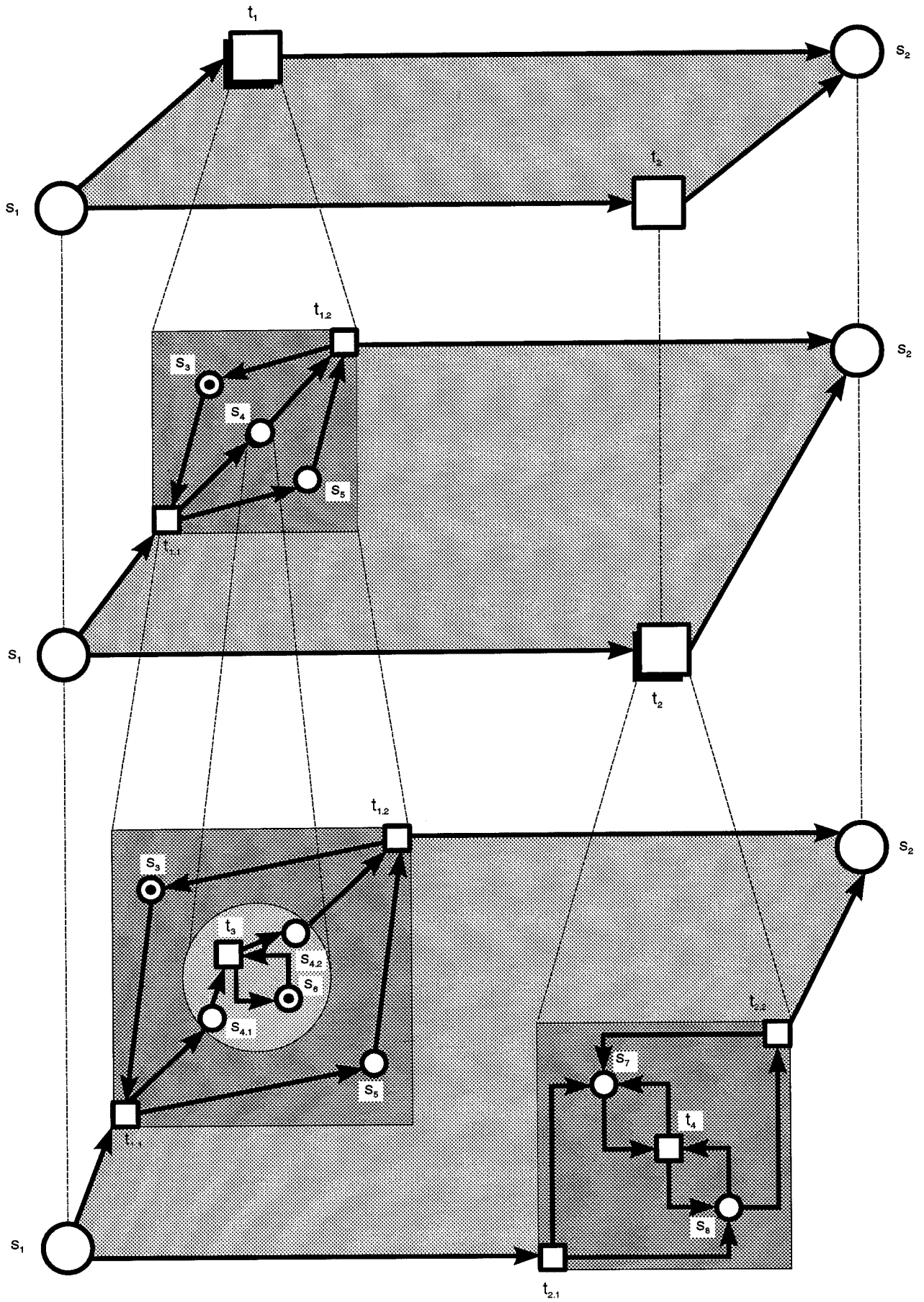


Abb. 214: Projektion der dreidimensionalen Gesamtansicht eines hierarchischen Netzmodells

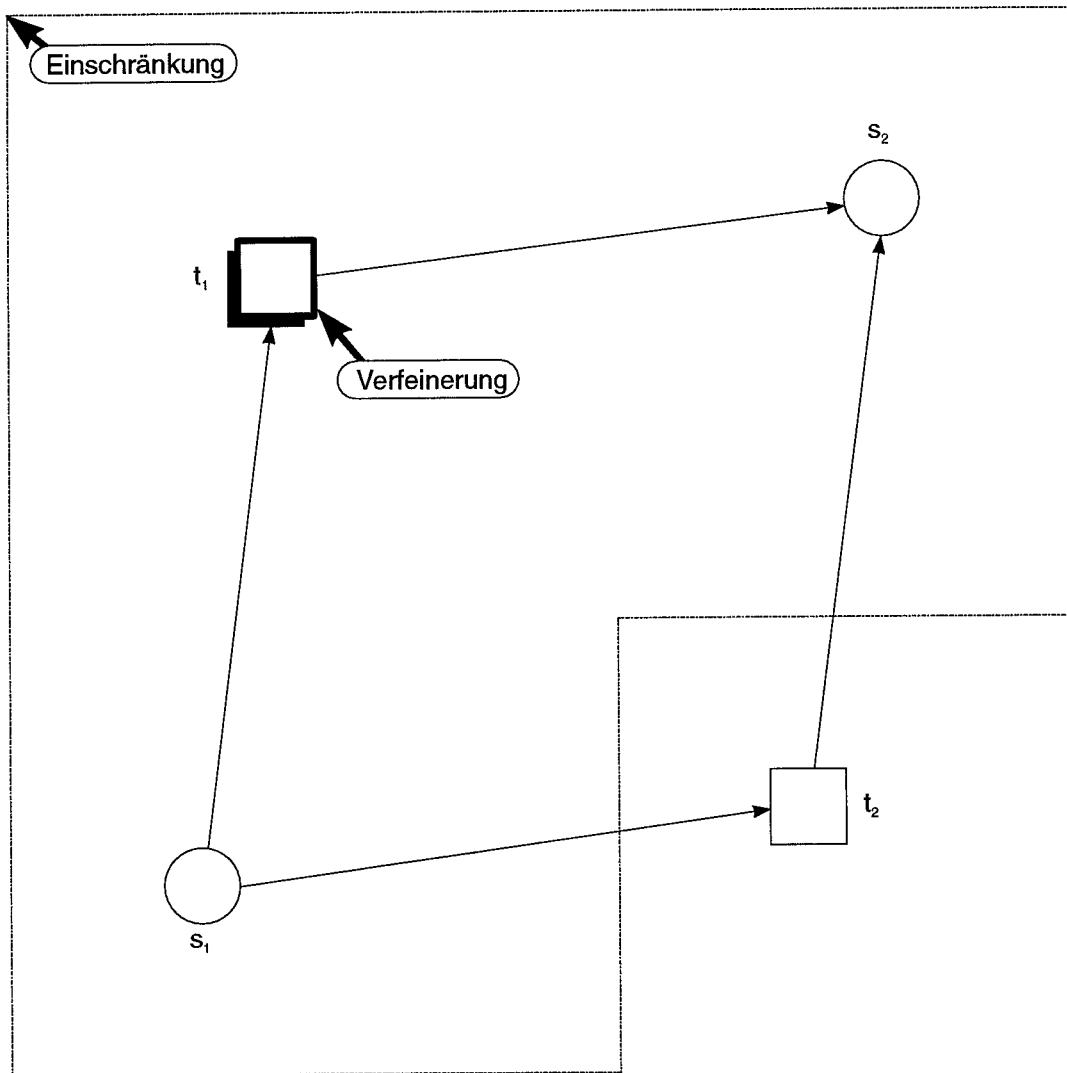


Abb. 215: Grobnetz für das hierarchische Netzmodell aus Abb. 214 auf der obersten Hierarchieebene

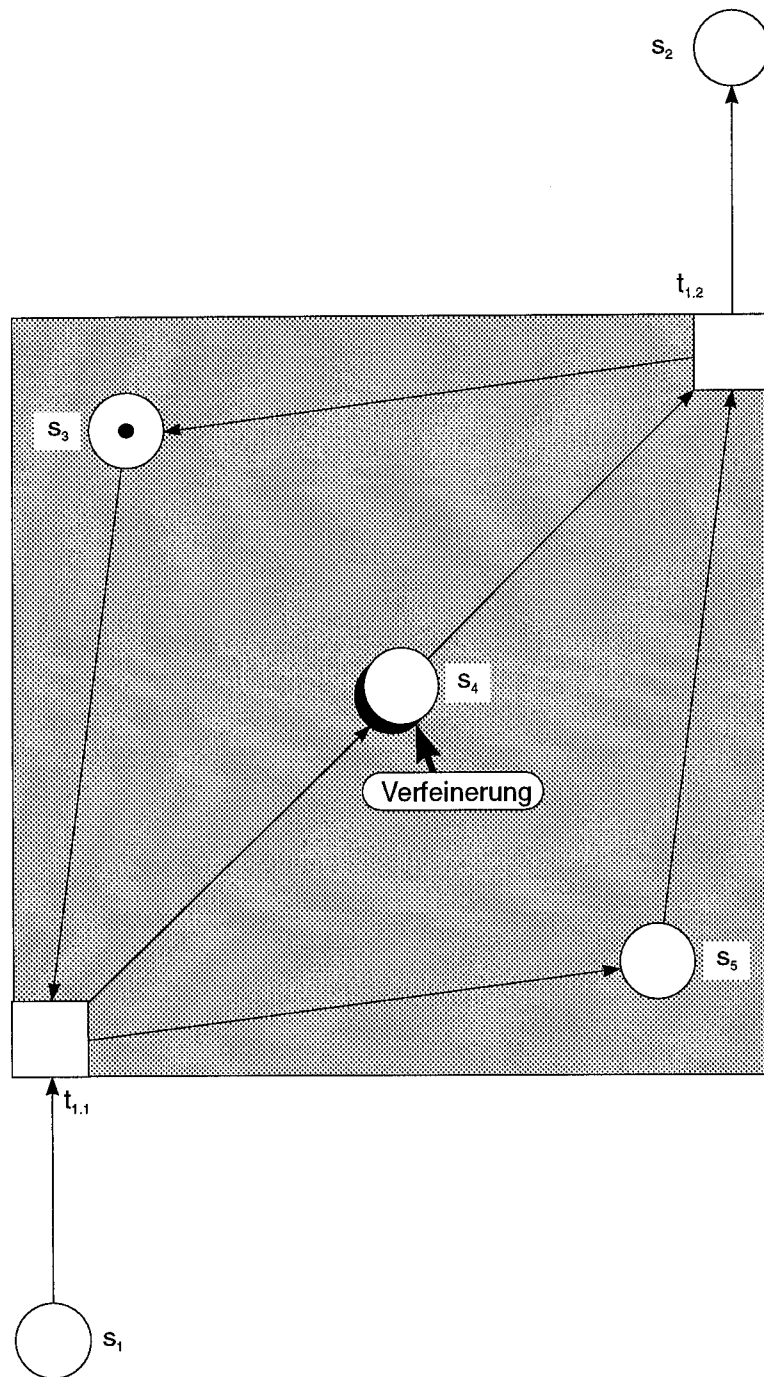


Abb. 216: Partiiell verfeinertes Teilnetz für einen ersten Ausschnitt aus dem hierarchischen Netzmodell der Abb. 214 auf der mittleren Hierarchieebene

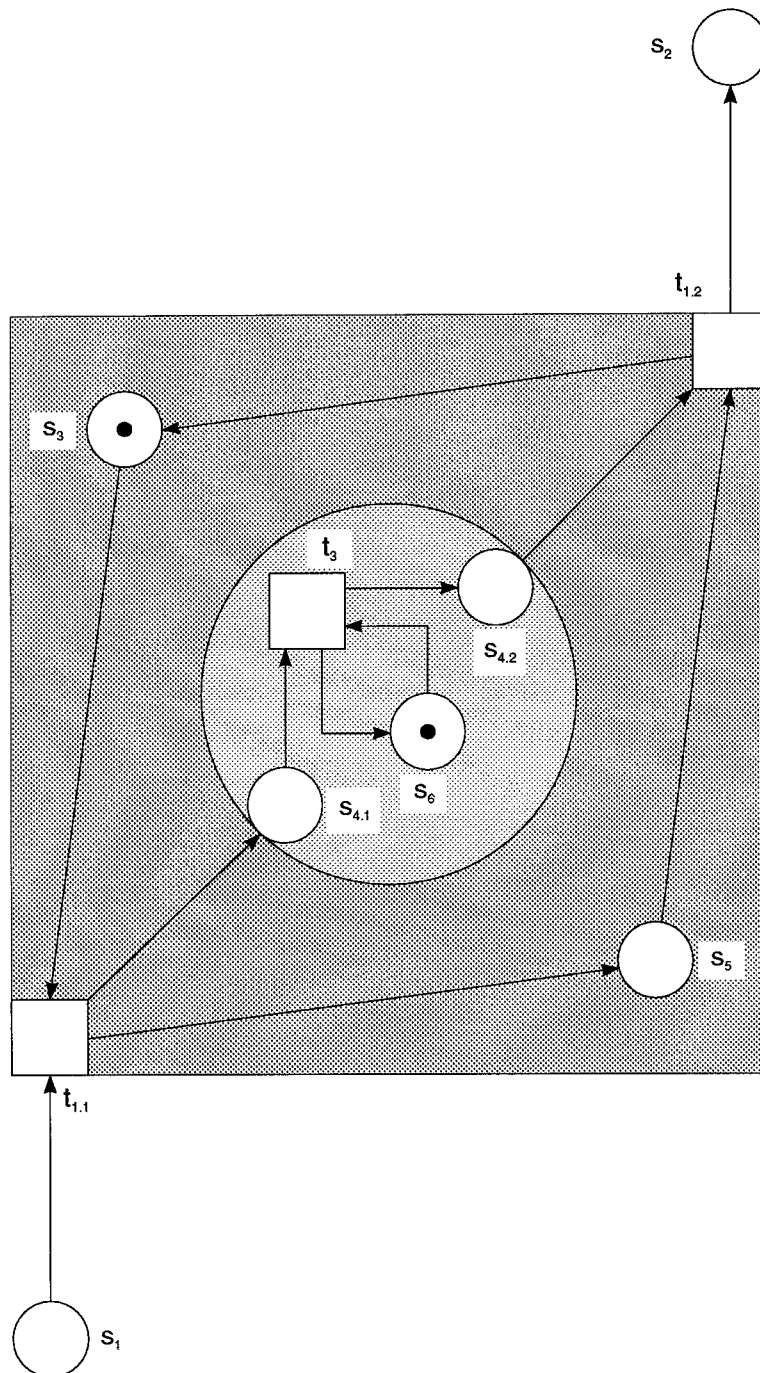


Abb. 217: Partiiell verfeinertes Teilnetz für einen zweiten Ausschnitt aus einem hierarchischen Netzmodell der Abb. 214 auf der untersten Hierarchieebene

9.2.2.2.2 Effizienz

Die Effizienz¹⁾ eines Modellierungskonzepts wird ausschließlich anhand des Ressourceneinsatzes beurteilt, der für Informationsverarbeitungsprozesse²⁾ während der Konzeptanwendung erforderlich ist³⁾. Als globaler, undifferenzierter Effizienzmaßstab wird die Zeit herangezogen, die für die Konstruktion und Auswertung von Netzmodellen aufgewendet werden muß.

Der Effizienzmaßstab "Zeit" erlaubt nur ein grobes Effizienzurteil. Er unterliegt einer Vielzahl von Vorbehalten. Zunächst handelt es sich beim Zeitaufwand eines Modellierungskonzepts um eine Aggregatgröße, in die eine breite Palette verschiedenartiger konkreter⁴⁾ Informationsverarbeitungsressourcen einfließt⁵⁾. Auf Aggregationsprobleme der zeitlichen Beanspruchung unterschiedlicher Ressourcenarten wird nicht eingegangen⁶⁾. Ebenso wenig werden Substitutionsmöglichkeiten berücksichtigt, die zwischen den Ressourcenarten bestehen⁷⁾. Darüber hinaus wird von zwei "heroischen" Prämissen ausgegangen. Erstens wird unterstellt, daß alle konkreten Ressourcenarten konstant zur Verfügung stehen (Konstanzprämisse)⁸⁾. Zweitens sollen sie ausreichen, um die drei Netzklassen anzuwenden, die hier von Interesse sind (Suffizienzprämisse)⁹⁾. Unter diesen Voraussetzungen ist es zulässig, die Effizienz eines Modellierungskonzepts unmittelbar anhand der abstrakten Ressource "Zeit" zu beurteilen, die bei der Konzeptanwendung für das Ausführen von Informationsverarbeitungsprozessen aufgewandt wird¹⁰⁾.

Trotz aller Einschränkungen wird am Effizienzmaßstab "Zeit" aus drei Gründen festgehalten¹¹⁾. Erstens wird nur beabsichtigt, die *relativen* Vorteilhaftigkeiten der drei betrachteten Netzklassen zu beurteilen. Dazu reicht es aus, eine grobe Rangfolge aufzustellen. Sie erfordert weder eine detaillierte Auffächerung der involvierten Ressourcenarten noch eine absolute monetäre Bewertung des Ressourcenverzehr. Statt dessen brauchen nur die Größenordnungen des Ressourceneinsatzes für die drei Netzklassen bekannt zu sein. Zweitens beeinflußt der Zeitaufwand eines Modellierungskonzepts maßgeblich die Konzeptakzeptanz in der betrieblichen *Praxis*¹²⁾. Denn Modellierungen stoßen immer wieder auf Akzeptanzbarrieren, wenn sie als "zu langwierig" empfunden wurden¹³⁾. Drittens werden auch *theoretische* Effizienzuntersuchungen, wie sie im Rahmen der Komplexitätstheorie benutzt werden¹⁴⁾, zumeist¹⁵⁾ nur auf einen homogenen Maßstab bezogen. In den produktionswirtschaftlich interessanten Untersuchungsvarianten¹⁶⁾ handelt es sich um die "Zeitkomplexität"¹⁷⁾. Sie fällt entweder unmittelbar mit einer Zeitgröße zusammen oder kann zumindest auf eine Zeitgröße zurückgeführt werden¹⁸⁾.

Die Effizienz eines Modellierungskonzepts betrifft zunächst die Konstruktion von Modellen¹⁹⁾. Über die Konstruktionseffizienz von Netzmodellen liegen jedoch bisher keine nennenswerten Erkenntnisse vor²⁰⁾. Allenfalls kann auf den trivialen Sachverhalt verwiesen werden, daß sich Stelle/Transition-Netze wegen ihrer einfachen formalen Struktur relativ²¹⁾ einfach konstruieren lassen. Dazu trägt auch ihre simple graphische Repräsentation bei, zu deren Visualisierung nur wenige grundlegende Graphiksymbole erforderlich sind. Auf diese Weise können konstruktionsunterstützende und -dokumentierende Netzgraphiken rasch erstellt werden. Die Konstruktion von Synthetischen Netzen²²⁾ fällt dagegen wesentlich aufwendiger aus. Dies liegt einerseits an dem mächtigen formalen Apparat, der für die Erstellung von Netzlegenden gehandhabt werden muß. Andererseits bereitet auch die Gestaltung der Netzgraphiken einen deutlich größeren Zeitaufwand als bei Stelle/Transition-Netzen. Denn die Anschriften der Graphiksymbole für Netzknoten und -kanten fallen bei Synthetischen Netzen erheblich komplexer aus²³⁾. Hinzu kommen neuartige Graphiksymbole. Ihre Darstellung erfordert größeren Aufwand als die graphische Visualisierung gewöhnlicher Netzknoten und -kanten²⁴⁾. Über diese generellen Einschätzungen hinaus bleibt die Konstruktionseffizienz von Netzmodellen ein weithin unerforschtes Gebiet²⁵⁾. Aus diesem Grund wird im folgenden nur noch auf die komplementäre Auswertungseffizienz des Petrinetz-Konzepts eingegangen²⁶⁾.

Die Auswertungseffizienz von Netzmodellen richtet sich im wesentlichen²⁷⁾ nach der Effizienz jener Algorithmen, die den Auswertungstechniken des Petrinetz-Konzepts zugrundeliegen. Zur Beurteilung der algorithmischen Effizienz wird zunächst die Zeitkomplexität herangezogen, die schon eingangs kurz angesprochen wurde. Aus dieser Perspektive hat sich die Usance verfestigt, einen Algorithmus genau dann als (in)effizient zu betrachten, wenn er sich auf (k)einem deterministischen TURING-Automaten mit polynomial beschränkter Zeitkomplexität ausführen läßt²⁸⁾. Strenggenommen müßten die Auswertungstechniken des Petrinetz-Konzepts, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden, hinsichtlich der Zeitkomplexität ihrer Algorithmen untersucht werden²⁹⁾. Darüber hinaus wäre es erforderlich, die Resultate bezüglich der Netzklassen zu differenzieren, auf welche die Auswertungsalgorithmen angewendet werden können. Solche Komplexitätsstudien liegen jedoch nur für einige wenige Auswertungsprobleme³⁰⁾ und auch nur für spezielle Netzklassen³¹⁾ vor. Daher läßt sich die Zeitkomplexität von Algorithmen bisher lediglich in bescheidenem Umfang heranziehen, um die Auswertungseffizienz des Petrinetz-Konzepts zu beurteilen. Als Alternative bieten sich systematische empirische Effizienzstudien³²⁾ an. Bei ihnen wird der durchschnittliche Zeitaufwand gemessen, den Algorithmen bei der Bewältigung von Beispielproblemen in wohldefinierten Anwendungsumgebungen bereiten³³⁾. Aber solche Effizienzstudien stehen für die Auswertung von Netzmodellen derzeit in noch geringerem Umfang zur Verfügung, als es für die zuvor erwähnten Komplexitätsstudien der Fall ist³⁴⁾. Aufgrund dieser mißlichen Lage³⁵⁾ kann die Auswertungseffizienz des Petrinetz-Konzepts nur anhand einiger Indikatoren grob abgeschätzt werden³⁶⁾.

Eine erste Argumentationskette, die erhebliche Effizienzmängel des Petrinetz-Konzepts für die hier betrachteten drei Netzklassen anzeigt, stützt sich auf ein allgemeines Modellierungsdilemma. Diesem Dilemma zufolge verhalten sich die Ausdrucksmächtigkeit und die Auswertungseffizienz eines Modellierungskonzepts tendenziell gegenläufig³⁷⁾. Im Rahmen des Petrinetz-Konzepts läßt sich dieser grobe Tendenzzusammenhang präziser fassen:

- ❑ Es existieren einige wenige Netzklassen, die sich als extrem ausdrucksarm erweisen³⁸⁾. Immerhin stehen für die Netzmodelle, die sich mit ihrer Hilfe konstruieren lassen, Auswertungskonzepte zur Verfügung, deren praktische Anwendung allgemein als effizient anerkannt ist³⁹⁾. Dabei handelt es sich vor allem⁴⁰⁾ um die Klasse der Synchronisationsnetze⁴¹⁾.
- ❑ Stelle/Transition-Netze, die keinen einengenden Restriktionen hinsichtlich der zulässigen Netztopologien unterworfen sind, besitzen eine deutlich größere Ausdruckskraft als Synchronisationsnetze⁴²⁾. Aber bereits die Auswertung dieser restriktionsfreien Stelle/Transition-Netze gilt als ineffizient⁴³⁾. Dies gilt zumindest dann, wenn sich die Auswertung auf alle Netzeigenschaften erstrecken darf, die in dieser Arbeit als produktionswirtschaftlich interessante Aspekte von Netzmodellen behandelt wurden⁴⁴⁾.

Daher verläuft die Grenze zwischen effizienter und ineffizienter Modellauswertung beim Petrinetz-Konzept bereits *innerhalb* der Klasse der Stelle/Transition-Netze. Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze, deren Ausdrucksmächtigkeit die allgemeine Modellierungsfähigkeit der Stelle/Transition-Netze bei weitem übertrifft, leiden unter einer noch gravierenderen Ineffizienz. Denn der gegenläufige Tendenzzusammenhang zwischen Ausdrucksmächtigkeit und Auswertungseffizienz, der sich im oben erwähnten Modellierungsdilemma niederschlägt, wird beim Übergang von Stelle/Transition-Netzen zu diesen beiden Varianten Synthetischer Netze in keiner Weise durchbrochen⁴⁵⁾.

Der erste Eindruck, daß die Auswertung von Netzmodellen erheblichen Effizienzmängeln unterliegt, läßt sich anhand der Modellauswertung durch Erreichbarkeitsanalysen präzisieren und vertiefen. Es wurde schon früher dargelegt, daß in dieser Arbeit die Auswertungstechnik der Erreichbarkeitsanalyse bevorzugt wird. Denn alle Eigenschaften von Netzmodellen, die von produktionswirtschaftlichem Interesse sind, können mit Hilfe der Erreichbarkeitsanalyse untersucht werden. Aus diesem Grund wird darauf verzichtet, die Effizienz der übrigen Auswertungstechniken näher zu betrachten⁴⁶⁾.

Die Effizienz der Erreichbarkeitsanalyse wurde schon an früherer Stelle ausführlich diskutiert. Dort zeigte sich anhand des Erreichbarkeitsproblems, daß diese Analysetechnik aus Komplexitätstheoretischer Perspektive⁴⁷⁾ hochgradig ineffizient ist⁴⁸⁾. Dies gilt bereits für die Erreichbarkeitsanalyse von Stelle/Transition-Netzen⁴⁹⁾. Bei Synthetischen Netzen ist wegen ihrer größeren Ausdrucksmächtigkeit mit noch größerer Zeitkomplexität zu rechnen. Dies folgt bereits aus dem tendenziell gegenläufigen Zusammenhang zwischen Ausdrucksmächtigkeit und Auswertungseffizienz von Modellierungskonzepten, der kurz zuvor als Modellierungsdilemma gestreift wurde. Dieser grobe Tendenzzusammenhang kann im Fall der Erreichbarkeitsanalyse von Netzmodellen konkret belegt werden. Denn ein Synthetisches Netz besitzt bei gleicher Knoten- und Kantenanzahl im allgemeinen⁵⁰⁾ einen beträchtlich größeren Erreichbarkeitsgraphen als ein Stelle/Transition-Netz. Schuld daran ist die erheblich anwachsende kombinatorische Vielfalt von Schaltakten und Netzmarkierungen. Sie wird im wesentlichen⁵¹⁾ durch die unterschiedlichen Attributausprägungen von strukturierten Marken verursacht, die in Stelle/Transition-Netzen nicht definiert sind. Entsprechend können die Anzahlen der Schaltkanten und der Markierungsknoten im Erreichbarkeitsgraphen "kombinatorisch explodieren"⁵²⁾.

Praktische Erfahrungen mit der Erreichbarkeitsanalyse von Netzmodellen bestätigen die theoretischen Ergebnisse der Komplexitätstheorie. Schon die Konstruktion und Auswertung der vollständigen Erreichbarkeitsgraphen von mittelgroßen⁵³⁾ Stelle/Transition-Netzen bereitet erhebliche Schwierigkeiten⁵⁴⁾. Sie lassen sich ohne Automatenunterstützung in praktisch akzeptablen Zeiträumen⁵⁵⁾ kaum noch bewältigen. Aber selbst wenn Automatische Informationsverarbeitungssysteme hinzugezogen werden, stößt die Erreichbarkeitsanalyse von mittelgroßen Stelle/Transition-Netzen dennoch rasch an Praktikabilitätsgrenzen. Sie äußern sich entweder darin, daß die eingesetzte Analysesoftware die Knoten- und Kantenanzahl der Erreichbarkeitsgraphen nicht mehr zu erfassen vermag, weil die Verwaltungskapazität von Anwendungs- oder Systemsoftware überschritten wird. Oder die Erreichbarkeitsanalyse dauert selbst mit Automatenunterstützung so lange, daß ihre Auswertungsdauer von betrieblichen Anwendern nicht mehr akzeptiert wird⁵⁶⁾. Diese Schwierigkeiten verstärken sich beim Übergang zu Synthetischen Netzen noch erheblich. Dies liegt wiederum an der drastischen Vergrößerung ihrer Erreichbarkeitsgraphen. Erprobungen des Softwarepakets PASIPP, das in dieser Arbeit als Implementierungsgrundlage für Synthetische Netze gewählt wurde, ließen erkennen, daß schon die Erreichbarkeitsanalyse von kleinen Synthetischen Kernnetzen äußerst mühselig ist. Bei der Auswertung von mittelgroßen Netzmodellen nehmen die praktischen Anwendungsschwierigkeiten schnell prohibitive Ausmaße an. An die automatengestützte Auswertung eines größeren Erweiterten Synthetischen Netzes, wie es in der Fallstudie exemplarisch vorgestellt wurde, ist mit heute verfügbaren Automatischen Informationsverarbeitungssystemen überhaupt noch nicht zu denken⁵⁷⁾.

Die Komplexitätstheoretischen und praktischen Einschätzungen der Erreichbarkeitsanalyse zeichnen insgesamt ein düsteres Bild von der Auswertungseffizienz der drei Netzklassen: Die Auswertung Synthetischer Kernnetze und Erweiterter Synthetischer Netze erweist sich - abgesehen von einigen "Spielzeugproblemen"⁵⁸⁾ - als beklagenswert ineffizient⁵⁹⁾. Die Auswertungseffizienz von Stelle/Transition-Netzen fällt zwar etwas besser aus. Aber selbst bei wohlwollender Betrachtung läßt sie sich derzeit nur als niedrig einstufen⁶⁰⁾. Die aufgezeigten Effizienzschwächen gelten zwar strenggenommen nur für Modellauswertungen, die sich im Rahmen der Erreichbarkeitsanalyse bewegen. Aber es wurde schon oben dargelegt, daß sich die hier vorgelegte Ausarbeitung ohnehin auf die Auswertungstechnik der Erreichbarkeitsanalyse konzentriert. Darüber hinaus leiden die alternativen Auswertungstechniken, die in dieser Arbeit ebenso vorgestellt wurden, unter ähnlichen Effizienzproblemen⁶¹⁾. Daher verwundert es nicht, daß die sehr niedrige Auswertungseffizienz des Petrinetz-Konzepts weithin beklagt wird⁶²⁾.

Die erheblichen Effizienzmängel bei der Auswertung von Netzmodellen schlagen auf eine Reihe weiterer Beurteilungskriterien durch. Sie stimmen darin überein, daß ihre Erfüllung um so höher (geringer) ausfällt, je größer (kleiner) die Auswertungseffizienz eines Modellierungskonzepts ist⁶³⁾. Im einzelnen handelt es sich um die Kriterien:

- ❑ der Aktualität⁶⁴),
- ❑ der Reagibilität⁶⁵) und
- ❑ der Realzeitadäquanz⁶⁶).

Sie werden von Modellierungen, die auf Stelle/Transition-Netzen oder auf Synthetischen Netzen beruhen, wegen der aufgezeigten Effizienzmängel im allgemeinen nicht zufriedenstellend erfüllt⁶⁷). Lediglich in Sonderfällen können sich die Auswertungen von Netzmodellen als hinreichend aktuell, als reagibel genug oder als realzeitadäquat erweisen. Dafür kommen einerseits spezielle Modellkonstruktionen in Betracht, in denen die Ausdrucksmächtigkeit der von vornherein nicht ausgeschöpft wurde⁶⁸). Andererseits ist es möglich, die Modellauswertungen auf solche Netzeigenschaften einzuschränken, die den Einsatz effizienter Auswertungsalgorithmen gestatten⁶⁹). Wenn beide Optionen miteinander kombiniert werden, läßt sich die Aktualität, Reagibilität oder Realzeitadäquanz von Netzmodellen noch am ehesten sicherstellen.

Darüber hinaus läßt sich eine Auswertungsvariante für Netzmodelle anführen, die den vorgenannten Effizienzproblemen nicht unterliegt. Es handelt sich um die Simulation einzelner Schaltprozesse⁷⁰). Mit ihrer Hilfe lassen sich vor allem⁷¹) projektive Netzanalysen durchführen. Diese Auswertungsoption wurde schon im Rahmen der Simulationsanalyse näher erläutert. Sie umfaßt z.B. die Beurteilung einzelner Koordinierungsentscheidungen. Ihre Konsequenzen können im Netzmodell desjenigen Produktionssystems, dessen Produktionsprozesse koordiniert werden sollen, durch Simulation der Entscheidungswirkungen ermittelt werden. Hinzu kommt die Möglichkeit, die Auswirkungen einer Entscheidung durch einen Markenfluß anschaulich zu visualisieren. Die effiziente Handhabung solcher projektiven Simulationsanalysen kann für den praktischen Einsatz von Netzmodellen in PPS-Systemen durchaus eine beachtliche Rolle spielen. Insbesondere stehen in dieser Hinsicht der aktuellen, reagiblen oder realzeitadäquaten Modellauswertung keine gravierenden Hindernisse im Weg. Allerdings reicht die projektive Simulationsanalyse im allgemeinen⁷²) nicht aus, um die oben erörterten, produktionswirtschaftlich interessanten Eigenschaften von Netzmodellen zu untersuchen⁷³).

Die Kritik an Effizienzmängeln des Petrinetz-Konzepts besitzt nur einen bedingten Charakter. Denn sie bezieht sich auf das Leistungsvermögen von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen, die heute für die Modellkonstruktion und -auswertung im produktionswirtschaftlichen Bereich vornehmlich zur Verfügung stehen. Mit beachtlichen Steigerungen der Leistungsfähigkeit⁷⁴) von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen kann jedoch - trotz annähernd gleicher oder gar sinkender Anschaffungskosten - in den Folgejahren gerechnet werden⁷⁵). Ebenso bestehen Anzeichen für eine wachsende Bereitschaft betrieblicher Entscheidungsträger, den akzeptierten Kostenrahmen für automatengestützte Modellierungen im Produktionsbereich generell auszuweiten⁷⁶). Aus beiden Gründen verbessern sich die Aussichten, entsprechend leistungsfähigere Informationsverarbeitungssysteme für die Konstruktion und Auswertung komplexer Netzmodelle bereitstellen zu können. Daneben lassen sich einige weitere Argumente anführen, die dafür sprechen, daß die Effizienzmängel des Petrinetz-Konzepts in naher Zukunft immer mehr an Bedeutung verlieren werden:

- ❑ Die immanente Nebenläufigkeit von Auswertungskonzepten⁷⁷) kann ausgenutzt werden, um "parallele" Algorithmen zu entwickeln. Ihre Anwendung bereitet erheblich geringeren Zeitaufwand als der Einsatz konventionell entworfener, sequentiell arbeitender Auswertungsalgorithmen. Die prinzipielle Möglichkeit, nebenläufige Auswertungsalgorithmen für Netzmodelle zu konstruieren, wurde für die Erreichbarkeitsanalyse aufgezeigt⁷⁸). Allerdings kann diese Option nur dann genutzt werden, wenn Automatische Informationsverarbeitungssysteme mit nebenläufiger Automatenarchitektur⁷⁹) für die Implementierung der Algorithmen bereitstehen⁸⁰).

- Erkenntnisse aus der KI-Forschung, die sich auf das "intelligente" Erforschen großer Suchräume erstrecken, lassen sich auf die Lösungssuche in Erreichbarkeitsgraphen übertragen. Einige Transferoptionen wurden schon früher skizziert. Darüber hinaus kann auf KI-Konzepte für verteiltes Problemlösen zurückgegriffen werden. Mit ihrer Hilfe läßt sich die Entwicklung nebenläufiger Auswertungsalgorithmen zusätzlich befruchten.
- Die Sortierung von Formel- und Funktionsargumenten kann bei der Auswertung von Synthetischen Netzen für eine sortengerechte Variablenbindung ausgenutzt werden. Dadurch wird der Suchraum, der von der kombinatorischen Mannigfaltigkeit aller zulässigen Variablenbindungen aufgespannt wird, erheblich eingeschränkt. Infolgedessen steigt die Auswertungseffizienz tendenziell an, wenn die eingesetzten Softwarepakete eine sortengerechte Variablenbindung gestatten⁸¹⁾.

Daneben kann auf die effizienzerhöhende Fortentwicklung von Auswertungstechniken des Petri-netz-Konzepts gehofft werden⁸²⁾. Dafür kommen sowohl algorithmische Verbesserungen einzelner Analysemethoden als auch Innovationen bei den zugrundeliegenden Analysekonzepten in Betracht. Allerdings handelt es sich - im Gegensatz zum Vorhergesagten - um eine bloße Hoffnung. Sie beruht weder auf empirischen Trendbeobachtungen noch auf konkret nachgewiesenen Verbesserungsansätzen.

Alle voranstehend angeführten Argumente ändern nichts daran, daß die Auswertungseffizienz von Netzmodellen *derzeit* extrem niedrig ausfällt. Die Effizienzmängel für alle drei beurteilten Netzklassen bilden zur Zeit die herausragende Schwachstelle bei der netzgestützten Modellierung komplexer Produktionssysteme. Diese Effizienzschwäche behindert die praktische Anwendung des Petri-netz-Konzepts bislang so stark, daß sein Einsatz für die Bewältigung realer Koordinierungsprobleme noch nicht ernsthaft versucht worden ist⁸³⁾. Der Zugriff auf sein "immenses Anwendungspotential"⁸⁴⁾ wird zur Zeit durch eine Effizienzbarriere versperrt⁸⁵⁾.

Die Effizienzbarriere existiert zumindest dann, wenn drei Bedingungen erfüllt sind⁸⁶⁾. Erstens besteht ein Interesse an einer ausdrucks mächtigen, realitätsadäquaten Modellierung⁸⁷⁾. Dann scheiden die Stelle/Transition-Netze, die immerhin noch eine bescheidene Auswertungseffizienz zulassen, grundsätzlich aus. Statt dessen kommen nur Höhere Netze, wie die hier vorgestellten Synthetischen Kernnetze und Erweiterten Synthetischen Netze, für die Modellierung von Produktionssystemen in Betracht. Zweitens wird angenommen, daß sich der Modellierungsträger mit der projektiven Simulationsanalyse eines Netzmodells, die noch mit praktisch zufriedenstellender Effizienz ausgeführt werden kann, nicht zufriedengibt. Vielmehr möchte er Erkenntnisse über produktionswirtschaftlich interessante Eigenschaften seines Netzmodells sammeln. Um diese Analyseaufgaben zu bewältigen, reicht die Auswertungseffizienz von Synthetischen Netzen aber zur Zeit bei weitem nicht aus⁸⁸⁾. Drittens wird davon ausgegangen, daß die hierarchische Verfeinerung und modulare Zerlegung eines Netzmodells nicht in der Lage ist, die gewünschte Auswertungseffizienz für alle interessanten Modelleigenschaften zu garantieren. Zwar läßt sich durchaus vorstellen, einzelne kompakte Netzmodule effizient zu analysieren⁸⁹⁾. Die Eigenschaften des Gesamtmodells wären dann aus den Teilerkenntnissen über seine Module zu aggregieren. Wie sich eine solche Erkenntnissynthese im einzelnen vornehmen läßt, ist jedoch bislang nur für Sonderfälle bekannt⁹⁰⁾. Daher kann sich der Verf. derzeit nicht durchringen, in der hierarchischen Modularisierung von Netzmodellen ein Allheilmittel zu sehen, das die beklagenswerten Effizienzschwächen bei der Modellauswertung generell zu beseitigen vermag.

Abschließend wird auf die beiden eingangs getroffenen, "heroischen" Prämissen zurückgekommen. Sie unterstellten, daß alle konkreten Ressourcen, die bei der Anwendung des Petri-netz-Konzepts für die Ausführung von Informationsverarbeitungsprozessen erforderlich sind, in konstantem und ausreichendem Ausmaß zur Verfügung stehen. Daher brauchten die Effizienz-betrachtungen auf Bereitstellungskosten für Informationsverarbeitungssysteme keine Rücksicht zu nehmen. Doch im allgemeinen lassen sich weder die Konstanz- noch die Suffizienzprämisse aufrechterhalten.

Die Konstruktion und Auswertung von Netzmodellen kommt in der Regel nicht ohne die Unterstützungsleistungen von netzspezifischer Software aus. Dies ist zumindest dann der Fall, wenn realistische Koordinierungsprobleme bei komplexen Produktionssystemen modelliert werden. Die dafür erforderlichen Netzmodelle sind so umfangreich⁹¹⁾, daß sie sich ohne Inanspruchnahme der Automatischen Informationsverarbeitung praktisch nicht mehr handhaben lassen. Auf Software, die in der betrieblichen Praxis für produktionswirtschaftliche Modellierungen schon verbreitet ist⁹²⁾, kann für diesen Zweck nicht zurückgegriffen werden. Sie verfügt weder über ausreichende Graphikfähigkeiten für die Visualisierung von Netzmodellen⁹³⁾ noch über die einschlägigen Prozeduren für die Auswertung von Netzmodellen⁹⁴⁾. Daher reicht zumindest die Ressource "Software" für die Anwendung des Petri-netz-Konzepts im allgemeinen nicht aus. Dies verletzt die Suffizienzprämisse.

Zugleich muß gegen die Konstanzprämisse verstoßen werden, um die Softwarelücke zu schließen. Dabei fallen beträchtliche Anschaffungskosten⁹⁵⁾ für netzspezifische Software an. Diese Softwarekosten schwanken zwar erheblich. Sie hängen einerseits vom Leistungsumfang des betroffenen Softwarepakets ab. Andererseits variiert die Preispolitik der Anbieter von netzspezifischer Software mitunter stark⁹⁶⁾. Aber es läßt sich immerhin eine generelle Größenordnung für die Anschaffungskosten von kommerziell vertriebenen⁹⁷⁾ Softwarepaketen angeben, die einen Umgang mit Netzmodellen für realistische Koordinierungsprobleme zulassen: Sie liegt etwa zwischen 10.000 und 50.000 DM⁹⁸⁾. Darüber hinaus stellt die netzspezifische Software erhebliche Anforderungen an ihre Hardwareumgebung. Dazu tragen einerseits die aufwendigen Auswertungstechniken des Petri-netz-Konzepts bei. Sie setzen ein entsprechend hohes Angebot an Hauptspeicherraum⁹⁹⁾ und Operationsgeschwindigkeit voraus¹⁰⁰⁾. Andererseits sind für die Konstruktion graphisch visualisierter Netzmodelle hochauflösende Bildschirme empfehlenswert. Der Aufbau der Bildschirmanzeigen benötigt ebenso hohe Operationsgeschwindigkeiten und zusätzliche Speicherkapazitäten¹⁰¹⁾. Diesen beträchtlichen Hardwareanforderungen werden z.B. "Workstations" gerecht¹⁰²⁾. Sie genießen derzeit schon im produktionsnahen Bereich - z.B. als CAD-Arbeitsplätze - größere Verbreitung. Für die Modellierung von Koordinierungsproblemen stehen sie jedoch noch kaum zur Verfügung. Daher muß ebenso mit entsprechenden Anschaffungskosten für die Erweiterung der Hardwarebasis gerechnet werden¹⁰³⁾. Sie können die Gesamtkosten für die Hard- und Softwareausstattung eines Arbeitsplatzes, an dem Netzmodelle konstruiert und ausgewertet werden sollen, schnell in die Größenordnung von 25.000 bis 100.000 DM anwachsen lassen¹⁰⁴⁾.

Daher leidet das Petri-netz-Konzept unter einer zweischichtigen Effizienzproblematik: Zunächst können erhebliche Kosten anfallen¹⁰⁵⁾, um diejenigen *konkreten* Ressourcen aus dem Bereich der Automatischen Informationsverarbeitung bereitzustellen, die für eine Anwendung des Petri-netz-Konzepts praktisch erforderlich sind. Aber selbst wenn diese Anwendungsvoraussetzungen zutreffen, besteht immer noch die mangelhafte Auswertungseffizienz von Netzmodellen. Sie führt oftmals dazu, daß die *abstrakte* Ressource "Zeit" in erheblichem Ausmaß in Anspruch genommen werden muß, um zu den erwünschten Analyseergebnissen zu gelangen.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. zur Effizienzforderung KERN, W. (1967), S. 215 (als "rasche und zugleich wirtschaftliche Lösungsermittlung"); THESEN (1976), S. 414; PFOHL (1977), S. 278 (als "Aufwandskriterien"); SCHITTKOWSKI (1980), S. 62; HOFFMANN, K. (1982), S. 179f.; SCHNABEL (1982), S. 166; BUS (1982), S. 172; SCHRÖDER, H. (1983), S. 80; STAUDINGER (1990), S. 174 u. 179 (als Forderung nach "power").

Zur Forderung nach Effizienz kann auch das anders lautende, aber inhaltlich eng verwandte Postulat der "Rechenbarkeit" einer Modellierung gezählt werden; vgl. ZENTES (1976), S. 35; CZERANOWSKY (1980), S. 54f.

2) Die Informationsverarbeitung muß nicht notwendig durch Automatische Informationsverarbeitungssysteme geleistet werden. Sie kann auch durch Menschen erfolgen.

3) Dies entspricht dem Effizienzbegriff, der dieser Arbeit zugrundegelegt wurde. Aufgrund der ausschließlichen Betrachtung des Ressourceneinsatzes fließen Nutzenaspekte in die Effizienzbeurteilung grundsätzlich nicht ein. Sie werden bereits durch alle anderen Beurteilungskriterien erfaßt, die im Rahmen des hier vorgelegten Stärken/Schwächen-Profiles betrachtet werden.

4) Als konkrete Ressourcen werden hier alle materiellen oder immateriellen Güter verstanden, die bei der Anwendung eines Modellierungskonzepts als Produktionsfaktoren im weitesten Sinne die Ausführung von Informationsverarbeitungsprozessen beeinflussen. Vgl. dazu die nachstehende Anmerkung. Das Attribut "konkret" dient in diesem Zusammenhang lediglich zur Abgrenzung von der abstrakten Ressource "Zeit", die in Kürze eingeführt wird.

5) Vgl. zu den verschiedenartigen Ressourcen, die für Informationsverarbeitungsprozesse in Betracht gezogen werden, THESEN (1976), S. 413f.; PFOHL (1977), S. 276 u. 278; VIEFHUES (1982), S. 148f.

Der Verf. folgt den vorgenannten Quellen nicht vollständig. Denn sie verfolgen des öfteren ein Ressourcenverständnis, das sich mit den hier zugrundegelegten *konkreten* Ressourcenarten nicht deckt. So werden beispielsweise der informatorische und der organisatorische Input als Informationsverarbeitungsressourcen thematisiert (insbesondere PFOHL und VIEFHUES). Statt dessen hat der Verf. in der voranstehenden Anmerkung den Begriff konkreter Ressourcen mit dem Begriff der Produktionsfaktoren identifiziert. Aus dieser produktionswirtschaftlichen Perspektive lassen sich die betroffenen konkreten Ressourcen unter zwei Ressourcenkategorien subsumieren. Die erste wird von den Potentialfaktoren gebildet. Die zweite erstreckt sich auf die Repetierfaktoren. Vgl. zur Unterscheidung zwischen Potential- und Repetierfaktoren z.B. KERN, W. (1990a), S. 15 u. 17; CORSTEN (1990b), S. 90. Die Informationsverarbeitungskapazitäten der Potentialfaktoren werden im Rahmen einer Vorkombination vorgehalten, um ein Modellierungskonzept überhaupt anwenden zu können. Repetierfaktoren werden bei der tatsächlichen Ausführung von Informationsverarbeitungsprozessen in Endkombinationen verzehrt.

Zu den Potentialfaktoren gehören sowohl Personen, die als Modellierungsträger auftreten, als auch Automatische Informationsverarbeitungssysteme, die bei der Konzeptanwendung unterstützen. Die Modellierungsträger - und nicht deren Arbeitsleistungen - werden hier bewußt als Potentialfaktoren behandelt. Erstens erweist sich dies kohärent mit der früheren Modellierung des Faktors "Arbeitskraft". Zweitens läßt sich die Verarbeitungskapazität, deren Inanspruchnahme hier für die Effizienzbeurteilung eines Modellierungskonzepts maßgeblich ist, nur auf eine Person, nicht aber auf ihre Arbeitsleistung beziehen. Dabei bereitet die quantitative Verarbeitungskapazität eines Modellierungsträgers in der Regel keine Schwierigkeiten. Sie steht in einem vertraglich vereinbarten zeitlichem Ausmaß konstant zur Verfügung. Probleme können dagegen entstehen, wenn es gilt, die verfügbare qualitative Verarbeitungskapazität eines Modellierungsträgers einzuschätzen. Sie bezieht sich einerseits auf die allgemeinen intellektuellen Fähigkeiten des Modellierungsträgers. Andererseits erstreckt sich die qualitative Verarbeitungskapazität ebenso auf die besondere "Expertise", die ein Modellierungsträger im Umgang mit einem Modellierungskonzept zu entfalten vermag. Vgl. dazu auch den Hinweis auf "Brainware" bei STEINKE (1980), S. 86f. Die Geschwindigkeit der Konzeptanwendung kann von der Expertise des Modellierungsträgers wesentlich beeinflusst werden. Ein operativer Maßstab zur Einschätzung der Anwendungsexpertise ist dem Verf. aber nicht bekannt. Von den Schwierigkeiten, die qualitative Verarbeitungskapazität eines Modellierungsträgers zu bestimmen, wird im folgenden abgesehen. Statt dessen wird die intuitive, nicht weiter konkretisierte Vorstellung eines "normalen" Mitarbeiters zugrundegelegt. Er hat in formalen Konzepten keine besondere Schulung erfahren. Das Petrinetz-Konzept ist ihm bisher noch nicht bekannt.

Die Verarbeitungskapazität von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen erstreckt sich vor allem auf zwei quantitative Dimensionen: den Speicherraum und die Operationsgeschwindigkeit. Aus produktionswirtschaftlicher Sicht läge es zwar näher, anstelle der Operationsgeschwindigkeit als Kapazitätsdeterminante das Operationsvolumen zu betrachten, das ein Automatisches Informationsverarbeitungssystem in einem vorgegebenen Zeitabschnitt zu bewältigen vermag. Davon wird aber aus zwei Gründen abgesehen. Erstens läßt sich die Operationsgeschwindigkeit stets in eine produktionswirtschaftlich bevorzugte Kapazitätsgröße umrechnen, wenn der relevante Zeitabschnitt bekannt ist. Es braucht lediglich das Produkt aus Operationsgeschwindigkeit und Zeitabschnitt gebildet zu werden. Zweitens ist die produktionswirtschaftliche Kapazitätsvorstellung bei der Betrachtung von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen derart unüblich, daß ihre Anwendung die Gefahr erheblicher Mißverständnisse in sich birgt. Auf weitere Detailprobleme, Speicherraum und Operationsgeschwindigkeit von Automati-

schen Informationsverarbeitungssystemen zu messen, wird hier nicht weiter eingegangen. Sie sind in der einschlägigen informationstechnischen Literatur ausreichend dargelegt. Darüber hinaus bleiben alle Aspekte ausgeklammert, die sich auf die qualitative Kapazität von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen beziehen. Dazu gehört z.B. ihre numerische Präzision. Sie erlangt aber beim Petrinetz-Konzept keine Relevanz. Denn es erfordert vornehmlich Berechnungen im ganzzahlig-kombinatorischen Rahmen. Darüber hinaus werden allenfalls triviale Dezimalbruchoperationen erforderlich, um die Ausprägungen von Markenattributen zu berechnen. Sie betreffen z.B. den Umgang mit Werkstückkosten oder kalkulatorischen Zinssätzen. Besondere präzisionale Anforderungen an Automatische Informationsverarbeitungssysteme werden hierdurch nicht gestellt. Des weiteren hängt die qualitative Kapazität eines Automatischen Informationsverarbeitungssystems von der konzeptionellen Güte seiner Verarbeitungsalgorithmen (wie z.B. Sortier- und Zugriffsroutinen) und von der Qualität seiner Softwareimplementierung ab. Auch dieser Aspekt wird nicht weiter ausgeführt.

Für Potentialfaktoren drängt sich der Maßstab "zeitliche Inanspruchnahme" unmittelbar auf. Denn die absorbierte Potentialfaktorkapazität steht während der Nutzungszeit für keine anderen Verarbeitungszwecke bereit. Allenfalls mag es aus produktionswirtschaftlicher Sicht bedenklich erscheinen, die Nutzungsintensität der Potentialfaktoren nicht zu berücksichtigen. Aber bei Informationsverarbeitungsprozessen ist es bis heute noch nicht gelungen, einen empirisch gehaltvollen und zugleich theoretisch unbedenklichen Maßstab der Nutzungsintensität zu definieren. Darüber hinaus spielt für die Beurteilung der relativen Vorteilhaftigkeiten von Netzklassen die Betrachtung der Nutzungsintensität keine Rolle. Denn die Beurteilung erfolgt nur dann verzerrungsfrei, wenn alle Netzklassen mit der gleichen Nutzungsintensität von informationsverarbeitenden Potentialfaktoren angewendet werden. Schwierigkeiten entstünden allenfalls dann, wenn die Netzklassen aufgrund intrinsischer Eigenarten unterschiedliche Intensitäten erzwingen würden. Dies ist hier aber nicht der Fall. Folglich kann vom Intensitätsaspekt abgesehen werden.

Der Repetierfaktorverzehr, der durch Ausführungen von Informationsverarbeitungsprozessen verursacht wird, erstreckt sich im wesentlichen nur auf den Energieverbrauch von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen. Der nutzungsbedingte Verschleiß von Automatischen Informationsverarbeitungsanlagen und Informationsträgern spielt dagegen keine beachtenswerte Rolle. Nutzungsabhängige Lizenzkosten für den Einsatz von Softwarepaketen sind bei automatengestützten Anwendungen des Petrinetz-Konzepts unüblich. Ressourcenverzehr für die Dokumentation von Modellierungsergebnissen fällt zwar als Verbrauch von Druckpapier, Folien u.ä. an, kann aber vernachlässigt werden. Für die Beurteilung des Repetierfaktorverzehrs drängt sich der Maßstab "Zeit" nicht unmittelbar auf. Aber er läßt sich dennoch vertreten. Denn der Energieverbrauch von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen stellt die einzige praktisch relevante Repetierfaktorart dar. Bei konstanter Intensität der Systemnutzung verhält sich der Energieverbrauch im wesentlichen proportional zur zeitlichen Systembeanspruchung. Für Potentialfaktoren wurden schon oben konstante Nutzungsintensitäten vereinbart. Daher ist es im Rahmen einer Grobbeurteilung unbedenklich, den Repetierfaktorverbrauch von Informationsverarbeitungsprozessen anhand ihrer Ausführungszeit zu beurteilen.

6) Statt dessen werden die Aggregationsprobleme dadurch vermieden, daß die Zeit, die während der Ausführung eines Informationsverarbeitungsprozesses verstreicht, als eine abstrakte Ressource eigener Art behandelt wird.

7) Damit wird von zahlreichen Phänomenen abgesehen, die ein Effizienzurteil erschweren würden. Z.B. bleibt unbeachtet, daß sich hoher Zeitaufwand für die Anwendung eines Modellierungskonzepts durch entsprechend massive Vergrößerung der verfügbaren Informationsverarbeitungskapazität drastisch reduzieren läßt. Ebenso wenig wird nicht berücksichtigt, daß sich quantitative Kapazität der Automatischen Informationsverarbeitung und qualitative Kapazität von menschlichen Konzeptanwendern wechselseitig ersetzen können.

8) Am Ende dieses Kapitels wird die Prämisse konstant verfügbarer Informationsverarbeitungsressourcen fallengelassen. Dies betrifft allerdings im wesentlichen nur die quantitative Hardwarekapazität von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen. Auf konzeptionelle Verbesserungen von Verarbeitungsalgorithmen und auf verbesserte Softwareimplementierungen wird nur am Rande hingewiesen. Wenn sie gelingen, tragen sie zu einer Erhöhung der qualitativen Kapazität von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen bei. Schließlich bleiben alle Erhöhungen der qualitativen Kapazität von Modellierungsträgern unbeachtet. Es ist zwar durchaus zu erwarten, daß ein häufiges Anwenden des Petrinetz-Konzepts zu Lerneffekten führt, welche die Netzexpertise der Modellierungsträger ansteigen lassen. Dadurch wächst auch ihre qualitative Kapazität. Solche Lerneffekte stellen aber ein allgemeines Phänomen dar, das dem Petrinetz-Konzept nicht als spezifische Stärke zugerechnet werden kann. Allenfalls ließe sich die geringe Verbreitung, unter der das Petrinetz-Konzept im produktionswirtschaftlichen Rahmen derzeit noch leidet, ins Positive wenden: Sie bewirkt, daß die potentiellen Lerneffekte bei "normalen" betrieblichen Modellierungsträgern besonders groß ausfallen. Auf das Ausschlichten eines derart "sophistischen" Arguments wird hier aber verzichtet.

9) Daher wird von allen Beeinträchtigungen der Effizienzbeurteilung abgesehen, die daraus resultieren können, daß die Ressourcen für die Anwendung einer Netzklasse überhaupt nicht ausreichen. Die Prämisse ausreichender Ressourcenverfügbarkeit wird am Ende dieses Kapitels aufgehoben.

10) Hier wirkt sich vorteilhaft aus, daß bereits in der Rahmenlegung dieser Arbeit anstelle des wohldefinierten Begriffs "Produktionsfaktor" der inhaltlich offenere Begriff der "Ressource" bevorzugt wurde. Aus produktionswirt-

schaftlicher Perspektive stellt "Zeit" keinen eigenständigen Produktionsfaktor dar. Dies gilt zumindest für konventionelle Produktionsfaktorsysteme. Vgl. dazu die facettenreiche Argumentation von KERN,W. (1991), S. 5f. Das zeitliche Ausmaß, in dem ein Produktionsfaktor beansprucht wird, konstituiert ebensowenig einen Produktionsfaktor *sui generis*; vgl. abermals KERN,W. (1991), S. 6.

Der Effizienzbegriff wird jedoch gewöhnlich auf Verzehrsmengen von Produktionsfaktoren bezogen. Daher kommt die Zeit der Faktorinanspruchnahme zunächst nur als faktorartspezifischer Mengenmaßstab in Betracht. An einem Informationsverarbeitungsprozeß sind aber im Regelfall mehrere Produktionsfaktorarten beteiligt. Die Zeiten der Faktorinanspruchnahmen lassen sich nicht unmittelbar zusammenfassen, weil es sich qua Voraussetzung um faktorartspezifische Mengenmaßstäbe handelt. Eine mittelbare Aggregation der Faktorinanspruchnahmen wäre zwar mit Hilfe einer monetären Gewichtung der einzelnen faktorartspezifischen Mengenmaßstäbe möglich. Aber solche monetären Gewichte hängen von den aktuellen Faktorbereitstellungskosten ab. Sie können in weiten Spannen variieren und drücken keinen Aspekt des zu beurteilenden Modellierungskonzepts aus. Deshalb erfolgt hier grundsätzlich keine monetäre Bewertung von Faktoreinsatzmengen. Unter dieser Voraussetzung scheidet die monetär vermittelte Aggregation der zeitlichen Inanspruchnahmen verschiedenartiger Produktionsfaktoren aus. Infolgedessen umschließen die Effizienzbetrachtungen dieses Kapitels grundsätzlich keine Beurteilung von Modellierungskosten. Dann bleibt aber die Frage offen, wie die zeitlichen Inanspruchnahmen unterschiedlicher Produktionsfaktorarten zu einer einheitlichen Effizienzgröße verdichtet werden können.

In dieser mißlichen Lage bietet der inhaltlich offene Ressourcenbegriff einen Ausweg an. Er gestattet es, die Zeit der Inanspruchnahme von Produktionsfaktoren als eine *abstrakte* Ressource *sui generis* einzuführen. Der Verzehr dieser abstrakten Ressource wird durch die Zeitspanne gemessen, die während der Ausführung eines Informationsverarbeitungsprozesses verstreicht. Da es sich um eine Ressource *sui generis* handelt, wird der Zeitverzehr während einer Prozeßausführung nicht weiter auf die dabei beanspruchten Produktionsfaktoren zurückgeführt. Entsprechend unterbleibt auch jeder Versuch, die Zeitspanne der Prozeßausführung zunächst in einzelne faktorartspezifische Zeitspannen der Faktinanspruchnahme aufzuspalten und danach die faktorartspezifischen Zeitspannen durch Gewichtung wieder zusammenzufassen. Denn dies führte genau zu denjenigen Aggregationsproblemen zurück, die oben in einer Sackgasse mündeten. Statt dessen wird die abstrakte Ressource "Zeit" hier als eine selbständige, nicht weiter reduzierte, in sich homogene Größe aufgefaßt. Auf den Verzehr dieser abstrakten Zeitressource wird das Effizienzkriterium bezogen. Diese Vorgehensweise wird durch Beiträge bestätigt, in denen die Zeit ebenso als eigenständige Ressource thematisiert wird; vgl. z.B. NEWELL (1969), S. 372; PFOHL (1977), S. 278 ("Zeitaufwand für Entwicklung und Betrieb"); VIEFHUES (1982), S. 148f. (Punkte III, 1e und 2e); SIMON,HE. (1989a), S. 119f. u. 127; PFEIFFER,W. (1989), S. 485; REICHWALD (1990), S. 9.

Darüber hinaus taucht in jüngsten Veröffentlichungen vermehrt der Gedanke auf, "Zeit" als einen eigenständigen Produktionsfaktor in Erwägung zu ziehen; vgl. FANDEL (1991a), S. 150; KERN,W. (1991), S. 5 (distanziert). Schließlich wird auf den weit gefaßten Produktionsbegriff verwiesen, der dieser Arbeit zugrundegelegt wurde. Er umschließt als Produktionsfaktoren nicht nur knappe Güter, die von einem Produzenten käuflich erworben werden müssen. Vielmehr gehören dazu "auch Einsatzgüter ..., die - für den Produzenten - zwar keinen Werteverzehr verursachen, ... wohl aber über ihre Eigenarten die Einsatzverhältnisse der übrigen Faktoren zu beeinflussen vermögen." (KERN,W. (1990a), S. 13). Der Einsatz der Ressource "Zeit" kann in der Tat die Einsatzverhältnisse anderer Produktionsfaktoren erheblich mitbestimmen. Dies wird dadurch unterstrichen, daß Zeit als Wettbewerbs- oder strategischer Erfolgsfaktor zunehmende Beachtung erfährt. Daher fällt es schwer, aus der weit gefaßten Beeinflussungsperspektive dem Faktor "Zeit" die Qualität eines produktionsbeeinflussenden Produktionsfaktors aberkennen zu wollen. Vgl. dazu die Charakterisierungen von Zeit als Wettbewerbs- oder Erfolgsfaktor bei PICOT (1988), S. 113; SIMON,HE. (1989a), S. 117ff., insbesondere S. 119, 121 u. 123ff.; HARTWICH (1989), S. 526; REICHWALD (1990), S. 9ff.; SCHMELZER (1990), S. 31; GRUHLER (1990), S. 103; WILDEMANN (1990b), S. 26; KERN,W. (1991), S. 6. Der Verf. verkennt aber nicht, daß die zuvor skizzierten Argumente keineswegs erzwingen, die Zeit als Produktionsfaktor anzuerkennen. Daher umgeht er diesen Systematisierungsstreit, indem er seinen Effizienzbetrachtungen einen inhaltlich offenen Ressourcenbegriff zugrundelegt.

11) Die Effizienz eines Modellierungskonzepts wurde zunächst auf den Einsatz von Informationsverarbeitungsressourcen zurückgeführt. Danach wurde als globaler Maßstab für den Ressourcenverzehr die Zeit vereinbart, die für die Modellkonstruktion und -auswertung aufgewendet werden muß. Aufgrund dieser zweifachen inhaltlichen Reduzierung des Effizienzbegriffs können fortan die Formulierungen "Effizienz", "Ressourceneinsatz" und "Zeitaufwand" synonym verwendet werden.

12) Darauf hat schon früh KERN,W. (1967), S. 215, im Zusammenhang mit Modellierungen des Operations Research hingewiesen: "Voraussetzung für den Gebrauch von Operations-Research-Modellen ist nämlich eine rasche und zugleich wirtschaftliche Lösungsermittlung, sobald ein Modell konstruiert worden ist." Diese Anforderung an die Gebrauchstauglichkeit von Modellierungskonzepten läßt sich auf die Phase der Modellkonstruktion ausdehnen. Vgl. auch PRESSMAR (1982), S. 330. Er hebt hervor, daß die Akzeptanz von Planungssystemen u.a. wesentlich von der erzielbaren Planungsgeschwindigkeit abhängt.

13) Vgl. z.B. die Anmerkungen zur Interaktivität. Darüber hinaus läßt sich auf Effizienzmessungen verweisen, die sich in der betrieblichen Praxis für die Beurteilung von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen weit-

gehend durchgesetzt haben. Unbeachtet aller Nuancen stimmen sie in ihrer gemeinsamen Beurteilungsbasis überein, stets die Verarbeitungsdauer für vorgegebene Informationsverarbeitungsaufgaben zu ermitteln. Den Effizienzmaßstab bildet also ebenso eine Zeitgröße. Vgl. zu solchen praktischen Effizienzmessungen - wie z.B. "kernels", GIBSON-Mix oder "benchmarks" - STAHLKNECHT (1989), S. 31; THOME,R. (1990), Abschnitt L 1, S. 1; GRABOWSKI, H. (1991a), S. 50ff.; GRABOWSKI,H. (1991b), S. 150ff.

Schließlich wird oftmals auch nur auf die schlichte "Rechenzeit" (CPU-Zeit o.ä.) Bezug genommen, um die Effizienz von Informationsverarbeitungssystemen oder Algorithmen zu beurteilen; vgl. THESEN (1976), S. 413; FRANK,J. (1976), S. 53ff.; VALETTE (1978a), S. 378; SCHITTKOWSKI (1980), S. 62; STEINKE (1980), S. 65; VIEFHUES (1982), S. 148; SCHNABEL (1982), S. 166; HOFFMANN,K. (1982), S. 179f.; VALETTE (1982c), S. 3; RARDIN (1982), S. 11; SCHRÖDER,H. (1983), S. 80; BARTUSCH (1988), S. 236 u. 238f.; MLADINEO (1989), S. 101ff.; DREXL (1990a), S. 350f.

14) Gegen die Bezugnahme auf Komplexitätstheoretische Untersuchungen könnte eingewendet werden, sie seien für die Beurteilung von Modellierungskonzepten irrelevant. Seitens der Komplexitätstheorie würden nicht solche Konzepte, sondern konkrete Algorithmen betrachtet. Dieser Einwand ist jedoch unbeachtlich. Einerseits geht es hier um theoretisch fundierte Effizienzmaßstäbe für Beurteilungsobjekte beliebiger Art. Bisher hat nur die Komplexitätstheorie substantielle Beiträge in dieser Hinsicht vorgelegt. Zweitens wird auch die Effizienz der Anwendung eines Modellierungskonzepts durch eine Vielzahl von Algorithmen bestimmt. Dies betrifft vor allem die Phase der Modellauswertung. Daher läßt sich die algorithmisch ausgerichtete Komplexitätstheorie auf bedeutsame Teile eines Modellierungskonzepts direkt anwenden.

15) Zu den seltenen Ausnahmen gehören heterogene Effizienzmaßstäbe, in denen zwei Ressourcenarten zugleich berücksichtigt werden. Dazu gehören vor allem Komplexitätsuntersuchungen der Effizienz von nebenläufigen Algorithmen, bei denen sowohl der Zeitaufwand als auch die Anzahl nebenläufig operierender Prozessoren berücksichtigt werden.

16) Es wird durchaus eingeräumt, daß im Rahmen der Komplexitätstheorie auch ein komplementärer Effizienzmaßstab eine größere Rolle spielt: die Raumkomplexität. Sie findet aber aus produktionswirtschaftlicher Perspektive - einschließlich des Operations Research - keine Beachtung. Darüber hinaus besteht ein enger Zusammenhang zwischen Zeit- und Raumkomplexität. Denn bei konstantem Beurteilungsobjekt vergrößert (verringert) sich die Zeitkomplexität genau dann, wenn eine gegenläufige Verringerung (Vergrößerung) der Raumkomplexität geschieht. Aufgrund dieser wechselseitigen Abhängigkeit besteht in produktionswirtschaftlichen Argumentationszusammenhängen zumeist kein Interesse daran, beide Komplexitätsgrößen zu betrachten.

Darüber hinaus hat sich aus zwei Gründen eine klare Präferenz zugunsten der Zeitkomplexität herausgebildet. Erstens entspricht sie dem vorgenannten praktischen Bedürfnis, die Größenordnung des Zeitaufwands zu kennen, der für Anwendungen des beurteilten Objekts erforderlich ist. Zweitens liegen im Regelfall die Kapazitäten von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen fest, die für die Anwendung eines Modellierungskonzepts zur Verfügung stehen. Die Raumkomplexität stellt aber einen Effizienzmaßstab dar, der inhaltlich an variable Speichergrößen von Informationsverarbeitungsanlagen anknüpft. Daher läuft die Raumkomplexität dem Faktum fester Informationsverarbeitungskapazitäten zuwider. Aus den vorgenannten Überlegungen wird auch in dieser Arbeit ausschließlich auf den Effizienzmaßstab "Zeitkomplexität" Bezug genommen. Vgl. zur Bevorzugung der Zeitkomplexität ebenso PARKER,R. (1982a), S. 4; ZELEWSKI (1989a), S. 20 (Ausklammerung der Raumkomplexität), 28f. u. 42ff.).

Vgl. zur Vertiefung der oben angesprochenen Raumkomplexität BÖHLING (1974), S. 204ff.; HOPCROFT (1974), S. 624; CARDOZA (1976), S. 52; JONES,N. (1977), S. 280; PAUL,W. (1978), S. 93; GAREY (1979), S. 170ff.

Vgl. darüber hinaus zu dem oben angesprochenen "trade off" zwischen Zeit- und Raumkomplexität COOK,S. (1973), S. 29ff.; COOK,S. (1983), S. 404; ZELEWSKI (1989a), S. 28f.

17) Vgl. zum Komplexitätstheoretischen Effizienzmaßstab der Zeitkomplexität BÖHLING (1974), S. 136ff.; ECKER (1977), S. 54f.; PAUL,W. (1978), S. 91ff.; GAREY (1979), S. 26f.; BRUCKER (1981), S. 151ff.; PARKER,R. (1982a), S. 5; ZELEWSKI (1989a), S. 28 u. 42ff.

18) Mittelbare Zeitmaßstäbe stellen die "elementaren" Operationen dar, die von einem Informationsverarbeitungssystem ausgeführt werden müssen. Für diese Elementaroperationen können durchschnittliche Ausführungsdauern geschätzt werden. Dann sind auch sie auf eine Zeitgröße reduziert. Vgl. zu solchen Elementaroperationen aus Komplexitätstheoretischer Sicht ZELEWSKI (1989a), S. 21ff. (als Verarbeitungsschritte eines TURING-Automaten) u. 44f.

19) Effizienzbetrachtungen werden zumeist nur auf Auswertungen von Modellen bezogen. Zu den wenigen Ausnahmen, die auch den konstruktiven Aspekt einbeziehen, zählt PFOHL (1977), S. 278. Allerdings betrachtet er nicht die Konstruktion von Modellen, sondern die "Entwicklung" von Methoden.

20) Zwar könnten empirische Untersuchungen angestellt werden, mit welchem Zeitaufwand die Konstruktion von Modellen für fest vorgegebene Beispielpunkte gelingt. Diese Konstruktionsexperimente müßten mit den gleichen Probanden für alle beurteilten Netzklassen durchgeführt werden. Solche empirischen Untersuchungen liegen aber außerhalb des Erkenntnisrahmens der hier vorgelegten Ausarbeitung. Sie sind dem Verf. auch aus anderen Beiträgen zum Petrinetz-Konzept bisher nicht bekannt geworden.

- 21) Bezugspunkt sind die Synthetischen Netze, auf die in Kürze eingegangen wird.
- 22) Die nachfolgenden Erläuterungen gelten für Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze - sofern nicht ausdrücklich auf Abweichungen hingewiesen wird - in gleicher Weise.
- 23) Beispielsweise treten an die Stelle ganzzahliger Kantengewichte formale Summen. Neben den simplen Punktsymbolen für Kopien der Basismarke müssen tupelförmige Notationen für die Kopien von strukturierten Marken beachtet werden. Für die Graphiksymbole von Stellen und Transitionen kommen Anschriften mit Prädikatssymbolnamen bzw. Transaktionsnamen hinzu. Darüber hinaus können die Graphiksymbole der Transitionen mit prädikatenlogisch-algebraischen Formeln beschriftet werden.
- 24) Die unterbrochenen Linienzüge, die für die Visualisierung von Informationskanten erforderlich sind, lassen sich noch ohne größere Mühen realisieren. Schwierigkeiten bereiten jedoch einige der Graphiksymbole, die für die Erweiterungen des Kernkonzepts Synthetischer Netze eingeführt wurden. Dazu gehören vor allem die Visualisierungen von Inhibitor- und Obligatkanten. Sie lassen sich mit den Instrumenten, die von Netzeditoren und konventioneller graphischer Informationsverarbeitung angeboten werden, nicht unmittelbar darstellen. Auch in dieser Arbeit mußten die Graphiksymbole für Inhibitor- und Obligatkanten leider noch mit der Hilfe von "Tricks" komponiert werden.
- 25) Dabei handelt es sich aber nicht um eine charakteristische Schwäche des Petrinetz-Konzepts. Sie trifft ebenso auf andere Modellierungskonzepte zu. Beispielsweise ist über die Konstruktionseffizienz von Netzplänen oder OR-Programmen ebensowenig bekannt.
- 26) Da ausschließlich die Auswertungseffizienz eine Rolle spielt, wird der Einfachheit halber auch kurz von der Effizienz des Petrinetz-Konzepts gesprochen.
- 27) Weitere Determinanten der Auswertungseffizienz sind z.B. die Implementierungsgüte der Algorithmen, wenn sie automatengestützt ausgeführt werden, und die Kompetenz des Modellierungsträgers, für eine Modellierungsaufgabe den jeweils geeignetsten Auswertungsalgorithmus zu kennen. Effizienzeinflüsse der vorgenannten Art werden hier nicht näher berücksichtigt.
- 28) Auf die Schwierigkeiten, die mit dieser Beurteilungsweise verbunden sind, wurde schon in früheren Anmerkungen eingegangen. Sie brauchen hier nicht wiederholt zu werden. Dennoch wird hier an der Komplexitätstheoretischen Operationalisierung der algorithmischen Effizienz festgehalten. Denn es fehlt an einem alternativen Beurteilungsansatz, der ähnlich operational ausgearbeitet und ebenso vertraut ist. Eine Ausnahme stellen lediglich systematische empirische Effizienzstudien dar. Daher werden sie als zweiter Beurteilungsansatz berücksichtigt.
- 29) Falls mehrere Algorithmen zur Verfügung stehen, die im Rahmen einer Auswertungstechnik für dieselbe Auswertungsaufgabe in Betracht kommen, werden nur diejenigen Algorithmen mit der höchsten bekannten Zeitkomplexität berücksichtigt.
- 30) Dazu gehört vor allem das Erreichbarkeitsproblem, das im Rahmen der Erreichbarkeitsanalyse von Netzen behandelt wird. Seine Komplexitätstheoretischen Aspekte wurden schon ausführlicher gewürdigt.
- 31) Beispielsweise gilt die Komplexitätstheoretische Beurteilung der Erreichbarkeitsanalyse nur für die Teilklasse der Stelle/Transition-Netze. Inwieweit ihre Resultate auf anspruchsvollere Netzklassen übertragen werden können, die z.B. auch Inhibitor-kanten zulassen, ist leider unbekannt.
- 32) Vgl. zu solchen Effizienzstudien BROWN, C.A. (1981), S. 588ff.; HALL, N. (1986), S. 274f.; ZELEWSKI (1989a), S. 47f. Vgl. darüber hinaus zum speziellen Aspekt, Beispielprobleme für systematische Effizienzstudien zu generieren, SCHITTKOWSKI (1980), S. 51ff.; RARDIN (1982), S. 8ff.
- 33) Wegen der Ermittlung des durchschnittlichen Zeitaufwands sind systematische empirische Effizienzstudien aus produktionswirtschaftlicher Perspektive interessanter als die Worst case-Analysen, die bei Komplexitätstheoretischen Untersuchungen vorherrschen. Aber die empirischen Effizienzstudien leiden unter vielfältigen anderen Schwierigkeiten. Dazu gehört vor allem die Repräsentativität der behandelten Beispielprobleme. Sie wird im allgemeinen nur postuliert, aber nicht nachgewiesen. In dieser Hinsicht leiden empirische Effizienzstudien unter dem gleichen Repräsentativitätsproblem wie Komplexitätstheoretische Average case-Analysen.
- 34) Dies gilt zumindest dann, wenn die systematische Ausarbeitung der Effizienzstudien vorausgesetzt wird. Dabei erstrecken sich die Systematisierungsanforderungen einerseits auf die zugrundegelegten Beispielprobleme. Andererseits betreffen sie ebenso die Definition der Anwendungsumgebungen, in denen die Studien durchgeführt werden. Da die Effizienzstudien in der Regel auf Automatischen Informationsverarbeitungssystemen ausgeführt werden, bedarf es insbesondere einer Klärung ihrer Hard- und Softwarevoraussetzungen.
- 35) In der thematischen Rahmenlegung dieser Arbeit wurde von vornherein Effizienzgesichtspunkten ein geringer Rang eingeräumt. Daher liegt es außerhalb ihres Erkenntnisrahmens, die oben skizzierten Defizite bei der Effizienzbeurteilung durch eigene theoretische Komplexitäts- oder empirische Effizienzstudien zu beseitigen.

36) Dabei wird die grobe Komplexitätstheoretische Unterscheidung zwischen "effizienten" und "ineffizienten" Auswertungsalgorithmen übernommen. Sofern sich die Ausführungen auf praktische Erfahrungen aus dem Umgang mit Auswertungsalgorithmen beziehen, wird eine intuitive Vorstellung von "hinreichender Effizienz" und "beklagenswerter Ineffizienz" unterstellt. Eine Präzisierung dieser intuitiven Annäherung wäre zwar durch systematische empirische Effizienzstudien möglich. Aber sie stehen - wie zuvor dargelegt - kaum zur Verfügung.

37) Dieser Tendenzzusammenhang wurde anlässlich der modelltheoretischen Rahmenlegung ausführlicher erörtert. Allerdings wurde dort als einziger Auswertungszweck von Modellen die Lösung der jeweils modellierten Probleme in den Vordergrund gerückt. Deshalb wurde dort der Begriff der Lösungseffizienz gegenüber dem allgemeiner definierten Begriff der Auswertungseffizienz bevorzugt. In früheren Kapiteln wurde jedoch die Vielfalt unterschiedlicher Auswertungsoptionen für Netzmodelle entfaltet. Sie umfassen weit mehr Auswertungszwecke als lediglich die Lösung konkreter Koordinierungsprobleme. Daher wird das Modellierungsdilemma nunmehr auf die tendenzielle Gegenläufigkeit zwischen Ausdrucksmächtigkeit und Auswertungseffizienz bezogen.

38) Vgl. z.B. ABEL, D. (1990), S. 30 (für Zustandsautomatennetze), S. 31 (für Synchronisationsnetze) sowie S. 33 u. 118 (für Free-Choice-Netze).

39) Die verstärkte Beschäftigung mit sehr einfach strukturierten, restriktiv formulierten Netzklassen wird oftmals dadurch gerechtfertigt, daß die geringe Effizienz unbeschränkter Netzklassen enttäuscht habe. Infolgedessen verdienen die erheblich eingeschränkten Netzklassen mit ihrer wesentlich höheren Auswertungseffizienz größere Aufmerksamkeit. Vgl. zu diesem Argumentationsmuster HACK, M. (1972), S. 8; ULLRICH (1976), S. 5.1; PETERSON (1977), S. 238 u. 247; GHOSH, S. (1977), S. 1; SCHESCHONK (1977), S. 47; PAKAS-SKEWES (1979), S. 10, mittelbar auch S. 281; GRIESE, W. (1979), S. 1; WINDISCH (1979), S. 19; MEKLY (1980), S. 422; HURA (1982c), S. 436; MEMMI (1983b), S. 221.

40) Hinzu kommen allenfalls noch die Klassen der Free-Choice-Netze und der Zustandsautomatennetze. Auf Zustandsautomatennetze wurde schon hingewiesen. Als Übersicht über Free-Choice-Netze bietet sich z.B. ABEL, D. (1990), S. 31ff., an.

41) Vgl. zu den "effizienten" Auswertungsmöglichkeiten von Synchronisationsnetzen SHAPIRO, R. (1975b), S. 100; ROSENSTENGEL (1982), S. 78 (andeutungsweise). Die Ausdrucksarmut von Synchronisationsnetzen beruht auf zwei Ursachen. Erstens handelt es sich um eine Variante der Stelle/Transition-Netze. Die geringe allgemeine Modellierungsfähigkeit von Stelle/Transition-Netzen wurde bereits erörtert. Zweitens zeichnen sich Synchronisationsnetze durch die topologische Restriktion aus, daß ihre Stellen niemals mehrere Ein- oder mehrere Ausgangstransitionen besitzen dürfen. Auf diese Weise ist es unmöglich, daß in Synchronisationsnetzen jemals konfliktionär aktivierte Transitionen vorkommen. Daher ist die Repräsentation von Konflikten durch Synchronisationsnetze ausgeschlossen. Darauf wurde schon hingewiesen. Vgl. auch SHAPIRO, R. (1975b), S. 100, und ABEL, D. (1990), S. 31. Wegen der Unmöglichkeit der Konfliktrepräsentation büßen Synchronisationsnetze zwei wesentliche spezielle Modellierungsfähigkeiten vollständig ein: die Repräsentation von Entscheidungsalternativen und die Repräsentation von Ressourcenkonkurrenzen.

42) Dies folgt unmittelbar aus der Umkehrung des zweiten Arguments, das in der voranstehenden Anmerkung angeführt wurde, um das geringe Ausdrucksvermögen von Synchronisationsnetzen zu begründen.

43) Als herausragendes Beispiel läßt sich auf das Erreichbarkeitsproblem für Stelle/Transition-Netze verweisen. Es muß z.B. gelöst werden, wenn für ein Netzmodell eine erwünschte Endmarkierung vorgegeben ist und mit Hilfe einer Erreichbarkeitsanalyse die Finalität des Netzmodells untersucht werden soll. Dann muß geprüft werden, ob es möglich ist, die erwünschte Endmarkierung von der Ausgangsmarkierung des Netzmodells aus zu erreichen. Selbst dann, wenn Stelle/Transition-Netze noch geringen Einschränkungen unterworfen sind, erweisen sich die Lösungsalgorithmen für ihr Erreichbarkeitsproblem als hochgradig ineffizient. Darauf wird in Kürze noch näher eingegangen. Ähnliches trifft auf andere interessante Eigenschaften von Stelle/Transition-Netzen, wie z.B. ihre Deadlockfreiheit und Lebendigkeit, zu. Denn diese Netzeigenschaften bedeuten inhaltlich, daß bei Zugrundelegung einer Erreichbarkeitsanalyse im ungünstigsten Fall der *gesamte* Erreichbarkeitsgraph durchforscht werden muß. Daher liegt die Worst case-Zeitkomplexität der Algorithmen, die für die Untersuchung dieser Netzeigenschaften in Betracht kommen, in der gleichen Größenordnung wie diejenige von Lösungsalgorithmen für das Erreichbarkeitsproblem.

44) Zu den interessanten Netzeigenschaften, die hier behandelt wurden, gehören auch die Finalität, die Deadlockfreiheit und die Lebendigkeit eines Netzmodells, die in der voranstehenden Anmerkung angeführt wurden.

45) Er wird sogar durch die "kombinatorische Explosion" bekräftigt, die in Synthetischen Netzen von den strukturierten Marken verursacht wird. Darauf wird in Kürze näher eingegangen.

46) Die übrigen Auswertungstechniken leiden unter ähnlichen Effizienzproblemen.

47) Die Komplexitätstheoretische Analyse der Auswertungseffizienz von Netzmodellen wird ausschließlich auf die Variante der Worst case-Analyse bezogen. Auf ihre Mängel wurde schon im Zusammenhang mit der Diskussion des

Erreichbarkeitsproblems eingegangen. Dort wurde auch die produktionswirtschaftliche Präferenz für Average case-Analysen aufgezeigt. Doch auch sie leiden unter erheblichen Anwendungsschwierigkeiten. Darüber hinaus sind für die hier behandelten interessanten Eigenschaften von Netzmodellen bis heute keine aussagekräftigen Average case-Analysen bekannt geworden. Daher wird auf diese Analysevariante der Komplexitätstheorie im folgenden nicht näher eingegangen.

48) Vgl. insbesondere die Ausführungen zur Zeit- und Raumkomplexität.

49) Strenggenommen betrifft die Ineffizienz der Lösungsalgorithmen für das Erreichbarkeitsproblem sogar nur eine Teilklasse von Stelle/Transition-Netzen. Darauf wurde schon kurz zuvor hingewiesen.

50) Von Sonderfällen, in denen in Synthetischen Netzen die Basismarke als einzige Markenart zugelassen ist, wird in der nachfolgenden Argumentation abgesehen. Diese Abstraktion läßt sich nicht beanstanden, da ein wesentliches Motiv, von Stelle/Transition-Netzen auf Synthetische Netze überzugehen, in der vergrößerten Ausdruckskraft von strukturierten Marken lag.

51) Hinzu kommen noch die Kombinationsmöglichkeiten bei der Zusammensetzung von Kompositmarken. Sie spielen aber für die praktische Anwendung von Synthetischen Netzen eine geringere Rolle. So wurden sie in der Fallstudie nur an wenigen Stellen benutzt.

52) Bereits die Erreichbarkeitsgraphen von Stelle/Transition-Netzen unterliegen einem kombinatorisch explodierenden Größenwachstum (erster Art). Es beruht ausschließlich auf der Zulässigkeit der Basismarke. Das wurde in einer früheren Anmerkung ausführlicher dargelegt. Hier wird eine zusätzliche kombinatorische Explosion (zweiter Art) betrachtet: Sie gründet auf dem Hinzukommen strukturierten Marken. Die kombinatorische Explosion zweiter Art verstärkt die bereits vorhandene kombinatorische Explosion erster Art beträchtlich. Folglich kann auch von einer doppelten kombinatorischen Explosion gesprochen werden. Vgl. auch die analogen Ausführungen zur "kombinatorischen Problemexplosion" von NP-harten und NP-vollständigen Problemen.

53) Als mittelgroß werden hier Netze mit 50 bis 500 Knoten eingestuft. Eine Vergleichsgröße bietet das Gesamtnetz der Fallstudie. Seine Knotenmenge umfaßt - über alle Teilnetze hinweg ermittelt - insgesamt knapp 3.000 Elemente.

54) BYRN (1974), S. III-30, schätzt die Größenordnung der Elementanzahlen von Erreichbarkeitsmengen - und damit auch der Knotenanzahlen von Erreichbarkeitsgraphen - auf mehrere Millionen, wenn Netzmodelle für reale Problemstellungen zugrundeliegen. Dieses Urteil ist keineswegs übertrieben, selbst wenn unklar bleibt, wie viele Knoten ein realistisches Netzmodell auszeichnen sollen. Zur Verdeutlichung wird auf die Schätzformel zurückgegriffen, die schon in einer früheren Anmerkung angeführt wurde: Ihr zufolge wird die Knotenanzahl $\#(KN_{RG})$ eines Erreichbarkeitsgraphen für ein K-beschränktes Stelle/Transition-Netz mit M Stellen durch den exponentiellen Term $(K+1)^M$ nach oben beschränkt. Bereits für ein sehr einfaches, da 1-beschränktes, mittelgroßes Stelle/Transition-Netz mit $M=100$ stellenartigen Knoten ergibt sich daraus für die obere Schranke der Knotenanzahl des Erreichbarkeitsgraphen: $\#(KN_{RG}) \leq (1+1)^{100}$, d.h. ca.: $\#(KN_{RG}) \leq 1,3 \cdot 10^{30}$. Selbst wenn in Rechnung gestellt wird, daß die Anzahl der Knoten eines Erreichbarkeitsgraphen in der Regel kleiner ausfällt als die vorgenannte obere Schranke, so erscheint BYRNS Angabe von einigen 10^6 Knoten für einen Erreichbarkeitsgraphen immer noch als geradezu vorsichtig. Die Fallstudie umfaßte insgesamt 1.676 Stellen. Ihre Markenkapazitäten waren oftmals nicht auf den niedrigen Wert von 1 Markenkopie beschränkt. Der Einfachheit und Vergleichbarkeit halber wird aber unterstellt, das Gesamtnetz der Fallstudie stelle ein 1-beschränktes Netz dar. Darüber hinaus wird angenommen, für die Stellenmarkierung kämen ausschließlich Kopien der Basismarke in Betracht. Von der kombinatorischen Explosion durch strukturierte Marken wird also vollkommen abgesehen. Trotz dieser drastischen Vereinfachungen fällt die obere Schranke für die Knotenanzahl $\#(KN_{RG})$ desjenigen Erreichbarkeitsgraphen, der zum Gesamtnetz der Fallstudie gehört, exorbitant groß aus: $\#(KN_{RG}) \leq (1+1)^{1676}$, d.h. ca.: $\#(KN_{RG}) \leq 10^{505}$.

55) Als praktisch akzeptabel gelten hier Zeitspannen in der Größenordnung von einigen Minuten bis hin zu wenigen Stunden.

56) Dieses Urteil bezieht sich auf "typische" Automatische Informationsverarbeitungssysteme, auf die Modellierungsträger bei der Erprobung neuartiger Modellierungskonzepte in produktionsfernen Unternehmungsbereichen zugreifen können. Sofern es sich um Einplatzsysteme handelt, liegen sie in der Größenordnung von IBM-kompatiblen "80486"-Systemen oder von APPLE-"Macintosh"-Systemen. Dies gilt allerdings nur so lange, wie noch nicht zu den leistungsfähigeren "Workstations" übergegangen worden ist. Sie spielen schon heute bei der Automatischen Informationsverarbeitung in unmittelbarer Produktionsnähe eine beachtliche Rolle. Auf die Erwartung, daß solche Workstations zukünftig auch in den angrenzenden Bereich der Koordinierung von Produktionsprozessen diffundieren werden, wird später eingegangen. Mehrplatzsysteme finden dagegen im folgenden keine Würdigung. Sie bieten zwar in der Regel eine theoretisch höhere Informationsverarbeitungskapazität an. Doch bleibt ihre praktische Nutzung oftmals unbefriedigend, weil sich mehrere Benutzer durch ihre konkurrierenden Ressourcenzugriffe wechselseitig behindern. Darüber hinaus besteht ein allgemeiner Trend zu "individueller Informationsverarbeitung" auf der Basis von Einplatzsystemen; vgl. PRESSMAR (1982), S. 340 (der von "Kleinrechenanlagen" spricht); HEINRICH, G. (1990), S. 114ff.; HAUN (1990), S. 14ff.; VON ZIMMERMANN (1990), S. 237; REHM (1991), S. 27; ZANZINGER

(1991), S. B17; HUCKERT (1991), S. 273f. Aus den vorgenannten Gründen wird die Größenordnung der o.a. "typischen" Automatischen Informationsverarbeitungssysteme zunächst als Richtwert beibehalten.

57) Schon die Erprobungen des Softwarepakets PASIPP mit einfachen bis mittelgroßen Synthetischen Kernnetzen stießen an Praktikabilitätsgrenzen. Daher wurde auf die Erreichbarkeitsanalyse des Erweiterten Synthetischen Netzes der Fallstudie mit seinen knapp 3.000 Knoten von vornherein verzichtet.

58) Dazu rechnet der Verf. beispielsweise das "Problem" einer Autovermietung, das an früherer Stelle zur Verdeutlichung grundsätzlicher Netzcharakteristika erläutert wurde.

59) Da für Synthetische Kernnetze und für Erweiterte Synthetische Netze weder theoretische Untersuchungen ihrer Zeitkomplexität noch systematische empirische Effizienzstudien vorliegen, wird darauf verzichtet, die Ausmaße ihrer Ineffizienz zu unterscheiden. Zwar deuten die Komplizierungen der neuartigen Netzkonstrukte darauf hin, daß sich Erweiterte Synthetische Netze noch schwieriger auswerten lassen als Synthetische Kernnetze. Doch liegen darüber keine praktischen Erfahrungen vor. Daher unterbleibt eine differenzierte Beurteilung der Auswertungseffizienz von Synthetischen Kernnetzen und Erweiterten Synthetischen Netzen. Für eine solche Zurückhaltung spricht z.B., daß aus Einführung neuartiger Netzkonstrukte selbst unter dem Ceteris paribus-Vorbehalt strenggenommen nicht auf ein weiteres Anwachsen der Erreichbarkeitsgraphen geschlossen werden kann. Denn zusätzliche Netzkonstrukte können auch zu einer Einschränkung von Erreichbarkeitsgraphen führen. Dies trifft vor allem auf Inhibitorkanten und Schaltprioritäten zu. Sie bewirken oftmals, daß Schaltschritte, die vor ihrer Einführung noch zulässig waren, nachträglich nicht mehr ausgeführt werden dürfen. Entsprechend sinkt die Anzahl der Schaltkanten im Erreichbarkeitsgraphen. Damit ist im allgemeinen auch eine Reduzierung seiner Markierungsknoten verbunden. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, daß sich die Folgemarkierungen, die von den nunmehr verbotenen Schaltschritten früher hervorgebracht wurden, dennoch durch das Ausführen von anderen Schaltschritten erreichen lassen.

60) Dabei wird die "Ineffizienz" der Auswertung von Stelle/Transition-Netzen, die aus der zuerst angeführten Argumentationskette resultierte, zurückhaltend als eine "niedrige" Auswertungseffizienz umschrieben. Dafür sprechen zwei Gründe. Erstens stand das Ineffizienzresultat unter dem Vorbehalt, daß die Auswertung auf alle interessanten Netzeigenschaften bezogen wird. Dies schließt keineswegs aus, daß die Auswertung einzelner "günstiger" Netzeigenschaften einen geringeren Ressourceneinsatz benötigt. Dazu gehört z.B. die Erkenntnis struktureller Deadlockfreiheit. Zweitens wird eine Rangordnung der Auswertungseffizienz für die beurteilten Netzklassen angestrebt. Sie wäre nur wenig aussagekräftig, wenn alle drei Netzklassen in der gleichen Weise als "ineffizient" eingestuft würden. Daher wird die Klasse der Stelle/Transition-Netze durch das Urteil, sie besäße eine "niedrige" Auswertungseffizienz, von der "beklagenswerten Ineffizienz" der Synthetischen Netze sprachlich abgehoben.

61) Dies trifft zumindest dann zu, wenn die alternativen Auswertungstechniken eingesetzt werden, um produktionswirtschaftlich interessante Eigenschaften von Netzmodellen zu untersuchen. Die Effizienzdefizite von Deduktions- und Invariantenanalyse sind allgemein bekannt. Zur Verdeutlichung wird auf die erheblichen Effizienzprobleme hingewiesen, unter denen prädikatenlogische Theorembeweise leiden. Sie wäre notwendig, um die Deduktionsanalyse von Netzmodellen auf Synthetische Netze anzuwenden. Unter ähnlich großen Effizienzproblemen leidet die Invariantenanalyse spätestens dann, wenn sie auf Höhere Netze angewendet wird. Die Reduktionsanalyse bleibt dagegen von vornherein uninteressant, weil sie nur in rudimentären Ansätzen vorliegt. Auf die Analyse von mehreren der oben angeführten interessanten Modelleigenschaften läßt sie sich nicht anwenden (z.B. Promptheit). Für die Eigenschaftsanalyse von Höheren Netzen kommt sie ohnehin nicht in Betracht.

Allenfalls die Simulationsanalyse von Netzmodellen könnte einen Ausweg aus der Effizienzmisere bieten. Dies trifft aber nur in dem Ausmaß zu, wie mono- oder polyvalente Simulationsanalysen ausreichen, um eine interessante Netzeigenschaft zu überprüfen. Leider ist diese Voraussetzung oftmals nicht erfüllt. Denn zahlreiche der produktionswirtschaftlich interessanten Netzeigenschaften lassen sich erst durch eine omnivalente Simulationsanalyse feststellen. Dies gilt z.B. für die Bestätigung der Deadlockfreiheit eines Netzmodells ebenso wie für den Nachweis seiner Promptheit. Omnivalente Simulationsanalysen besitzen aber die gleiche Mächtigkeit wie Erreichbarkeitsanalysen. Auch die spezielle Variante der simulativen Auswertung von Optimierungsnetzen erfordert eine vollständige Konstruktion und Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen. Zwar läßt sich ein Optimierungsnetz aufgrund seiner besonderen Konstruktionsweise durch eine mono- oder polyvalente Simulation auswerten. Aber die Konstruktion des Optimierungsnetzes setzt voraus, daß zuvor der vollständige Erreichbarkeitsgraph desjenigen Netzmodells ermittelt wurde, für das ein optimaler Schaltprozeß bestimmt werden soll. Aufgrund dieser Sachverhalte bietet die Simulationsanalyse von Netzmodellen keine Aussicht auf eine wesentliche Erhöhung der Auswertungseffizienz. Dies gilt zumindest dann, wenn sie als *allgemeine* Auswertungstechnik für die *hier* interessierenden Netzeigenschaften vorgesehen wird. Für die anschauliche Visualisierung *einzelner* Schaltprozesse - also als Animationstechnik - eignen sich Simulationen von Netzmodellen dagegen hervorragend. Darauf wird in Kürze zurückgekommen.

62) Die mangelhafte Auswertungseffizienz von Petrinetzen wird unter vielfach variierenden Formulierungen thematisiert, so z.B. auch als praktische Unanwendbarkeit, als unzureichende Praktikabilität oder als schwere Analyzierbarkeit. Vgl. dazu BAKER, H. (1973a), S. 1; CRESPI-REGHIZZI (1974), S. 1.1; BYRN (1974), S. III-30 u. III-48; FERNANDEZ (1975), S. 1; LOCKEMANN (1975), S. 11; HACK, M. (1975a), S. 14; ULLRICH (1976), S. 5.1; KINNEY

(1976), S. 616; CRESPI-REGHIZZI (1976a), S. 130 u. 137; WINKOWSKI (1976b), S. 1; PETERSON, J. (1977), S. 247; GHOSH, S. (1977), S. 1; SCHESCHONK (1977), S. 47; CRESPI-REGHIZZI (1977), S. 144; AGERWALA (1978a), S. 153; AGERWALA (1978b), S. 305; YU, S. (1978), S. 175; VALETTE (1979a), S. 35; PAKAS-SKEWES (1979), S. 281; PETRI, C. (1979c), S. 84; AGERWALA (1979), S. 93; MURATA, TA. (1979a), S. 807; MEKLY (1980), S. 422; NOE (1980b), S. 370; MURATA, TA. (1980b), S. 42; BERTHELOT (1982b), S. 251; ABEL, D. (1990), S. 42 (nur in bezug auf Höhere Netze).

Des öfteren werden Effizienzprobleme auch auf indirekte Weise angesprochen. So wird z.B. hervorgehoben, für den Umgang mit Netzen müßten noch erheblich leistungsfähigere Instrumente entwickelt werden; vgl. MARTINEZ (1982a), S. 301.

Mitunter werden die Effizienzmängel bei der Auswertung von Netzmodellen nicht dem Petrinetz-Konzept selbst, sondern der immanenten Komplexität der jeweils repräsentierten Probleme angelastet. Vgl. ULLRICH (1976), S. 5.1; AGERWALA (1978a), S. 153; AGERWALA (1979), S. 93; HURA (1982c), S. 438. Der Verf. verzichtet darauf, diese "Schuldfrage" zu vertiefen. Aus seiner Sicht ist nur interessant, daß die Auswertungseffizienz von Netzmodellen für Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen extrem niedrig ausfällt. Ob dies an den Koordinierungsproblemen selbst oder aber am Petrinetz-Konzept liegt, spielt dagegen keine Rolle. Denn ein Modellierungskonzept kann immer nur im *Verbund* mit einem Modellierungsobjekt angewendet werden. Eine Zurechnung der Effizienzverursachung auf einen der Verbundpartner verbietet sich daher strenggenommen.

63) Dennoch fallen die Kriterien mit dem Effizienzkriterium inhaltlich nicht zusammen. Dies liegt an zwei Gründen. Erstens betonen die Kriterien spezielle Aspekte der Auswertungseffizienz. Insofern handelt es sich um Subkriterien. Zweitens hängt die Kriterienerfüllung nicht nur von der Auswertungseffizienz, sondern auch noch von anderen Einflußgrößen ab. Dabei handelt es sich vor allem um die Informationsverarbeitungskapazität, die für die Konzeptanwendung zur Verfügung steht. Vgl. dazu die nachfolgende Anmerkung. Dieser Kapazitätsaspekt gehört aber nicht mehr zum Effizienzkriterium. Aus dieser Sicht liegen keine Subkriterien vor. Die verfügbare Informationsverarbeitungskapazität stellt grundsätzlich keine Eigenschaft eines zu beurteilenden Modellierungskonzepts dar. Sie gehört vielmehr zu den kontingenten Einflüssen derjenigen Umgebungen, in denen ein Modellierungskonzept zur Anwendung gelangen kann. Daher wird die verfügbare Informationsverarbeitungskapazität stets als exogen vorgegebene, bei der Konzeptbeurteilung irrelevante Konstante betrachtet.

64) Vgl. zur Forderung nach Aktualität OELLERS (1981), S. 38.

Die Aktualitätsforderung läßt sich angesichts der hier interessierenden Koordinierung von Produktionsprozessen wie folgt auslegen: Die Ergebnisse der Auswertung eines Produktionsmodells sollen so rasch zur Verfügung stehen, daß sie für die jeweils aktuelle Produktionssituation gültig sind. Dies muß keineswegs der Fall sein. Denn die Modellauswertung wurde zu einem früheren Zeitpunkt angestoßen. In der Zwischenzeit kann sich die Produktionssituation so stark verändert haben, daß die Auswertungsergebnisse, die unter dem Informationsstand der früheren Produktionssituation ermittelt wurden, in der aktuellen Produktionssituation nicht mehr zutreffen. Dies wurde als schnelles Veralten von Produktionsplänen ausführlicher thematisiert. Darüber hinaus wurde für die Flexiblen Fertigungssysteme, die den Argumentationshintergrund dieser Arbeit bilden, unterstellt, daß sich in ihnen die Produktionssituationen tatsächlich oftmals, kurzfristig und unvorhergesehen verändern. Unter diesen Voraussetzungen bedeutet die oben geforderte Aktualität von Modellauswertungen, daß nur eine geringe Zeitdauer zwischen dem Anstoßen der Auswertungsprozesse und dem Vorliegen ihrer Resultate verstreichen darf. Diese Auswertungsdauer hängt von zwei Einflußgrößen ab: der verfügbaren Informationsverarbeitungskapazität und der Effizienz der eingesetzten Auswertungsalgorithmen. Die Informationsverarbeitungskapazität stellt keinen Aspekt des hier zu beurteilenden Modellierungskonzepts dar. Sie wird daher nicht weiter betrachtet (vgl. die voranstehenden Anmerkung). Daher wird der Beitrag, den ein Modellierungskonzept zur Aktualität einer Prozeßkoordinierung zu leisten vermag, ausschließlich von der Effizienz der konzepteigenen Auswertungsalgorithmen determiniert. Folglich kann die Erfüllung des Beurteilungskriteriums "Aktualität" auf die Auswertungseffizienz eines Modellierungskonzepts zurückgeführt werden. Deshalb wird der Gesichtspunkt der Aktualität hier nicht als ein selbständiges Beurteilungskriterium berücksichtigt.

65) Vgl. zum Postulat der Reagibilität KRYCHA (1972), S. 15.

Reagibilität wird hier als die Fähigkeit verstanden, durch Auswertungen eines Produktionsmodells auf Veränderungen der Produktionssituation so schnell antworten zu können, daß die Reaktion auf die Situationsveränderung zum geplanten Anpassungserfolg führt. Dies ist dann der Fall, wenn die Ergebnisse der Anpassungsplanung in derjenigen Produktionssituation, in der sie zur Verfügung stehen, noch gültig sind. Es ist offensichtlich, daß die Forderung nach Reagibilität mit dem Gebot der Aktualität inhaltlich zusammenfällt. Daher wird auf die entsprechenden Ausführungen in der voranstehenden Anmerkung verwiesen.

66) Vgl. zur Forderung nach Realzeitadäquanz die Quellen, die in einer früheren Anmerkung zur Heranführung von PPS-Systemen an Prozeßkoordinierungen unter Realzeitbedingungen genannt wurden; vgl. darüber hinaus auch HEIMERDINGER (1978), S. 163.

Realzeitadäquanz stellt eine zeitliche Präzisierung und Verschärfung des Reagibilitätspostulats dar. Denn die Realzeitadäquanz einer Prozeßkoordinierung wurde als die Fähigkeit definiert, alle zeitkritischen Produktionsprozesse

unter Einhaltung aller harten Realzeitbedingungen zu steuern. Entsprechend wird ein Modellierungskonzept als realzeitadäquat bezeichnet, wenn mit seiner Hilfe Produktionsmodelle für realzeitadäquate Prozeßkoordinierungen gestaltet werden können. Solche Produktionsmodelle erfüllen die Anforderung der Reagibilität, die in der voranstehenden Anmerkung charakterisiert wurde. Dabei wird das Ausmaß der erforderlichen Reagibilität durch die Realzeitbedingungen zeitlich präzisiert. Zugleich wird durch die Voraussetzung, es müsse sich um *harte* Realzeitbedingungen handeln, die Forderung nach Reagibilität inhaltlich verschärft.

67) Dies folgt unmittelbar aus der Gleichläufigkeit der Kriterienerfüllung, die kurz zuvor als Gemeinsamkeit von Aktualität, Reagibilität, Realzeitfähigkeit und Effizienz herausgestellt wurde. Daher braucht auf die o.a. Kriterien nicht mehr im Detail eingegangen zu werden. Lediglich der Aspekt der Realzeitadäquanz weist eine Besonderheit auf, die über die Erläuterungen zur Auswertungseffizienz hinausreicht. Sie betrifft die Möglichkeit, die Realzeitadäquanz einer Prozeßkoordinierung anhand der Promptheit eines Koordinierungsnetzes grob einzuschätzen.

68) Dies trifft z.B. auf Stelle/Transition-Netze zu, die zur Teilklasse der Synchronisationsnetze gehören. Ihre effiziente Auswertungsmöglichkeit wurde schon oben dargelegt.

69) Vgl. dazu den früheren Hinweis auf "günstige" Netzeigenschaften. Allerdings gehören die meisten der produktionswirtschaftlich interessanten Netzeigenschaften nicht zu diesen angenehmen Fällen.

70) Da nur *einzelne* Schaltprozesse betrachtet werden, liegt jeweils eine unkomplizierte, monovalente Simulationsanalyse vor.

71) Daneben kommen auch komparative Netzanalysen in Betracht. Sie erfordern allerdings den Übergang von mono- zu polyvalenten Simulationsanalysen.

72) Dieser Zusatz drückt aus, daß weder die simulative Auswertung von speziell konstruierten Netzmodellen noch die Untersuchung besonders "günstiger" Netzeigenschaften gemeint ist.

73) Auch die simulative Beurteilung von Entscheidungskonsequenzen gehört nicht zu diesen interessanten *Modell*eigenschaften. Vielmehr untersucht sie die Eigenschaften der jeweils betrachteten *Entscheidungen*. Dies verhindert aber keineswegs, daß für einen Modellierungsträger die Beurteilung von Entscheidungskonsequenzen hochinteressante Erkenntnisse zu Tage fördern kann. In dieser Hinsicht wurde schon die Option angesprochen, simulative Auswertungen von Netzmodellen in die Gestaltung von PPS-Systemen einzubeziehen.

74) Damit sind die beiden Determinanten der Informationsverarbeitungskapazität gemeint, die in einer früheren Anmerkung genannt wurden: der Speicherraum und die Operationsgeschwindigkeit. Darüber hinaus kann man auch auf effizienzsteigernde Verbesserungen der Algorithmen hoffen, die im Rahmen der Systemsoftware - z.B. für Speicherezugriffe oder für Sortierprozesse - eingesetzt werden. Dies stellt allerdings nur ein schwaches Argument dar. Denn für die Verbesserung der algorithmischen Effizienz von Systemsoftware kann kein ähnlich ausgeprägter Entwicklungstrend aufgezeigt werden, wie es für Speicherraum und Operationsgeschwindigkeit von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen möglich ist.

75) Darauf berufen sich auch BYRN (1974), S. III-48; PETRI,C. (1983), S. 7. Allerdings heben sie nicht das Anwachsen der Leistungsfähigkeit Automatischer Informationsverarbeitungssysteme, sondern das Sinken der Hardwarekosten hervor. Die zugrundeliegenden Entwicklungstrends wurden schon in der einleitenden Rahmenlegung herausgestellt.

76) In diese Richtung weist der zunehmende Einsatz von arbeitsplatzorientierten Hochleistungsautomaten, von sogenannten "Workstations", in produktionsnahen Bereichen. Dazu gehören vor allem die Produktkonstruktion (CAD) und die Fabrikauslegungsplanung, daneben aber auch die NC-Programmierung. Wenn sich Workstations dort etabliert haben, liegt es nahe anzunehmen, daß ihre Akzeptanz in den angrenzenden Bereich der Koordinierung von Produktionsprozessen ausstrahlt. Vgl. zu der allgemeinen Tendenz, Workstations im Umfeld von Produktionsprozessen verstärkt zu würdigen, SCHEER (1989h), S. 33; HAUG (1989b), S. 37; REMBOLD (1990), S. 108f.; HEFELE (1990), S. 12; HUCKERT (1991a), S. 274; KAMMÜLLER (1991), S. 41; NEUMANN,G. (1991b), S. 59; REHM (1991), S. 27; WINTER,RO. (1991), S. 192. Vgl. auch - allerdings weniger deutlich - ZANZINGER (1991), S. B17 (etliche der dort angeführten "Personalcomputer" rechnet der Verf. bereits zur Klasse der Workstations); WECK (1991e), S. 128 (ohne explizite Nennung des Begriffs "Workstation"). Vgl. darüber hinaus zu allgemeinen Darstellungen der Leistungsmerkmale typischer Workstations MÜLLER-SCHLOER (1990), S. 718ff.; O.V. (1991b), S. 62ff.; MÜLLER-ZANTOP (1991), S. 153ff.; NEUMANN,G. (1991b), S. 59f.

77) Das Nebenläufigkeitsargument, das hier vorgetragen wird, trifft im Prinzip auch auf Konzepte für die Konstruktion von Netzmodellen zu. Zumeist wird die Modellkonstruktion aber in interaktiver Weise durch ein Zusammenwirken von Automaten und Menschen erfolgen. Vgl. dazu die Erläuterungen zur interaktiven Nutzung von Netzeditoren. Das menschliche Denken bewegt sich aber vornehmlich in sequentiellen Operationsmustern. Die populären Hinweise auf "vernetztes" Denken übersehen diesen Sachverhalt, obwohl er in der Kognitionspsychologie nicht ernsthaft bestritten wird. Daher bietet sich für die Entwicklung nebenläufiger Konstruktionskonzepte nur wenig Spielraum. Allenfalls für die konstruktionsbegleitende Visualisierung von graphisch repräsentierten

Teilmodellen könnte die nebenläufige Implementierung graphischer Softwarepakete eine größere Bedeutung erlangen. Dies bleibt aber eine vornehmlich informationstechnische Aufgabe. Daher wird auf Möglichkeiten, die immanente Nebenläufigkeit von Modellkonstruktionen auszuschöpfen, nicht näher eingegangen.

78) Vgl. die Hinweise auf nebenläufige Varianten des Unifizierungs- und Resolutionskonzepts. Dieses kombinierte Auswertungskonzept für prädikatenlogische Theorembeweise stellt eines der herausragenden Basiskonzepte für die Auswertung Synthetischer Netze dar.

79) Gemeint sind in erster Linie Multiprozessorsysteme.

80) Diese Automatischen Informationsverarbeitungssysteme verursachen wegen ihrer anspruchsvollen Architektur und ihrer noch geringen Marktdurchdringung erheblich höhere Anschaffungskosten als ihre konventionellen, sequentiell operierenden Pendanten. Daher müssen die Verringerungen der Ausführungszeit von Algorithmen mit den gesteigerten Anschaffungskosten verglichen werden. Auf eine monetäre Bewertung für die grobe Abschätzung der Konstruktions- und Auswertungseffizienz von Netzmodellen wurde aber schon eingangs verzichtet. Deshalb wird das Abwägen von Zeitvorteilen und Kostennachteilen nicht weiter vertieft.

81) Auf den Effizienzvorteil der sortengerechten Variablenbindung wurde schon hingewiesen. Er gehörte zu denjenigen Motiven, die den Verf. veranlaßt haben, die Implementierungsgrundlage des Softwarepakets PASIPP zugunsten der Programmiersprache Turbo-PROLOG zu modifizieren. Denn das Softwarepaket PASIPP sieht überhaupt keine Sortierung von Formel- und Funktionsargumenten vor. In der Programmiersprache Turbo-PROLOG wird sie dagegen von vornherein berücksichtigt, auch wenn die Sortierung als solche nicht explizit hervorgehoben wird.

82) Vgl. PETRI, C. (1983), S. 7. Vgl. auch die optimistische Einschätzung der "advances in solution technology" für graphentheoretisch basierte Modellierungskonzepte bei GLOVER (1990), S. 9. Ein ähnliches Fortentwicklungsargument findet sich bei ZENTES (1976), S. 36. Allerdings bezieht er sich auf kein bestimmtes Modellierungskonzept. HOLZMANN (1987), S. 339f. u. 343, empfiehlt für den Umgang mit wenig effizienten Erreichbarkeitsanalysen (für beliebige dynamische Systeme), vornehmlich darauf zu setzen, die Effizienz der Auswertungsalgorithmen bei ihrer Anwendung auf Automatischen Informationsverarbeitungssystemen zu steigern.

83) Die Auswertung des Netzmodells, das in der Fallstudie für ein "einfaches" Flexibles Fertigungssystem entwickelt wurde, unterblieb von vornherein. Es bestand keine Aussicht, seine Erreichbarkeitsanalyse mit derjenigen Informationsverarbeitungskapazität zu bewältigen, auf die der Verf. zugreifen konnte.

84) ROSENSTENGEL (1982), S. 1.

85) Die Existenz einer Anwendungsbarriere räumt auch PETRI, C. (1979c), S. 87, ein. Seiner Ansicht bedürfen Petri-Netze "... wohl noch der Vereinfachung und *Ergänzung*, bis sie als Grundlage größerer Anwendungsprojekte in Frage kommen" (kursive Hervorhebung durch den Verf.). Allerdings legt sich PETRI nicht auf eine bestimmte Ursache der Anwendungsbarriere fest. Darüber hinaus schließt sich der Verf. nicht dem Vereinfachungsaspekt aus PETRI's Feststellung an. Er widerspricht der grundsätzlichen Ausrichtung dieser Arbeit, möglichst ausdrucks mächtige Modellierungen anzubieten. Der Ergänzungsaspekt umgreift dagegen die oben aufgezeigten Perspektiven, die in Zukunft dazu beitragen können, die Effizienzschwäche des Petri-Netz-Konzepts zu lindern.

Die Relevanz von Effizienzbarrieren für die praktische Anwendung von Modellierungskonzepten unterstreicht STAUDINGER (1990), S. 179. Er berichtet über den Einsatz Linearer Optimierungsmodelle in der Stahlindustrie. Beim Vergleich unterschiedlicher Softwarepakete für die automatengestützte Modellkonstruktion und -auswertung räumt er ein, daß sich die Klasse der mikrocomputerbasierten Softwarepakete hinsichtlich ihrer Benutzerfreundlichkeit als überlegen erweise. *Dennoch* seien großrechnerbasierte Softwarepakete aufgrund ihrer höheren Effizienz für die Modellierungsunterstützung ausgewählt worden.

86) Durch die beiden erstgenannten Bedingungen werden alle Modellierungen von Produktionssystemen ausgegrenzt, die bisher mit der Hilfe von Netzen erstellt worden sind. Denn es handelt sich entweder um Produktionsmodelle, die sich mit der geringen Ausdruckskraft von Stelle/Transition-Netzen zufriedengeben. Sie werden von der ersten Bedingung ausgeschlossen. Oder die Produktionsmodelle wurden mit der Hilfe von ausdrucks mächtigeren Höheren Netzen konstruiert. In diesen Fällen sind aber bisher nur projektive Simulationsstudien vorgelegt worden. Daher verletzen sie die zweite Bedingung.

87) Dieses Modellierungsinteresse wurde für die hier vorgelegte Ausarbeitung als Prämisse vorausgesetzt.

88) Diese Feststellung trifft auf alle Höheren Netze zu. Sie wird auch bei CRESPI-REGHIZZI (1976a), S. 130 u. 137, angedeutet.

89) Darauf scheint auch ABEL, D. (1990), S. 47, anzuspielen, wenn er für hierarchische Verfeinerung umfangreicher Netzmodelle feststellt: "Die Analyse eines großen Gesamtsystems wird damit auf die getrennte Analyse mehrerer kleiner Teilsysteme zurückgeführt." Dabei weist ABEL zu Recht darauf hin, daß sich die Gesamtheit aller Module eines modular zerlegten Netzes in der Regel weitaus effizienter analysieren läßt als das zugrundeliegende - aber

monolithische - Gesamtnetz. Denn bei der separaten Untersuchung eines Netzmoduls braucht die kombinatorisch explodierende Vielfalt von Schaltakten, die in anderen Netzmodulen nebenläufig zum jeweils betrachteten Netzmodul geschehen können, nicht beachtet zu werden. Daher schafft die modulare Zerlegung eines Gesamtnetzes in der Tat einen bemerkenswerten Effizienzvorteil gegenüber der direkten Auswertung des Gesamtnetzes. Aber das nachfolgend angesprochene Syntheseproblem, das die Aggregation von modular gesammelten Teilerkenntnissen zu einer Erkenntnis über das Gesamtnetz betrifft, wird damit noch nicht gelöst. Auch ABEL gibt dafür keine Anhaltspunkte.

90) In einer früheren Anmerkung wurde aufgezeigt, daß mitunter die Möglichkeit besteht, die Verifizierung von Netzmodellen auf die Verifizierung ihrer Module zurückzuführen. Leider läßt sich dieser Weg aber keineswegs immer beschreiten.

Beispielsweise kann ohne Schwierigkeiten ein Netzmodell konstruiert werden, daß aus deadlockfreien Netzmodulen aufgebaut ist, aber dennoch in seinem Gesamtverhalten einen unerwünschten Deadlock aufweist. Dieser Fall kann z.B. dann eintreten, wenn drei Voraussetzungen erfüllt sind. Erstens sind zwei deadlockfreie Netzmodule so hintereinandergeschaltet, daß die Outputstelle des ersten Moduls mit der Inputstelle des zweiten Moduls zusammenfällt. Zweitens werden die Netzmodule mit Höheren Netzen modelliert, die gestatten, daß das erste Modul auf seiner gemeinsamen Schnittstelle mit dem zweiten Modul eine informationsrepräsentierende Attributmarke ablegt. Drittens kann das erste Netzmodul - zumindest einmal - auf seiner Outputstelle eine Attributmarke ablegen, die aufgrund ihres Informationsgehalts vom anschließenden zweiten Modul nicht weiterverarbeitet werden kann. Dann läßt sich nicht ausschließen, daß das zweite Modul nicht mehr aktiv wird, obwohl beide Module korrekt deadlockfrei funktionieren. Das Blockieren des zweiten Moduls kann widrigenfalls einen Deadlock des gesamten Netzmodells darstellen.

Dem Verf. sind bisher noch keine Ansätze bekannt geworden, die in der Lage wären, Probleme der vorgenannten Art zu überwinden. Zwar existieren einige Analysevorschlage für modular zerlegte und zugleich hierarchisch verfeinerte Netzmodelle. Dort wird aber stets ein transitionenberandetes Netzmodul auf der nächsthöheren Ebene als eine Transition behandelt, die entweder schalten kann oder aber passiv verharrt. Dazu gehören z.B. auch die Ausfüh-rungen von ABEL, D. (1990), S. 45ff., insbesondere S. 47. Auf diese Weise wird aber nur erfaßt, daß das transitionsverfeinernde Netzmodul sein Schaltverhalten entweder einmal ausführt oder aber in Ruhe bleibt. Die Über-gabe von Informationen an den Modulschnittstellen wird dadurch aber überhaupt nicht berück-sichtigt. Daher kann auch nicht die o.a. Deadlockgefahr erkannt werden.

Das zuvor skizzierte Analyseproblem stellt keineswegs eine "exotische" Randerscheinung dar. Vielmehr wurden in der früher präsentierten Fallstudie die einzelnen Netzmodule oftmals koordiniert, indem informationsreprasentierende Attributmarken an ihren Schnittstellen ausgetauscht wurden. Für diesen Zweck wurden extra Informationsstellen und -marken eingeführt. Daher kommt der Schwierigkeit, informationsbedingte Deadlocks in einem Netzmodell trotz deadlockfreier Netzmodule aufzudecken, hier gravierende Bedeutung zu. Analoge Probleme könnten für andere interessierende Netzeigenschaften, wie z.B. M_0 -Reversibilität oder Finalität, aufgezeigt werden. Der Verf. verzichtet darauf, weil die bereits vorgetragenen Argumente lediglich variiert würden, ohne grundsätzlich neue Erkenntnisse zu vermitteln.

Eine andere Begrenzung der Aggregation von Teilerkenntnissen, die sich aus der Analyse einzelner Netzmodule ergeben, erstreckt sich auf Zeitnetze. Es wurde gezeigt, daß sich die Netzkonstrukte, die für die Repräsentation von zeitverbrauchenden atomaren Prozessen eingeführt wurden, zu stellenberandeten Makrotransitionen vergrößern lassen. Es liegt nahe, die zugrundeliegenden Netzkonstrukte als Netzmodule zu betrachten. Die Zeitdauer, die zwischen den Schaltzeitpunkten ihrer Start- und ihrer Schlußtransitionen verstreicht, kann der Makrotransition als Schaltdauer zugeordnet werden. Dies führt so lange zu keinen Problemen, wie die Makrotransitionen lediglich zu Veranschaulichungszwecken verwendet werden. Es wurde aber schon ausdrücklich davor gewarnt, die Makrotransitionen - ohne ihre Rückführung auf die Schaltakte der Mikrotransitionen aus den zugrundeliegenden Netzkonstrukten - unmittelbar zu schalten. Denn dies kann zu den diffizilen Schaltproblemen von Zeittransitionen aus transitionsbezogenen Zeitnetzen führen. Das gilt ebenso, wenn versucht wird, dynamische Eigenschaften eines Netzes anhand seiner Makrotransitionen - wiederum ohne Bezug auf die zugrundeliegenden Mikrotransitionen - zu untersuchen. Folglich wäre es verfehlt zu glauben, Netzkonstrukte für atomare zeitverbrauchende Prozesse so zu Makrotransitionen abstrahieren zu können, daß sich danach auf höherer Hierarchieebene das Verhalten des vergrößerten Netzes durch direktes Schalten der Makrotransitionen untersuchen ließe. Auch aus diesem Grund erscheint es verfehlt, die Effizienzprobleme von Netzanalysen ausschließlicly auf dem Weg einer hierarchisch-modularen Netzkonstruktion überwinden zu wollen. Dies gilt zumindest für die hier interessierenden produktionswirtschaftlichen Modellierungsaufgaben, bei denen die Repräsentationen von zeitverbrauchenden Prozessen eine maßgebliche Rolle spielen.

91) Vgl. dazu die Fallstudie.

92) Dazu gehören vor allem Softwarepakete, die auf die Modellierung mit Netzplänen oder mit OR-Programmen zugeschnitten sind.

93) Das trifft auch auf jene - ohnehin nur selten anzutreffende - Software zu, die ein graphisches Gestalten von Netzplänen gestattet. Denn sie scheitert bereits an der Voraussetzung, Graphiksymbole für zwei unterschiedliche

Knotenarten bereitzustellen. Anspruchsvollere Aufgaben - wie das Beschriften von Netzkanten mit tupelförmigen Ausdrücken - werden erst recht nicht abgedeckt.

94) Es fehlt schon an Prozeduren für das Ausführen von Schaltschritten. Konstruktion und Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen werden ebensowenig erfaßt.

95) Netzspezifische Software wird von denjenigen Unternehmungen, in denen das Petrinetz-Konzept für produktionswirtschaftliche Modellierungen in Betracht kommt, im allgemeinen nicht selbst entwickelt. Daher spielen hier Herstellkosten der netzspezifischen Software keine Rolle. Infolgedessen fallen die oben angesprochenen Ressourcen-Bereitstellungskosten hier mit Software-Anschaffungskosten zusammen. Ein analoges Argument trifft auch auf die nachfolgend erwähnte Hardware zu. Daher wird auch dort nur von Anschaffungskosten geredet.

96) Dies betrifft insbesondere das Ausmaß, in dem die Kosten der Softwareentwicklung auf die einzelnen Nutzungslizenzen verrechnet werden.

97) Damit werden alle Softwarepakete ausgeschlossen, die auf nicht-kommerzieller Basis erworben werden. Sie kursieren zwar, z.B. als Prototypen "zu Testzwecken", unter interessierten Netzanwendern. Aber ihre Benutzungsbedingungen bewegen sich in einer Grauzone, die sie einer seriösen Beurteilung entzieht. Daher bleiben sie hier unbeachtet.

98) Beispielsweise liegen die Anschaffungskosten des Softwarepakets DESIGN bei DM 35.000 (US-\$ 20.000) für die Version Design/CPN 1.5 auf dem Preisstand von 1990; vgl. META SOFTWARE (1990a), o.S. (S. 1) und META SOFTWARE (1990b), o.S. (S. 1). Das Softwarepaket DESIGN wird hier exemplarisch hervorgehoben, weil es bereits eingesetzt wurde, um Netzmodelle für einige wenige produktionswirtschaftliche Koordinierungsprobleme zu konstruieren und auszuwerten. Die dort präsentierten Koordinierungsmodelle erreichen zwar bei weitem nicht das Ausmaß der Fallstudie. Doch kommen sie immerhin der Repräsentation realistischer Koordinierungsprobleme weitaus näher als die meisten anderen Netzmodelle, die bisher im produktionswirtschaftlichen Bereich vorgelegt wurden.

99) Der hohe Bedarf an Hauptspeicherraum resultiert vor allem aus der Notwendigkeit, die Erreichbarkeitsgraphen von Netzmodellen zwecks Auswertung vorzuhalten; vgl. BYRN (1974), S. III-48. Die Erreichbarkeitsgraphen unterliegen aber ihrerseits einer beträchtlichen kombinatorischen Explosion.

Oftmals werden sich die Erreichbarkeitsgraphen sogar noch nicht einmal vollständig im Hauptspeicher vorhalten lassen. Vgl. dazu die Abschätzung aus einer früheren Anmerkung, daß die Verwaltung von erreichbaren Systemzuständen bei der Untersuchung realer Kommunikationsprotokolle in der Größenordnung von 400 MByte liegt. Diese Hauptspeichergröße wird selbst von Workstations derzeit bei weitem noch nicht erzielt. Daher wird es oftmals erforderlich sein, Erreichbarkeitsgraphen auf schnellen peripheren Speichern - wie z.B. Magnetplattensystemen - vorzuhalten. Um die Ausführungsdauer von Erreichbarkeitsanalysen nicht zu stark anwachsen zu lassen, müssen die eingesetzten Workstations entsprechend schnell auf ihre peripheren Speicher zugreifen können (im Millisekundenbereich). Auf die Möglichkeiten, Hauptspeicherraum und rasch zugreifbare periphere Speicher wechselseitig zu substituieren, wird hier nicht weiter eingegangen. Statt dessen wird vereinfachend nur von "dem" Bedarf an Hauptspeicherraum gesprochen.

100) Dies gilt zumindest dann, wenn verhindert werden soll, an die Akzeptanzbarrieren von "zu langwierigen" Auswertungsdauern zu stoßen.

101) Das kann bis hin zu Hardwaremodulen reichen, die ausschließlich auf graphische Informationsverarbeitungsaufgaben spezialisiert sind.

102) Vgl. zum Einsatz von Workstations bei der Konstruktion oder Auswertung von Netzmodellen HOLZMANN (1987), S. 342f. (dort allerdings hinsichtlich der Erreichbarkeitsanalyse von beliebigen dynamischen Systemen, die nicht unbedingt als Petrinetze modelliert sein müssen).

103) Die Anschaffungskosten einer typischen "Workstation" mit hochauflösendem Graphikbildschirm und zugehöriger Systemsoftware liegen in der Größenordnung von 15.000 bis 50.000 DM, gehen aber in Einzelfällen auch deutlich über 100.000 DM hinaus; vgl. z.B. HAUG (1989b), S. 37; MEYER, W. (1990a), S. 204, Table 4.9; o.V. (1991b), S. 62ff., mit einer umfangreichen Marktübersicht für Workstations; MÜLLER-ZANTOP (1991), S. 153 u. 156f.; NEUMANN, G. (1991b), S. 60. Auf die relativ hohen Anschaffungskosten von Workstations weist im Kontext der graphischen Informationsverarbeitung auch JACOBI (1991), S. 60, hin.

104) Vgl. zu ähnlichen Größenordnungen ZANZINGER (1991), S. B17 ("sechsstellige Investitionssumme" für CAD-Workstations). Weitere Kosten, die von der Soft- und Hardwarebereitstellung verursacht werden können, bleiben unbeachtet. Dabei handelt es sich vor allem um die informationstechnischen und die organisatorischen Implementierungskosten. Sie umfassen auch die Kosten der Benutzerschulung, die für den Umgang mit der netzspezifischen Software unter Umständen erforderlich sind. Diese Zusatzkosten hängen erheblich von den speziellen betrieblichen Anwendungsumgebungen ab, in die eine netzgestützte Modellierung von Koordinierungsproblemen eingeführt werden soll. Sie lassen sich daher für eine allgemeine Beurteilung des Petrinetz-Konzepts kaum heranziehen. Darüber

stellen sie Kostenaspekte dar, die für nahezu *jede* automatengestützte Konzeptanwendung anfallen. Daher besitzen sie für die hier interessierenden Stärken und Schwächen des Petrinetz-Konzepts keine Aussagekraft.

105) Abweichender Ansicht ist HACKMANN (1981), S. 372. Er attestiert dem Petrinetz-Konzept, seine Einsatzkosten fielen "recht günstig" aus. Allerdings bezieht er sich auf indirekte, nur schwer zu überprüfende Kostenwirkungen, wie z.B. Beiträge zur Methodenvereinheitlichung.

9.2.2.2.3 Implementierbarkeit

Unter der Implementierbarkeit¹⁾ eines Modellierungskonzepts wird die Möglichkeit verstanden, das Konzept auf einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem anzuwenden²⁾. Dies kann nur in dem Ausmaß geschehen, in dem die Konstrukte eines Modellierungskonzepts in formaler Weise ausgedrückt sind. Alle drei beurteilten Netzklassen liegen in vollständig formalisierter Form vor³⁾. Daher ist ihre automatengestützte⁴⁾ Implementierung grundsätzlich⁵⁾ möglich⁶⁾. Infolgedessen überrascht es nicht, daß die Implementierbarkeit des Petrinetz-Konzepts mehrfach positiv beurteilt wird⁷⁾. Dieses generelle Eignungsurteil gilt es anhand der drei Netzklassen zu überprüfen, die in der hier vorgelegten Ausarbeitung besonders hervorgehoben wurden. Zu diesem Zweck werden vier Abstufungen⁸⁾ der Implementierungsnähe eines Modellierungskonzepts unterschieden⁹⁾. Beginnend mit dem höchsten Ausmaß, in dem das Kriterium der Implementierbarkeit erfüllt wird, werden als Stufen der Implementierungsnähe berücksichtigt:

- ❑ Es steht mindestens ein Softwarepaket zur Verfügung, mit dessen Hilfe Netzmodelle unmittelbar auf einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem konstruiert¹⁰⁾ und ausgewertet werden können (Implementierbarkeit 1. Stufe).
- ❑ Netzmodelle müssen zwar ohne Softwareunterstützung konstruiert werden. Aber ein fertig vorliegendes Netzmodell läßt sich mit der Hilfe eines Automatischen Informationsverarbeitungssystems in eine automateninterne Netzrepräsentation überführen. Anschließend ist es möglich, das implementierte Netzmodell automatengestützt auszuwerten (Implementierbarkeit 2. Stufe)¹¹⁾.
- ❑ Netzmodelle müssen ohne Softwareunterstützung konstruiert werden. Ein fertig vorliegendes Netzmodell läßt sich auch noch nicht automatisch in eine automateninterne Netzrepräsentation übersetzen. Daher ist auch noch keine automatengestützte Modellauswertung möglich. Aber immerhin ist eine systematische Vorgehensweise bekannt, mit der ein Netzmodell in eine automateninterne Netzrepräsentation transformiert werden kann (Implementierbarkeit 3. Stufe)¹²⁾. Die Vorgehensweise läßt sich prinzipiell benutzen, um *später* eine automatische Überführung eines Netzmodells in eine automateninterne Netzrepräsentation zu implementieren. Erst danach kommt eine automatengestützte Modellauswertung in Betracht.
- ❑ Netzmodelle müssen ohne Softwareunterstützung konstruiert werden. Ein fertig vorliegendes Netzmodell läßt sich noch nicht automatisch in eine automateninterne Netzrepräsentation übersetzen. Eine systematische Vorgehensweise, mit der ein Netzmodell in eine automateninterne Netzrepräsentation transformiert werden kann, läßt sich zwar prinzipiell vorstellen. Sie ist aber noch nicht konkret vorgelegt worden (Implementierbarkeit 4. Stufe).

Nur Stelle/Transition-Netze erfüllen die Implementierbarkeit 1. Stufe. Für sie wird eine Vielzahl von Softwarepaketen angeboten, die sowohl die automatengestützte Konstruktion als auch die automatische Auswertung von Netzmodellen gestalten¹³⁾. Die Implementierbarkeit 2. Stufe wird von einigen Ansätzen, die sich mit Stelle/Transition-Netzen befassen, ebenso abgedeckt. Sie interessieren hier aber nicht näher, weil die Implementierbarkeit 1. Stufe - sofern sie erfüllt ist - wegen ihrer größten Implementierungsnähe vollkommen ausreicht.

Synthetische Kernnetze erreichen dagegen nur die Implementierbarkeit 3. Stufe. Immerhin konnte für sie gezeigt werden, wie sie sich auf die Konstrukte des Softwarepakets PASIPP systematisch zurückführen lassen. Dieses Softwarepaket ermöglicht seinerseits die automatische Auswertung von Netzmodellen, die in der PASIPP-spezifischen Weise konstruiert worden sind. Daher besitzen Synthetische Kernnetze noch eine mittlere Implementierungsnähe. Auf Erweiterte Synthetische Netze trifft dies aber nicht mehr zu. Zwar läßt sich deren Implementierung und Auswertung auf Automatischen Informationsverarbeitungssystemen durchaus vorstellen. Aber in

dieser Arbeit wurde darauf verzichtet, in systematischer Weise darzulegen, wie die Erweiterungen des Kernkonzepts Synthetischer Netze implementiert werden können¹⁴). Deshalb kommt den Erweiterten Synthetischen Netzen nur die niedrigste Implementierbarkeit 4. Stufe zu.

Einen besonderen Aspekt der Implementierbarkeit eines Modellierungskonzepts stellt seine interaktive Nutzungsmöglichkeit¹⁵) dar. Bei dieser Automatisierungsvariante wird von vornherein darauf verzichtet, eine vollständige Konzeptimplementierung anzustreben. Statt dessen wird versucht, die Konzeptanwendung in automatengestützte Applikationsbereiche einerseits und automatenfreie Anwendungssegmente andererseits aufzuteilen. Dabei steht die Vorstellung im Hintergrund, zahlreiche "interessante" Realprobleme erwiesen sich als schlechtstrukturiert. Dazu gehören auch die hier behandelten Koordinierungsprobleme in komplexen Produktionssystemen. Es wird überwiegend die Überzeugung geteilt, solche schlechtstrukturierten Probleme erlaubten keine vollautomatische Bearbeitung¹⁶). Vielmehr sei es erforderlich, zu ihrer Lösung spezifisch menschliche Stärken mit den speziellen Vorteilen Automatischer Informationsverarbeitung zu kombinieren¹⁷). Die Überlegenheit menschlicher Kognitionsleistungen wird insbesondere¹⁸) bei kreativen Aufgaben gesehen¹⁹). Die kreativen Leistungen können sich sowohl auf Beiträge zur Modellkonstruktion als auch auf Vorschläge für potentielle Modellösungen erstrecken. Hinzu kommen Vorzüge beim "ganzheitlichen", "holistischen", "assoziativen" oder "intuitiven" Erfassen globaler Modelleigenschaften²⁰). Ebenso wird die Beurteilung "qualitativer" Problemaspekte als Domäne menschlicher Urteilskraft erachtet²¹). Automatische Informationsverarbeitungssysteme gelten dagegen als vorzuziehenswert, wenn bei der Modellauswertung große Informationsmengen bearbeitet werden müssen²²). Dazu tragen sowohl die hohe Speicherfähigkeit als auch die große Verarbeitungsgeschwindigkeit²³) von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen bei. Darüber hinaus erweist sich die hohe Präzision von Modellauswertungen als vorteilhaft²⁴). Sie läßt sich sowohl durch numerische als auch durch symbolische Verarbeitungsalgorithmen erzielen. Die präzise Verarbeitung großer Informationsmengen bietet sich vor allem für zwei Teilaufgaben der Modellauswertung an: für das systematische Generieren potentieller Modellösungen und für die zielsystembezogene Lösungsbeurteilung.

Der Verf. hat an anderer Stelle dargelegt, daß er die konventionelle Aufgabenteilung zwischen Menschen und Automaten in der Art, wie sie zuvor skizziert wurde, nicht generell teilt²⁵). Dennoch genießt diese Aufgabenzuweisung so breite Akzeptanz, daß sie hier als empirisches Faktum hingenommen wird. Unter dieser Voraussetzung gilt es zu beurteilen, ob ein Modellierungskonzept Ansatzpunkte erkennen läßt, die interaktive Konzeptanwendungen unterstützen. Wenn diese Fragestellung an Netzmodelle herangetragen wird, weisen die drei Klassen der Stelle/Transition-Netze, der Synthetischen Kernnetze und der Erweiterten Synthetischen Netze kaum²⁶) nennenswerte Unterschiede auf. Daher wird das Subkriterium der Interaktivität im folgenden auf das Petrinetz-Konzept im allgemeinen bezogen.

Petrinetze unterstützen interaktive Modellkonstruktionen und -auswertungen in ausgezeichneter Weise²⁷). Denn sie besitzen in der graphischen Repräsentation von Netzmodellen eine Schnittstelle, die zwischen menschlicher und automatischer Informationsverarbeitung vorzüglich vermittelt²⁸). Die Vermittlungsleistung der graphischen Schnittstelle²⁹) beruht auf der wechselseitigen Verknüpfung zweier unterschiedlicher Modellierungsaspekte³⁰):

- Einerseits liefert die Visualisierung einer graphischen Netzrepräsentation eine *anschauliche* Modelldarstellung. Ihre hohe kognitive Adäquanz wurde schon mehrfach gewürdigt. Insbesondere wird der graphischen Informationsrepräsentation der Vorzug zugeschrieben, sie rege die menschliche Informationsverarbeitung zum ganzheitlich-assoziativen Erfassen "wesentlicher" Problemmerkmale, zum Erkennen von relevanten Informationsmustern an³¹). Daher bieten sich visualisierte graphische Netzmodelle als Grundlage an, auf der sich die oben erwähnten Stärken menschlicher Informationsverarbeitung voll entfalten können³²).

- Andererseits handelt es sich bei der graphischen Netzrepräsentation zugleich um ein wohl-definiertes mathematisches Konstrukt³³). Es gestattet nicht nur die Anwendung des allgemeinen graphentheoretischen Instrumentariums. Vielmehr repräsentiert ein mathematischer Graph lediglich das zugrundeliegende, vollständig *formalisierte* Netzmodell. Auf die Konstruktion und Auswertung dieses Netzmodells lassen sich alle formalen Konstruktions- und Auswertungskonzepte anwenden, die das Petrinetz-Konzept anbietet. Ein breiter Ausschnitt daraus wurde in dieser Arbeit vorgestellt. Aufgrund ihres formalen Charakters ist es grundsätzlich möglich, diese Konzepte auf Automatischen Informationsverarbeitungssystemen zu implementieren³⁴).

Daher ermöglicht das Petrinetz-Konzept ein fruchtbares Zusammenwirken zwischen menschlichen Kognitionsleistungen und automatischen Verarbeitungsleistungen³⁵). Erstgenannte beruhen auf der Anschaulichkeit von graphisch visualisierten Netzmodellen. Letztgenannte stützen sich auf die weitreichende Formalisierung³⁶) von Konstruktion und Auswertung derselben Netzmodelle. Aufgrund dieses Wechselwirkungspotentials liegt es nahe, dem Petrinetz-Konzept eine bemerkenswerte Qualität für interaktive Modellierungen zuzuerkennen³⁷). Dies wird durch eine größere Anzahl von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen unterstrichen, die derzeit schon angeboten werden: Es handelt sich um "Entwicklungsumgebungen" mit graphischer Benutzerschnittstelle, die speziell für die interaktive Gestaltung von Netzmodellen ausgelegt sind³⁸).

Ein Beispiel für die interaktive Anwendung von Netzmodellen wurde auch in dieser Arbeit skizziert. Es betraf die Exploration des Modellverhaltens durch interaktive Konstruktion und Auswertung seines Erreichbarkeitsgraphen. Dabei wurde die Automatische Informationsverarbeitung genutzt, um aktivierte Transitionen zu ermitteln, deren Schaltakte für das Fortsetzen von Schaltprozessen in Betracht kommen. Diese aktivierten Transitionen wurden einem Modellbenutzer anhand einer visualisierten Netzgraphik präsentiert. Der Benutzer konnte durch intuitives Erfassen des "holistischen" Netzzusammenhangs und Kreativität versuchen, jene Transitionen zu einem Schaltschritt zu aggregieren, die er für die Prozeßfortsetzung als besonders geeignet ansah. Bei seinen Auswahlentscheidungen wurde er seitens der Automatischen Informationsverarbeitung abermals unterstützt. Einerseits ließen sich Heurismen implementieren, um Vorschläge für die Zusammenstellungen von Schaltschritten zu generieren. Andererseits konnte die Zulässigkeit von Schaltschritten, die der Modellbenutzer zusammengestellt hatte, automatisch überprüft werden. Dadurch ließen sich Schaltkonflikte zwischen aktivierten Transitionen erkennen, die der Modellbenutzer unter Umständen übersehen hatte.

Ein Randaspekt der Interaktivität trägt zur Kommunikabilität des Petrinetz-Konzepts bei. Die Kommunikation über Netzmodelle läßt sich durch ihre interaktive Konstruktion und Auswertung unterstützen, indem die zugrundeliegende Software zu einer "Groupware"³⁹) ausgebaut wird. Dabei greifen mehrere modellkonstruierende und -auswertende Mitarbeiter auf ein Automatisches Informationsverarbeitungssystem⁴⁰) als Interaktionsmedium zu. Von diesem Interaktionsmedium wird ein gemeinsam bearbeitetes Netzmodell verwaltet. Diese automatengestützte Modellverwaltung erlaubt es, ein Netzmodell sowohl zeitüberbrückend zu speichern als auch raumüberbrückend zu übertragen. Auf diese Weise kann die Kommunikation zwischen Mitarbeitern erleichtert werden, die an der Modellkonstruktion und -auswertung zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder an verschiedenen Orten teilnehmen⁴¹).

Darüber hinaus stiftet die Dialogsprache, die der interaktiven Nutzung eines Automatischen Informationsverarbeitungssystems zugrundeliegt, einen einheitlichen Kommunikationsstandard⁴²). Dadurch lassen sich kommunikationsbehindernde Mißverständnisse zwischen Mitarbeitern abbauen⁴³). Dies erweist sich insbesondere dann als vorteilhaft, wenn die Mitarbeiter von unterschiedlichem terminologischen oder auch formalen Hintergrundwissen geprägt sind. Schließlich bietet die interaktive Nutzungsform auch den Vorzug einer schritthaltenden Dokumentation von Modellierungsprozessen⁴⁴). Zu diesem Zweck kann das eingesetzte Informationsverarbeitungssystem alle Modellveränderungen automatisch protokollieren. Ebenso lassen sich

vom Systembenutzer die aktuell erreichten Modellzustände jederzeit festhalten und auf externe Informationsspeicher auslagern. So wird der Modellierungsträger von aufwendigen, zumeist als lästig empfundenen Dokumentationspflichten befreit.

Allerdings bedarf die positive Beurteilung der Interaktivität des Petrinetz-Konzepts einer deutlichen Einschränkung. Sie beruht auf der geringen Auswertungseffizienz von Petrinetzen, die schon an früherer Stelle ausführlicher dargelegt wurde. Die Effizienzmängel laufen der allgemeinen Erfahrung zuwider, daß interaktive Nutzungskonzepte für Automatische Informationsverarbeitungssysteme nur dann akzeptiert werden, wenn geringe Rückantwortzeiten eingehalten werden können⁴⁵). Die Zeitspannen, die zwischen einer Anfrage an einen Automaten und seiner "Rückantwort" gemeinhin noch toleriert werden, liegen etwa im Bereich von einer Sekunde bis hin zu einigen wenigen Sekunden⁴⁶). Innerhalb solcher knappen Zeiträume können angesichts der Effizienzmängel aller drei Netzklassen nur eng begrenzte Teilaufgaben automatisch erfüllt werden⁴⁷). Dazu gehören im wesentlichen zwei Aspekte:

- ❑ das Identifizieren eines aktivierten Schaltschritts und
- ❑ die Ermittlung der Schaltwirkung, wenn ein aktivierter Schaltschritt tatsächlich ausgeführt wird.

Mit diesem bescheidenen Repertoire an Automatenunterstützung läßt sich nur eine Form der interaktiven Modellauswertung verwirklichen: die projektive Simulationsanalyse. Sie wurde schon im voranstehenden Kapitel als einzige effiziente Auswertungsvariante für Netzmodelle herausgestellt. Die projektive Simulationsanalyse erlaubt nur die interaktive Bearbeitung von relativ einfachen Aufgabenstellungen. Dazu gehört vor allem die Simulation der Folgewirkungen von hypothetischen Koordinierungsentscheidungen. Dennoch können solche Simulationen für die Koordinierung von Produktionsprozessen in der betrieblichen Praxis durchaus von Interesse sein. Sie lassen sich z.B. für die Gestaltung interaktiver Produktionsleitstände benutzen, um "What if"-Fragen der Leitstandmitarbeiter anhand von graphisch visualisierten Entscheidungskonsequenzen anschaulich zu beantworten.

Anspruchsvollere Auswertungsaufgaben lassen sich dagegen aufgrund der geringen Auswertungseffizienz des Petrinetz-Konzepts nicht auf interaktive Weise bearbeiten. Beispielsweise ist nicht daran zu denken, daß ein Automatenbenutzer Auskunft über eine produktionswirtschaftlich interessante Netzeigenschaft begehrt und innerhalb der o.a. Rückantwortzeiten eine entsprechende Auskunft erhält. Für interaktive Modellauswertungen dieser Art werden auch jene informationstechnischen Fortschritte, die zu einer Beschleunigung der automatengestützten Auswertung von Netzmodellen beitragen können, auf absehbare Zeit nicht ausreichen.

Die deutlichen Einschränkungen, die für interaktive Nutzungen des Petrinetz-Konzepts aufgezeigt wurden, erstrecken sich nur auf die *Auswertung* von Netzmodellen⁴⁸). Die *Konstruktion* von Netzmodellen wurde dagegen bislang noch nicht angesprochen. Sie bietet sogar ein vielversprechendes Anwendungsgebiet für die interaktive Konzeptnutzung. Dabei spielen Netzeditoren⁴⁹) eine herausragende Rolle. Es handelt sich um Softwarepakete, die in Verbindung mit hochauflösenden Graphikbildschirmen eingesetzt werden (sollen⁵⁰). Sie erleichtern die interaktive Konstruktion von graphisch repräsentierten Netzmodellen⁵¹). Für den erstmals erfolgenden Modellentwurf bieten sie bereits genormte graphische Symbole an, mit denen sich Netzknoten und Netzkanten visuell darstellen lassen. Weitere Hilfeleistungen erstrecken sich z.B. auf Raster- und Fangoptionen für die Positionierung von Netzkomponenten. Ebenso wird die Beschriftung von Netzkomponenten unterstützt⁵²). Hinzu kommen die vielfachen Komfortfunktionen, die heute im Rahmen graphischer Informationsverarbeitung zum Stand der Kunst gehören⁵³). Ihr volles Leistungspotential entfalten Netzeditoren aber erst beim Überarbeiten von graphisch repräsentierten Netzmodellen. Dann gestatten sie am Bildschirm ein wesentlich einfacheres Modifizieren einzelner Modellkomponenten, als es ohne Automatenunterstützung möglich wäre⁵⁴). Auch die Rückantwortzeiten der Netzeditoren liegen bei der graphischen Konstruktion von Netzmodellen weit unterhalb der oben erwähnten Akzeptanzschwelle.

Die vorgenannten Aspekte tragen insgesamt dazu bei, daß Netzeditoren ein hohes Ausmaß an Benutzerfreundlichkeit bei der graphischen Konstruktion von Netzmodellen verwirklichen⁵⁵). Daher unterstützen Netzeditoren das interaktive, automatengestützte Konstruieren von Netzmodellen in bemerkenswerter Weise⁵⁶). Zugleich läßt ihre interaktive Nutzung genügend Freiraum, um die menschlichen Stärken bei der intuitiven Gestaltung von "ästhetisch ansprechenden" Netzgraphiken wirksam werden zu lassen⁵⁷).

Allerdings offenbaren die Netzeditoren auch einen gravierenden Mangel, der den meisten derzeit angebotenen Implementierungen des Petrinetz-Konzepts anhaftet. Er erstreckt sich auf eine deutliche Separation der Softwarepakete in einerseits konstruktions- und andererseits in auswertungsorientierte Implementierungen⁵⁸). Die erste Softwareklasse bilden die Netzeditoren. Die Stärken der zweiten Softwareklasse liegen dagegen in der Implementierung derjenigen Auswertungskonzepte, die in dieser Arbeit für Netzmodelle vorgestellt wurden. Die Konzeptimplementierungen der zweiten Art werden daher als Netzanalytoren⁵⁹) angesprochen⁶⁰). Leider fehlt es jedoch weitgehend an überzeugenden Kombinationen zwischen den Konstruktionsleistungen von Netzeditoren und den Auswertungsleistungen der Netzanalytoren⁶¹). Die seltenen Ausnahmen kommen aufgrund ihrer exorbitant hohen Anschaffungs- und Implementierungskosten für die meisten potentiellen Anwender des Petrinetz-Konzepts nicht in Betracht⁶²). Sie werden daher in die folgenden Betrachtungen nicht einbezogen.

Die verbleibenden Softwarepakete besitzen keine wohldefinierten Schnittstellen oder Konvertierungshilfen, mit deren Hilfe sich Netzmodelle zwischen Netzeditoren und -analytoren ohne größere Schwierigkeiten austauschen lassen⁶³). Statt dessen zeichnen sich die Implementierungen des Petrinetz-Konzepts durch weitreichende Inkompatibilität aus⁶⁴). Daher besteht der Mißstand, daß zwar ästhetisch ansprechende graphische Netzrepräsentationen editiert werden können. Das Softwareangebot für das automatengestützte Auswerten der graphisch editierten Netzmodelle bleibt jedoch äußerst dürftig. Umgekehrt liegen leistungsfähige Netzanalytoren vor. Die Ein- und Ausgabe ihrer Netzmodelle bleibt aber zumeist auf unanschauliche, formal-sprachliche Netzspezifikationen beschränkt. In bescheidenem Ausmaß wird zwar auch von einigen Netzanalytoren die Konstruktion graphisch repräsentierter Netzmodelle unterstützt. Aber ihre Editierfähigkeiten reichen in der Regel nicht an die graphischen Gestaltungsfähigkeiten von anspruchsvolleren Netzeditoren heran. Deshalb bedarf es in Zukunft verstärkter Anstrengungen, um Netzeditoren und -analytoren in integrierten Softwarepaketen zusammenzuführen⁶⁵).

Alle bisher angesprochenen Implementierungen des Petrinetz-Konzepts beruhen auf der Voraussetzung, daß jeweils nur eine Netzklasse in die automatengestützte Konstruktion oder Auswertung von Netzmodellen einbezogen wird⁶⁶). Aus der Perspektive eines Anwenders des Petrinetz-Konzepts wäre es jedoch durchaus zu begrüßen, wenn Softwarepakete zur Verfügung stünden, von denen mehrere Netzklassen zugleich berücksichtigt werden. Dann böte sich dem Konzeptanwender die Gelegenheit, innerhalb desselben Softwarepakets diejenige Netzklasse auszuwählen, die seinen aktuellen Modellierungsbedürfnissen am besten entspricht. Ein kostenintensiver Wechsel zwischen alternativen Softwarepaketen wäre dann nicht erforderlich. Eine derart weitreichend integrierte Implementierung des Petrinetz-Konzepts liegt jedoch noch nicht vor⁶⁷).

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. zur Forderung nach Implementierbarkeit - oder auch: Automatisierbarkeit - LITTLE, J. (1970), S. B-470; BUSCH, R. (1977), S. 10; DEVY (1979), S. 43; PRESSMAR (1982), S. 330f. u. 342; HACKMANN (1982), S. 24; PAGNONI (1990), S. 33f. u. 164. Mitunter wird auch die Forderung nach Realisierbarkeit vertreten; vgl. RAUBOLD (1972), S. 211; ULLRICH (1976), S. 0.2 u. 0.6. Sie kann auf zweifache Weise interpretiert werden. Entweder wird implizit unterstellt, daß die Koordinierungsmodelle, die mit der Hilfe eines Modellierungskonzepts konstruiert werden, auf Automatischen Informationsverarbeitungssystemen vorgehalten und ausgewertet werden sollen (Realisierbarkeit i.e.S.). Dann fällt die Realisierbarkeit mit der Implementierbarkeit zusammen. Oder es wird die abstraktere Ansicht vertreten, daß ein Modellierungskonzept aufzeigen müsse, wie sich seine konzeptionellen Konstrukte in die Erfüllung von realen Modellierungsaufgaben umsetzen lassen (Realisierbarkeit i.w.S.). Dabei wird die Art und Weise der Konstruktumsetzung keinen weiteren Einschränkungen unterworfen. Insbesondere muß es sich nicht um die Implementierung auf einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem handeln. In dieser Arbeit wird aus zwei Gründen nur die Realisierbarkeit i.e.S. beachtet. Erstens wurde schon oben dargelegt, daß Netzmodelle ohnehin einer Implementierung auf Automatischen Informationsverarbeitungssystemen bedürfen, um für die hier interessierende Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen in Betracht zu kommen. Zweitens erweist sich ein Modellierungskonzept, das die Realisierbarkeit i.e.S. erfüllt, notwendig auch immer als realisierbar i.w.S. Das folgt unmittelbar aus den Charakterisierungen der beiden Realisierbarkeitsforderungen. Da hier nur die Realisierbarkeit i.e.S. interessiert und diese mit der Implementierbarkeit übereinstimmt, wird die Realisierbarkeit eines Modellierungskonzepts nicht als ein eigenständiges Beurteilungskriterium behandelt.

2) Die Implementierbarkeit wird gegenüber den beiden voranstehenden Kriterien der Benutzerfreundlichkeit und der Effizienz aus zwei Gründen als eigenständiges Beurteilungskriterium behandelt. Erstens kann die Implementierbarkeit eines Modellierungskonzepts sowohl dessen Benutzerfreundlichkeit als auch dessen Anwendungseffizienz unterstützen. Daher läßt sich die Implementierbarkeit keinem der beiden letztgenannten Kriterien als Subkriterium eindeutig unterordnen. Dies spricht zugunsten einer kriteriellen Eigenständigkeit. Zweitens hat sich bereits gezeigt, daß das Petrinetz-Konzept unter erheblichen Problemen hinsichtlich Benutzerfreundlichkeit und Effizienz leidet, sobald die beiden Netzklassen mit großer Modellierungsfähigkeit - die Synthetischen Kernnetze und die Erweiterten Synthetischen Netze - betrachtet werden. Ein Modellierungskonzept wird hier aber erst dann als "interessant" eingestuft, wenn es sich sowohl durch eine hohe Modellierungsfähigkeit als auch durch eine große Modellierungsgüte auszeichnet. Eine Aussicht, diesem Anspruch zu genügen, besteht jedoch nur dann, wenn sich die Benutzerunfreundlichkeit und die Effizienzschwächen der beiden vorgenannten Netzklassen durch Unterstützungsleistungen der Automatischen Informationsverarbeitung kompensieren lassen. Notwendige - aber keineswegs hinreichende - Voraussetzung dafür ist die Implementierbarkeit der Netzklassen. Auch aus diesem Blickwinkel der "Konzeptinteressanz" wird dem Beurteilungskriterium der Implementierbarkeit besondere Aufmerksamkeit zuteil. In ähnlicher Weise argumentieren auch NELSON, R.A. (1982), S. 53f., und MONTEL (1983a), S. 293. Sie halten eine Implementierung des Petrinetz-Konzepts auf Automatischen Informationsverarbeitungssystemen ebenso für notwendig, um es zu einem praktisch anwendbaren Modellierungskonzept heranreifen zu lassen. In diese Richtung weist auch die allgemeine Einschätzung von PRESSMAR (1982), S. 331: "Gerade der theoretische anspruchsvolle Ansatz mit komplexen mathematischen Verfahren kann nur mit Hilfe der EDV dem Benutzer bei seiner Tätigkeit zugänglich gemacht werden. Unter diesem Aspekt kommt dem Problem besondere Bedeutung zu, mathematisch schwierige Planungsverfahren durch eine möglichst einfache Handhabung dem Anwender zu erschließen."

3) Darauf wird an späterer Stelle näher eingegangen. Im folgenden wird die Formalisierung des Petrinetz-Konzepts als bekannt vorausgesetzt.

4) Die *automatengestützte* Konzeptimplementierung bedeutet nur, daß ein Modellierungskonzept auf einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem zugänglich gemacht wird. Sie sagt aber nichts über das Ausmaß aus, in dem Modellierungsprobleme automatisch bewältigt werden. Statt dessen ist sowohl eine voll- als auch eine teilautomatische Problembewältigung möglich. Darüber hinaus kommt sogar auch in Betracht, daß sich mitunter überhaupt keine automatische Problembewältigung garantieren läßt. Letztes ist für alle Auswertungsprobleme der Fall, die entweder unmittelbar unentscheidbare Entscheidungsprobleme darstellen oder aber mittelbar auf unentscheidbare Entscheidungsprobleme zurückgeführt werden können. Das Ziel einer vollautomatischen Problembewältigung wird z.B. derzeit von den meisten Implementierungen der Invariantenanalyse von Prädikat/Transition-Netzen noch nicht erreicht. Dort sind zumeist Analysebeiträge der Automatenbenutzer erforderlich, um die Netzinvarianten endgültig festzulegen. Es wird darauf verzichtet, darauf näher einzugehen. Denn weder Prädikat/Transition-Netze noch Invariantenanalysen gehören zu den Interessenschwerpunkten dieser Arbeit. Auf eine andere Variante der teilautomatischen Erfüllung von Modellierungsaufgaben wird an anderer Stelle näher eingegangen. Es handelt sich um den Aspekt der Interaktivität.

5) Die grundsätzliche Implementierbarkeit eines Modellierungskonzepts unterliegt einem wesentlichen Vorbehalt: Mit ihr ist kein Urteil über die tatsächliche Konzeptimplementierung verknüpft. Um diese Lücke zu schließen, werden in Kürze Grade der Implementierungsnähe unterschieden.

6) Die Implementierung eines Modellierungskonzepts läßt sich auf jeder Ebene eines Automatischen Informationsverarbeitungssystems betrachten. In dieser Arbeit werden die Implementierungsmöglichkeiten des Petrinetz-Konzepts aber ausschließlich auf der Software-Ebene thematisiert. Denn nur auf dieser Systemebene besteht die Aussicht, die anspruchsvollen Koordinierungsmodelle für komplexe Produktionssysteme implementieren zu können.

Für *andere* Modellierungsbereiche sind aber auch schon alternative Systemebenen herangezogen worden, um Netzmodelle zu implementieren. Dazu gehört vor allem die Ebene der Mikroprogrammierung. Dort werden Netze in programmierbaren logischen Schaltkreisen (programmable logic arrays) implementiert. Vgl. die Beiträge von REDDI (1978), S. 79ff.; HURA (1981a), S. 245ff.; HURA (1982c), S. 437; KOTOV (1983a), S. 1. Die Netzmodelle, die in den vorgenannten Quellen behandelt werden, bleiben jedoch auf die Klasse der Stelle/Transition-Netze beschränkt. Darüber hinaus müssen die Stelle/Transition-Netze sogar 1-beschränkt (sicher) sein und dürfen keine 1-Schleifen enthalten. Denn nur solche Stelle/Transition-Netze weisen zwei charakteristische Eigenschaften auf, die eine Implementierung der Netze als Mikroprogramme von logischen Schaltkreisen nahelegen. Erstens entsprechen die Inzidenzmatrizen dieser Stelle/Transition-Netze den Verschaltungsmatrizen von logischen Schaltkreisen. Zweitens können die Schaltakte von Transitionen, die unstrukturierte Kopien der Basismarke durch ein Netz fließen lassen, unmittelbar mit dem Auslösen oder Fortleiten von Spannungsimpulsen in logischen Schaltkreisen identifiziert werden. Wegen seiner Einschränkung auf eine Unterklasse der Stelle/Transition-Netze läßt sich der mikroprogrammgestützte Implementierungsansatz aber nur für relativ einfach strukturierte Realprobleme benutzen. Beispielsweise kommt die Steuerung von einfachen Automaten in Betracht (Näheres dazu in den o.a. Quellen). Die Komplexität der Prozeßkoordinierung in flexiblen Fertigungssystemen wird jedoch bei weitem nicht erreicht. Daher wird auf die Implementierung von Netzmodellen durch Mikroprogramme von logischen Schaltkreisen nicht weiter eingegangen.

7) Vgl. zur Würdigung der guten Implementierbarkeit - oder Automatisierbarkeit - des Petrinetz-Konzepts RAUBOLD (1972), S. 212 (noch verhalten formuliert); LAUTENBACH (1974a), S. 187; PATIL (1975b), S. 20 u. 24; RAMÖLLER (1976), S. 16ff.; TOURRES (1976), S. 217; DADDA (1976c), S. 64; KWAN (1977a), S. 608; MEKLY (1980), S. 422; PERL (1980), S. 11.1; BRETSCHNEIDER (1980a), S. 34; NELSON, R.A. (1982), S. 53; VALETTE (1983), S. 264; O.V. (1983c), S. 4; KIEBLER (o.J.), S. 40; vgl. ebenso die Erläuterung zur Implementierung von Netzmodellen mit der Hilfe von Simulationssprachen.

Allerdings existieren auch kritische Stimmen, die auf eine Implementierungslücke verweisen. Sie klaffe zwischen den Implementierungsangeboten, die sich vornehmlich auf forschungsorientierte Software-Prototypen erstrecken, und dem Implementierungsbedarf für die automatengestützte Modellierung anspruchsvoller Realprobleme. Das Angebot werde dem Softwarebedarf weder hinsichtlich der erwarteten Funktionalität noch bezüglich der gewünschten Effizienz gerecht. Vgl. zu Klagen über solche Implementierungsschwächen NELSON, R.A. (1982), S. 5 u. 53f.; OJALA (1983), S. 25f. In O.V. (1983a), S. 3, wird moniert, es fehlten Hilfsmittel, die numerische Auswertungen von größeren Netzmodellen gestatten. Daher kämen Netzmodelle für industrielle Modellierungsbedürfnisse kaum in Betracht. Damit stimmt die Vorhaltung von NELSON, R.A. (1982), S. 5, überein, das Petrinetz-Konzept habe wegen seiner mangelhaften Implementierung bislang keine Bedeutung als praktisches Modellierungsinstrument erlangt. Es bestehe lediglich ein "akademisches" Interesse an Petrinetzen.

Die nachfolgenden Ausführungen werden zeigen, daß die zuvor angedeutete Kritik an Implementierungen des Petrinetz-Konzepts in ihrem Kern durchaus zutrifft. Jedoch muß ebenso beachtet werden, daß das Softwareangebot für die Konstruktion und Auswertung von Netzmodellen im letzten Jahrzehnt deutlich angewachsen ist. Dies hat dazu beigetragen, die Implementierungslücke, die zu Beginn der achtziger Jahre weit offenstand, beträchtlich zu reduzieren.

8) Darüber hinaus ist es möglich, die Implementierungsnähe eines Modellierungskonzepts durch die Kapazitätsanforderungen zu qualifizieren, die es an ein Automatisches Informationsverarbeitungssystem stellt. Denn die Kapazitätsbeschränkungen von real vorhandenen Automatischen Informationsverarbeitungssystemen können dazu führen, daß sich Modellierungskonzepte mit hohen Kapazitätsanforderungen in zahlreichen betrieblichen Umgebungen praktisch nicht mehr implementieren lassen, obgleich ihre Implementierung theoretisch möglich ist. Diese praktische Implementierungsnähe hängt jedoch in starkem Ausmaß von zwei Faktoren ab, die sich nicht zur allgemeinen Beurteilung eines Modellierungskonzepts eignen. Erstens handelt es sich um die individuelle Ausstattung eines potentiellen Konzeptanwenders mit Automatischen Informationsverarbeitungssystemen. Sie kann sowohl von Anwender zu Anwender als auch im Zeitablauf beliebig variieren. Zweitens werden die Kapazitätsanforderungen eines Modellierungskonzepts auch wesentlich von den informationstechnischen "Tricks" seiner Implementierung beeinflusst. Dies berührt aber Fragen, deren Beantwortung nicht mehr das zu beurteilende Modellierungskonzept selbst betrifft. Aus beiden vorgenannten Gründen wird auf die praktische Implementierungsnähe des Petrinetz-Konzepts nicht näher eingegangen.

9) Das Stufenschema ist speziell darauf zugeschnitten, die drei betrachteten Netzklassen hinsichtlich ihrer Implementierbarkeit zu differenzieren. Es handelt sich daher um eine zweckspezifische, keineswegs generell verwendbare Abstufung. Für ein unspezifisches Stufenschema bietet es sich dagegen beispielsweise an, Grade unterschiedlicher Implementierungsnähe in der gleichen Weise zweimal festzulegen: einerseits für die Konstruktion und andererseits für die Auswertung von Modellen.

10) Das automatengestützte Konstruieren von (Netz-)Modellen wird zumeist als Editieren bezeichnet. Darauf wird an anderer Stelle anhand von Netzeditoren näher eingegangen.

11) Diese Implementierungsstufe wird des öfteren als automatische Implementierbarkeit von (Netz-)Modellen thematisiert; vgl. RAUBOLD (1972), S. 211; BOUSSIN (1978), S. 1528.

12) In diese Richtung weist ein Vorschlag von GENRICH (1983a). Er regt an, die Anschriften von Knoten und Kanten eines Netzmodells zu benutzen, um zu beschreiben, auf welche Weise diese Netzkomponenten implementiert werden können. Diese Komponentenanschriften können von vornherein in einer Implementierungssprache verfaßt sein. Dieser Ansatz wurde auch in dieser Arbeit verwendet, um die Schaltvorschriften der Transitionen von Synthetischen Kernnetzen zu spezifizieren. Denn die Schaltspezifikationen durch zugeordnete Transaktionen erfolgten von vornherein in der Programmiersprache PROLOG. Diese PROLOG-Transaktionen können im Prinzip unmittelbar auf einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem implementiert werden.

13) Vgl. z.B. FREEDMAN (1988b), S. 330f. u. 340ff. (zwar wird das Softwarepaket SAGE zunächst auf Zeitnetze bezogen [S. 340]; doch zeigt sich später [S. 340f.], daß tatsächlich nur Bedingungs/Ereignis-Netze - eine Teilklasse der Stelle/Transition-Netze - bearbeitet werden).

14) Dieser Verzicht wurde an früherer Stelle erläutert. Es erfolgten lediglich vereinzelte Implementierungshinweise. Sie reichen aber nicht aus, um für die Implementierung von Erweiterten Synthetischen Netzen eine systematische Vorgehensweise aufzuzeigen.

15) Die interaktive Nutzung von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen wird des öfteren als ein willkommener Beitrag zur Konstruktion oder Auswertung von Modellen gewürdigt. Dabei wird mitunter auch die Systemnutzung im Dialogbetrieb herausgestellt. Vgl. zur Präferenz für interaktive und dialogfähige Nutzungsformen bei automatengestützten Modellierungen HORMANN, A. (1972), S. 90ff. u. 114ff.; HENRION (1978), S. 182; PRESSMAR (1982), S. 331f. u. 343f.; DIRUF (1983), S. 239f. u. 242ff.; STADTLER (1983a), S. 9f., 30ff. u. 58ff. (weiter ausgeführt auf S. 72f. u. 112ff.); GRAHAM, N. (1983), S. 13 (hinsichtlich der "Modellierung" von Softwaresystemen); DIRUF (1984), S. 126; WILKINS (1984), S. 294f., 297f. u. 300f.; ZELEWSKI (1986a), S. 641f., 645f., 649ff., 737 u. 872 (allerdings mit Vorbehalten, siehe S. 1073ff.).

Vgl. auch mit speziellem Bezug auf Modelle für Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen, wie z.B. für Maschinenbelegungsplanungen oder Reihenfolgeplanungen bei Werkstattfertigung, WIEST (1973), S. 116ff.; HOCH (1973), S. 221ff., insbesondere S. 225f.; HEB-KINZER (1974), S. 25; GODIN (1978), S. 331ff.; SCHEER (1983b), S. 150ff.; SCHEER (1987a), S. 226 u. 228; SCHEER (1987b), S. 162f.; MULLER, H. (1987), S. 1660 u. 1665ff.; SCHEER (1988a), S. 210ff.; WINTER, RO. (1991), S. 6, 13, 117, 158, 164, 176, 192ff., 201, 208ff., 237ff., 276f. u. 333.

16) Vgl. ZELEWSKI (1986a), S. 645f.; vgl. auch die Erörterung der Schwierigkeiten, die bei der Lösung von schlechtstrukturierten Optimierungsproblemen drohen.

17) Den Kombinationsaspekt hebt z.B. DIRUF besonders hervor; vgl. DIRUF (1983), S. 239f.; DIRUF (1984), S. 126.

18) Vgl. zu weiteren, nachfolgend nicht herausgestellten Stärken, die der menschlichen Informationsverarbeitung vorbehalten sein sollen, HOCH (1973), S. 220 (Behandlung von Sonderfällen); MULLER, H. (1987), S. 1660 (Kreativität bei der Entwicklung neuer Koordinierungsheuristiken); MOSNER (1991), S. 143 (Kreativität bei der Verbesserung von simulierten Prozessen); RILLING (1991), S. 33 u. 45 (Behandlung von Sonderfällen).

19) Vgl. zum menschlichen Kreativitätspotential PRESSMAR (1982), S. 331 u. 339; DIRUF (1983), S. 240; DIRUF (1984), S. 126; ZELEWSKI (1986a), S. 645; WINTER, RO. (1991), S. 333.

20) Vgl. HOCH (1973), S. 224 (als "Strukturerkennung"); HEB-KINZER (1974), S. 25; DIRUF (1983), S. 244 (unmittelbares Erkennen "günstiger" Entscheidungsalternativen); ZELEWSKI (1986a), S. 872; MULLER, H. (1987), S. 1667 (rasches Erkennen von Koordinierungsfehlern); WELLER (1991), S. 20f.; WINTER, RO. (1991), S. 193.

21) Vgl. HOCH (1973), S. 220.

22) Vgl. HOCH (1973), S. 224; MULLER, H. (1987), S. 1667 (Übergang vom Ein- zum Zweikranfall).

23) Vgl. PRESSMAR (1982), S. 339.

24) Vgl. HOCH (1973), S. 224 (hinsichtlich einer "geringen Fehlerrate"); PRESSMAR (1982), S. 339.

25) Die Vorbehalte gründen sich auf die Möglichkeit, mit Expertensystemen schlechtstrukturierte Probleme zu bearbeiten. Dabei lassen sich beachtenswerte kreative und bewertende Gestaltungsleistungen vom Automaten erbringen. Dies wird bei ZELEWSKI (1986a), S. 640ff., insbesondere S. 644ff., näher ausgeführt. Allerdings wird dort keineswegs zugunsten einer vollautomatischen Problemlösung argumentiert; vgl. dazu das "Symbiose"-Argument bei ZELEWSKI (1986a), S. 872 u. 1089f. Vielmehr geht es nur um eine Verlagerung und Aufweichung der Grenzziehung zwischen "typisch" menschlichen und "vornehmlich" automateneigenen Stärken (vgl. auch ZELEWSKI (1986a), S. 1105, Fn. 1). Infolgedessen wird intelligenten Automaten ein größeres Einsatzpotential zugemessen, als es in der

oben skizzierten konventionellen Aufgabenteilung zwischen Menschen und Automaten der Fall ist. Vgl. zu weiteren Beiträgen der KI-Forschung zur automatengestützten Bewältigung schlechtstrukturierter Probleme SLEEMAN (1981), S. 882ff., insbesondere S. 884ff.; SIMON, H. (1983a), S. 23ff. Die entgegengesetzte Ansicht, Expertensysteme könnten nicht zur Bearbeitung schlechtstrukturierter Probleme beitragen, vertritt dagegen WELLER (1991), S. 19ff. Allerdings hat er die voranstehend angeführte Literatur aus der KI-Forschung auch nicht zur Kenntnis genommen.

26) Auf eine Ausnahme wird in Kürze explizit hingewiesen.

27) Vgl. ROSENSTENGEL (1991), S. 76, 90f. u. 100f.

28) Schon WIEST (1973), S. 120, hat eine graphische Schnittstelle für die interaktive Informationsverarbeitung durch Menschen *und* Automaten gefordert. Auch PRESSMAR (1982), S. 340, stellt heraus, daß graphische Benutzerschnittstellen erheblich zur Akzeptanz von interaktiv genutzten Automatischen Informationsverarbeitungssystemen beitragen.

29) Die graphische Schnittstelle besteht aus dem *mathematischen* Graphen, durch den ein Netzmodell repräsentiert wird. Zwei Bereiche stoßen an dieser Schnittstelle aufeinander: das Netzmodell einerseits und der visualisierte Graph andererseits. Das repräsentierte Netzmodell stellt ein formalsprachliches Konstrukt dar, das zunächst *nicht* als ein mathematischer Graph definiert ist. Synthetische Netze wurden z.B. als prädikatenlogisch-algebraische Konstrukte definiert. Der visualisierte Graph ist eine Präsentationsform des mathematischen Graphen, die an das visuelle Wahrnehmungsvermögen eines menschlichen Modellierungsträgers angepaßt ist.

Der Schnittstellencharakter des *mathematischen* Graphen kann noch weiter ausgebaut werden. Denn die Graphentheorie stellt ein formales Konzept dar, in das sich zahlreiche andere, ebenso formalsprachlich verfaßte Konzepte einbetten lassen. Auf zwei Beispiele wurde schon in einer früheren Anmerkung hingewiesen: die Kategorientheorie und eine darauf fußende Systemtheorie. Weitere formale Konzepte, die sich auf die Graphentheorie beziehen lassen, führt MÜLLER-SILVA (1984a), S. 41f., an. Dort wird übrigens auch das Petrinetz-Konzept als eine Option erwähnt (S. 42).

30) Vgl. dazu die ähnlichen, aber aus einer anderen Beurteilungsperspektive vorgetragenen Anmerkungen zur Integrationsqualität des Petrinetz-Konzepts.

Die Eigenart der graphischen Schnittstelle des Petrinetz-Konzepts läßt sich auch anhand der charakteristischen Dualität graphischer Repräsentationsformen verdeutlichen. Diese Dualität äußert sich darin, daß ein Graph in zwei Erscheinungsformen auftreten kann: entweder als ein mathematischer Graph oder aber als ein visualisierter Graph. Diese Unterscheidung wurde bereits anläßlich der graphischen Repräsentation Allgemeiner Netze eingeführt und erläutert. Der mathematische Graph erschließt die Sphäre der formalsprachlichen Konstruktion und Auswertung von Netzmodellen. Der visualisierte Graph öffnet dagegen den Zugang zur menschlichen Kognition. Die Dualität graphischer Repräsentationsformen betont auch MÜLLER-SILVA (1984a), S. 38 u. 47.

Des weiteren manifestiert sich die Vermittlungsleistung der graphischen Schnittstelle im Potential der Netzanschriften. Einerseits kann der visualisierte Graph eines Netzmodells mit natürlichsprachlichen Beschriftungen angereichert werden. Dies gilt insbesondere für die freizügige Beschriftung von Kanal/Instanz-Netzen. Aber auch die Netzgraphiken von Synthetischen Netzen lassen informale Anschriften in der Gestalt von "Kartuschen" zu. Andererseits erlauben mathematische Graphen die Ergänzung durch formalsprachliche Knoten- und Kantenanschriften. Dazu gehören z.B. Kantengewichte oder Schaltwerte für transitionsartige Knoten. Die natürlichsprachlichen Anschriften eines visualisierten Graphen sind auf die Betrachtung eines Netzmodells durch einen menschlichen Modellierungsträger zugeschnitten. Die formalsprachlichen Anschriften eines mathematischen Graphen dienen dagegen der formalen Präzisierung eines Netzmodells. Sie erlaubt eine Modellauswertung mit Hilfe der Automatischen Informationsverarbeitung.

31) Dieser Sachverhalt klingt - allerdings nur undeutlich - bei HWANG, S. (1984), S. 848f.; DIRUF (1983), S. 244; HINTZ (1987), S. 94, und MULLER, H. (1987), S. 1667, an.

32) Vgl. dazu vor allem die Erläuterungen zur Simulationsanalyse von Netzmodellen. Dort wurde der Dialogbetrieb von PPS-Systemen erörtert, die Produktionsprozesse und Koordinierungsentscheidungen in Netzmodellen simulieren und dabei graphisch visualisieren. Vgl. auch die Ausführungen, die sich mit der Unterstützung menschlicher Informationsverarbeitung durch graphische Benutzerschnittstellen befassen.

33) Vgl. dazu auch die Hervorhebung der graphentheoretischen Fundierung des Petrinetz-Konzepts bei BYRN (1974), S. II-6; NELSON, R.A. (1982), S. 53; ROSENSTENGEL (1991), S. 4f.

34) Vgl. WINAND (1980), S. 1252 (methodische Fundierung von Software); SCHMITZ, P. (1991), S. V ("Realisierung benutzerfreundlicher Software-Unterstützung"); ROSENSTENGEL (1991), S. 2. Vgl. auch die Konzeptimplementierungen in jenen Softwarepaketen, auf die schon in einer früheren Anmerkung hingewiesen wurde.

35) Die Fruchtbarkeit dieses Zusammenwirkens läßt sich anhand des produktionswirtschaftlichen Hintergrunds dieser Arbeit verdeutlichen: Es steht eine Vielzahl von Konzepten zur Verfügung, die *entweder* auf das visuelle Wahrnehmungsvermögen des Menschen *oder* aber auf die formalen Anforderungen von Automatischen Informations-

verarbeitungssystemen zugeschnitten sind. Zu den weit verbreiteten Visualisierungstechniken gehören z.B. GANTT-Diagramme für Maschinenbelegungsplanungen, Stechkarren-Tafeln in Produktionsleitständen oder Werkstückfluß-Diagramme bei der Fabrikplanung. Formale Modellierungskonzepte, die auf den Einsatz der Automatischen Informationsverarbeitung abzielen, liegen dagegen z.B. als OR-Programme oder als stochastische Warteschlangensysteme vor.

Aber zumeist mangelt es an einer wechselseitigen Verknüpfung zwischen Visualisierungstechniken und formalen Modellierungskonzepten. So hat schon früh ELMAGHRABY (1964), S. 494, beklagt, daß den visuellen Sachverhaltsdarstellungen ein tragfähiges formales Fundament fehle. Daher verwehrt sie eine mathematische Analyse der repräsentierten Sachverhalte. In ähnlicher Weise hebt SCHNEIDER, H.-J. (1978), S. 34, hervor, daß einfache graphische Visualisierungsformen für die Repräsentation komplexer Objekte nicht ausreichen, wenn sie keine präzise formale Syntax und Semantik besitzen. Umgekehrt erfreuen sich formale Modellierungskonzepte oftmals nur einer geringen Beliebtheit, weil der Umgang mit ihnen als unanschaulich empfunden wird. Beispielsweise haben OR-Programme in der betrieblichen Praxis bei weitem noch nicht die Akzeptanz gefunden, die aufgrund ihrer formalen Leistungsfähigkeit zu erwarten wäre. Vgl. zu den Akzeptanzschwierigkeiten - und der daraus resultierenden geringen Verbreitung - von OR-Programmen im besonderen oder von OR-Techniken im allgemeinen ROY, A. (1982), S. 26.

Auf die mangelhafte Verknüpfung zwischen anschaulichen Visualisierungen und leistungsfähigen formalen Konzepten läßt sich auch eine Feststellung beziehen, die HELBERG (1987), S. 152, in einem anderen Kontext geäußert hat: "Hier tritt das ... allgemein zu beobachtende Dilemma auf, daß leistungsfähige Verfahren sehr daten- und rechenintensiv sind und aufgrund der geringen Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse auf mangelnde Akzeptanz des Anwenders stoßen, andererseits einfache und überschaubare Verfahren unbefriedigende Ergebnisse zeigen." Das Petrinetz-Konzept ist hingegen so angelegt, daß es die kritische Verbindung zwischen visueller Repräsentation und formaler Modellierung von vornherein in sich birgt. Zwar existieren auch andere Modellierungskonzepte, die eine ähnliche Verknüpfung leisten. Dazu gehören vor allem Simulationssprachen, die um graphische Animationskomponenten erweitert sind, und die Netzplantechnik. Aber es wurde schon früher aufgezeigt, daß Petrinetze gegenüber diesen beiden Alternativen bedeutsame Vorzüge aufweisen.

36) Der Aspekt der Formalisierung wird an anderer Stelle vertieft.

37) Vgl. WINAND (1980), S. 1253.

38) Vgl. PÉTRI, C. (1983), S. 7. Auch die Netzeditoren, die in Kürze vorgestellt werden, können als eine Variante der interaktiven Entwicklungsumgebungen betrachtet werden. Allerdings bleibt diese Variante auf die Phase der Modellkonstruktion beschränkt. Die Phase der Modellauswertung reicht dagegen über die Aufgabenstellung eines Netzeditors hinaus. Vgl. dazu den Hinweis, daß Netzeditoren über keine oder nur geringfügige analytische Fähigkeiten verfügen.

39) Vgl. zu informationstechnischen Ansätzen, die sich in jüngerer Zeit verstärkt um das Etablieren einer eigenständigen "Groupware" bemühen, SRIKANTH (1987), S. 301ff.; HAHN, U. (1988a), S. 1ff.; NUNAMAKER (1988), S. 826ff.; KRCMAR (1989), S. 7ff.; HAHN, U. (1989a), S. 2ff.; HAHN, U. (1989b), S. 409ff.; VETSCHERA (1990), S. 67ff.; MCGOFF (1990), S. 39ff.; HAHN, U. (1990b), S. 1ff.; FISCHER, R. (1990), S. 60ff.; READ, M. (1991), S. 360ff.; VETSCHERA (1991a), S. 369ff.

40) Das Automatische Informationsverarbeitungssystem braucht keineswegs auf eine räumlich zusammengefaßte Anlage konzentriert zu sein. Vielmehr kann es sich auch um ein räumlich verteiltes System handeln. Seine Komponenten sind dann in der Regel durch ein lokales oder ein weitreichendes Kommunikationsnetzwerk miteinander verknüpft.

41) Allerdings ist zu beachten, daß es sich hierbei um eine mittelbare, rein technische, automatenvermittelte Kommunikation handelt. Eine unmittelbare, zwischenmenschliche Kommunikation findet nicht statt. Dies wird mitunter zum Anlaß genommen, die Bezeichnung "Kommunikation" auf die Interaktion mit oder über Automaten grundsätzlich nicht anwenden zu wollen. Diese terminologischen "Scharmützel" möchte der Verf. aber nicht vertiefen, da sie an dieser Stelle keine interessanten Einsichten versprechen. Es reicht, darauf hinzuweisen, daß die automatenvermittelte Kommunikation durchaus das Risiko in sich birgt, eine Verarmung an zwischenmenschlicher Kommunikation nach sich zu ziehen. Vgl. ZELEWSKI (1986a), S. 1036, 1134, 1136ff. u. 1282; ZELEWSKI (1989d), S. 94f. Aus dieser Perspektive wirkt sich die Unterstützung der Kommunikabilität durch "Groupware" auf das Beurteilungskriterium der Benutzerfreundlichkeit eher negativ aus.

42) Damit wird der Forderung von SCHNEIDER, H.-J. (1978), S. 35, entsprochen, zwecks Kommunikationsverbesserung sollten Modellierungskonzepte mit normativer Kraft bereitgestellt werden.

43) Zugleich wird aber auch auf die fortschrittsbremsenden Gefahren hingewiesen, die allen einheitsstiftenden Standards innewohnen. Darauf wird noch zurückgekommen.

44) Vgl. SZYPERSKI (1983), S. 115.

45) Vgl. FRANK, J. (1976), S. 48; BILLINGTON (1981a), S. 18; ROY, A. (1982), S. 26; SCHRÖDER, H. (1983), S. 82; BARBER (1983), S. 972; BAILEY (1983), S. 540.

46) Vgl. BARBER (1983), S. 972f. u. 986; SHACKEL (1991b), S. 27 u. 30.

47) Es handelt sich bei den hier vorgetragenen Erwägungen nur um grobe Tendenzargumente. Bei einer verfeinerten Untersuchung der Rückantwortzeiten müßten mindestens zwei Determinanten näher gewürdigt werden. Einerseits handelt es sich um die Klassen derjenigen Auswertungsprobleme, die es jeweils zu bearbeiten gilt. Andererseits sind ebenso die Hard- und Softwarearchitekturen der Automatischen Informationsverarbeitungssystemen in Rechnung zu stellen, auf denen Auswertungsprobleme gelöst werden sollen. Beide vorgenannten Aspekte können das Ausmaß von Rückantwortzeiten erheblich beeinflussen. Hier interessiert aber nur eine grobe, tendenzielle Einschätzung der Größenordnung von Rückantwortzeiten. Daher wird auf eine detaillierte Analyse der voranstehend skizzierten Einflußgrößen verzichtet.

48) Denn die zugrundeliegenden erheblichen Effizienzmängel des Petrinetz-Konzepts betreffen nur die Phase der Modellauswertung. Vgl. dazu den Hinweis, daß sich Effizienzbetrachtungen des Petrinetz-Konzepts im allgemeinen nur auf die Auswertung, nicht aber auf die Konstruktion von Netzmodellen beziehen.

49) Vgl. zu solchen Netzeditoren DITTRICH, G. (1989b), S. 2 u. 9f. u. 13ff., insbesondere S. 18ff. (KINED); FEHLING (1990a), S. 2 u. 11ff. (überwiegend KINED).

Darüber hinaus bietet auch DÖRNHÖFER (1991), S. 129ff., eine übersichtliche und detailreiche Erläuterung über die Gestaltung graphischer Editoren. Allerdings bezieht er sich nicht auf das Editieren von Netzmodellen, sondern auf die graphische Erstellung von Simulationsmodellen.

50) Leider wirken sich die hohen Anschaffungskosten für hochauflösende Graphikbildschirme heute noch so restriktiv aus, daß sie weitaus seltener praktisch zur Verfügung stehen, als es von Anwendern des Petrinetz-Konzepts gewünscht wird.

51) Ohne speziellen Bezug auf Netzeditoren hebt auch PETRI, C. (1983), S. 7, die Beiträge der Automatischen Informationsverarbeitung hervor, auf die bei der graphischen Modellierung von Petrinetzen zurückgegriffen werden kann.

52) In dieser Hinsicht leiden allerdings alle Netzeditoren, die dem Verf. bisher bekannt wurden, unter erheblichen Komfortmängeln. Insbesondere werden zumeist weder die freie Positionierung von Anschriften noch die Verwendung von Sub- oder Superskripten zugelassen. Insbesondere die Indexierung der Stellen- und Transitionsbezeichnungen "s_m" bzw. "t_n" erfordert aber die Benutzung von Subskripten. Einschränkungen dieser Art haben den Verf. auch in der hier vorgelegten Ausarbeitung dazu veranlaßt, keinen Netzeditor für die Konstruktion von Netzgraphiken zu benutzen. Statt dessen hat er ein konventionelles, aber in seinen Darstellungsfähigkeiten wesentlich ausdrucksmächtigeres Programm der graphischen Informationsverarbeitung verwendet (GEM/Draw).

53) Dazu gehören z.B. das Vervielfältigen, Skalieren oder Verschieben von Graphikkomponenten. Vgl. zu einem Überblick über das Leistungspotential graphischer Informationsverarbeitung ENCARNACAO (1988), S. 197ff.; WOLF, S. (1991), S. 221ff. Die Ausführungen von WOLF sind im Rahmen dieser Arbeit aus drei Gründen besonders interessant. Erstens thematisiert er die graphischen Visualisierungsmöglichkeiten auf der Hardwarebasis von Workstations. Ihre Bedeutung für den Umgang mit Petrinetzen wurde bereits mehrfach angesprochen. Zweitens werden die Graphikfähigkeiten eines objektorientierten Softwareentwicklungssystems "KEE" (Knowledge Engineering Environment) vorgestellt, das auf dem objektorientierten Gestaltungsansatz beruht. Er spielte auch anlässlich der Rahmenlegung für die hier verfolgte Modellierung von Produktionssystemen eine wichtige Rolle. Drittens erlaubt das KEE-Entwicklungssystem eine Implementierung des ATMS-Konzepts. Seine besonderen Beiträge zur Realisierung von Anpassungsplanungen in Flexiblen Fertigungssystemen wurden an anderer Stelle erörtert.

54) Es bedarf wohl keiner vertiefenden Erläuterungen, welche Mühsalen das "manuelle" Überarbeiten von Graphiken bereitet.

55) Dieser Beitrag zur Benutzerfreundlichkeit des Petrinetz-Konzepts stellt eher eine Auswirkung seiner partiellen Implementierung auf Automatischen Informationsverarbeitungssystemen dar, als daß er dem Konzept "an sich" zugerechnet werden könnte. Daher wird er hier als Implementierungsaspekt behandelt - und nicht als Facette der Benutzerfreundlichkeit von Petrinetzen.

56) Allerdings beziehen sich die hier angesprochenen Unterstützungsleistungen ausschließlich auf die Konstruktion graphischer Repräsentationen von Netzmodellen. Die Umsetzung dieser Modellrepräsentationen in die formalen Netzdefinitionen von Stelle/Transition-Netzen oder Synthetischen Netzen werden dadurch aber nicht abgedeckt. Dies gilt insbesondere auch für die Aufgabe, bei der Konstruktion Synthetischer Netze die Netzgraphik um die präzisierende prädikatenlogisch-algebraische Netzlegende zu erweitern. Ebensowenig werden andere Konstruktionsleistungen, wie vor allem die Verifizierung oder Validierung von Modellentwürfen, unterstützt.

57) Die ästhetische Gestaltung von Netzgraphiken unterliegt einer Vielzahl von Freiheitsgraden. Wenn nur der einfache Standardfall von zweidimensionalen graphischen Netzrepräsentationen betrachtet wird, gehören dazu im wesentlichen:

- die Verteilung von Netzknoten auf der Darstellungsebene;
- die Art der Knotenverknüpfung durch Netzkanten (z.B. geradlinig-rechtwinklig, geradlinig-geknickt, geradlinig mit gerundeten Ecken, krummlinig);
- die wechselseitige relative Positionierung von Knoten und Kanten, mit der eine möglichst geringe Anzahl von Kantenüberschneidungen erreicht werden soll;
- die Schrifttypen für und die Positionierung von Knoten- und Kantenanschriften;
- das möglichst gleichdichte Anfüllen der Darstellungsebene mit graphischen Symbolen;
- das optische Hervorheben besonders wichtiger Komponenten aus einer graphischen Netzrepräsentation.

Es bereitet schon erhebliche Schwierigkeiten, für die vorgenannten Determinanten einer ästhetischen Graphikgestaltung operationale Beurteilungsmaßstäbe zu finden. Lediglich die dritte Einflußgröße bietet mit der Anzahl von Kantenüberschneidungen einen unmittelbar operationalen Maßstab an. Selbst wenn solche Beurteilungskriterien vorliegen, existieren seitens der Automatischen Informationsverarbeitung zur Zeit doch nur wenige Ansätze, die eine kriteriengerechte ästhetische Gestaltung von netzartigen Graphiken zulassen. Vgl. zu solchen vereinzelt graphischen Gestaltungsbeiträgen z.B. FEINER (1988), S. 205f. Sie reichen aber bei weitem noch nicht aus, um den Menschen bei der Konstruktion von ästhetisch anmutenden, graphischen Netzrepräsentationen abzulösen. Auf jeden Fall verlangen die "ästhetisierenden" graphischen Gestaltungsalgorithmen einen derart hohen Einsatz von Informationsverarbeitungsressourcen, daß sie zumindest aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen für die Modellierungspraxis zur Zeit noch ausscheiden; vgl. LAUTENBACH (1983c). Ähnlich zurückhaltend äußert sich FEINER (1988), S. 205: "... problems of aesthetics and run-time *may eventually* be overcome ..." (kursive Hervorhebung durch den Verf.).

58) Die nachfolgende Unterscheidung zwischen Netzeditoren und -analysatoren hebt jeweils nur die *Schwerpunkte* der Softwarepakete hervor. Es wird keineswegs bestritten, daß zahlreiche Netzeditoren auch bescheidene Auswertungsoptionen für die konstruierten Netzmodelle anbieten. Ebenso wenig wird in Abrede gestellt, daß mehrere Netzanalysatoren nebenbei auch einfache graphische Netzkonstruktionen erlauben. Aber in beiden Fällen handelt es sich bei den zusätzlichen Analyse- bzw. Konstruktionshilfen nur um "Zugaben" mit *geringer* Leistungsfähigkeit.

Allerdings existieren bereits einige wenige Softwarepakete, die als gleichwertige Netzeditoren und -analysatoren eingestuft werden können (vgl. dazu den Hinweis auf das Produkt "DESIGN"). Jedoch handelt es sich derzeit noch um Ausnahmeerscheinungen am Softwaremarkt. Darüber hinaus verursacht ihre Nutzung exorbitante Anschaffungs- und Implementierungskosten. Diese Kosten haben bisher dazu geführt, daß die integrierten Softwarepakete bei der praktischen Anwendung des Petrinetz-Konzepts nur in sehr bescheidenem Ausmaß zum Einsatz gelangt sind. Daher läßt sich die oben erwähnte Separation des Softwaremarkts als grobes Tendenzurteil aufrechterhalten.

59) Vgl. zu typischen Netzanalysatoren beispielsweise RAZOUK (1985c), S. 2 u. 7ff. (P-NUT).

60) Vgl. aber den Vorbehalt, daß Netzanalysatoren mitunter auch über bescheidene Editierfähigkeiten verfügen. Darauf wird in Kürze zurückgekommen.

61) Vgl. z.B. DITTRICH, G. (1989b), S. 10. Dort wird ein anspruchsvoller Netzeditor für die graphische Gestaltung von Kanal/Instanz-Netzen vorgestellt. (Es handelt sich um das Exemplar KINED.) Er läßt zwar "formelhafte" Netzanschriften zu. Eine analytische Auswertung der Netzformeln "wird jedoch ... noch nicht unterstützt". Immerhin wurde dieser Netzeditor so weit fortentwickelt, daß er den Entwurf von markierten Stelle/Transition-Netzen umfaßt. Die Transitionen können sogar mit Schaltdauern versehen werden. Aber das "analytische" Potential dieses Netzeditors reicht nur für eine simulative Auswertung des Netzverhaltens aus. Darüber hinaus führt die Simulation der Schaltdauern zu einigen gravierenden Problemen. Von einem kombinierten Netzeditor *und* -analysator, der das analytische Potential des Petrinetz-Konzepts befriedigend ausschöpfen würde, kann aber bei weitem nicht die Rede sein. Dazu bleiben zu viele derjenigen Auswertungsoptionen unberücksichtigt, die in dieser Arbeit beleuchtet wurden.

62) Es wurde schon kurz zuvor darauf hingewiesen, daß einige wenige kombinierte Netzeditoren und -analysatoren existieren. Zu diesen Ausnahmen zählt z.B. das Softwarepaket "DESIGN". Es läßt sowohl das komfortable graphische Editieren von Netzmodellen als auch eine leistungsfähige Modellanalyse zu. Allerdings unterliegt es zwei wesentlichen Einschränkungen. Erstens bleibt es im wesentlichen auf die Auswertungskonzepte der Simulations- und Invariantenanalyse beschränkt. Eine umfassende Erreichbarkeitsanalyse bietet es jedoch nicht an. Gerade die Erreichbarkeitsanalyse steht aber im Zentrum der hier vorgelegten Ausarbeitung. Zweitens wirken die Anschaffungskosten für das Softwarepaket auf viele potentielle Anwender des Petrinetz-Konzepts prohibitiv. Darauf wurde schon in der oben erwähnten Anmerkung hingewiesen.

63) Diese Kompatibilitätsmängel gelten auch innerhalb der Klasse der Netzanalysatoren. Dies bleibt solange unbeachtlich, wie sich alle Auswertungsbedürfnisse durch dasselbe Softwarepaket erfüllen lassen. Dies ist aber nicht immer der Fall. Denn zahlreiche Netzanalysatoren konzentrieren sich auf eines oder einige wenige der o.a. Auswertungskonzepte. Besonders selten finden sich Erreichbarkeits- und Invariantenanalysen in einem Softwarepaket

vereinigt. Dies mag an den grundverschiedenen "Auswertungsphilosophien" der beiden Analysekonzepte liegen. Es läßt sich vorstellen, daß sich die Softwareentwickler entweder der einen oder aber der anderen "Philosophie" verschrieben haben. Aus softwarepsychologischer Perspektive ist dies durchaus verständlich. Aber aus der Sicht eines Anwenders von Netzmodellen kann sich eine solche Entwicklungseinseitigkeit als störend erweisen. Dies ist spätestens dann der Fall, wenn ein Anwender die Auswertungsergebnisse vergleichen möchte, die sich für dasselbe Netzmodell durch eine Erreichbarkeits- und eine Invariantenanalyse erzielen lassen. Dann muß er wegen der vorgenannten Einseitigkeit oftmals zu zwei unterschiedlichen Netzanalysatoren greifen. Zwischen den meisten Netzanalysatoren existieren aber Kompatibilitätsdefizite, die schon oben kurz erwähnt wurden. Die Inkompatibilitäten können z.B. dadurch verursacht sein, daß für die Netzmodelle verschiedene Implementierungssprachen benutzt werden. Oder die automateninternen Netzrepräsentationen werden nach der Maßgabe von unterschiedlichen Codierungsschemata erzeugt, die sich nicht direkt ineinander transformieren lassen. Vgl. zu solchen Codierungsdiskrepanzen OJALA (1983), S. 26. Die vorgenannten Inkompatibilitäten führen dazu, daß bei einem Analysatorwechsel nahezu immer eine aufwendige - und im Prinzip überflüssige - Neueingabe des jeweils untersuchten Netzmodells erforderlich wird.

Darüber hinaus unterwerfen zahlreiche Netzanalysatoren die Netzmodelle, die sich mit ihrer Hilfe untersuchen lassen, bestimmten analysatorspezifischen Einschränkungen. Beispielsweise werden von Netzanalysatoren, die auf Invariantenanalysen spezialisiert sind, in der Regel reine Netze vorausgesetzt, die keine 1-Schleifen enthalten. Netzanalysatoren, die für Erreichbarkeitsanalysen vorgesehen sind, sehen diese Restriktion dagegen zumeist nicht vor. Infolge solcher divergierenden Netzeinschränkungen kann der Fall eintreten, daß sich ein Netzmodell überhaupt nicht auf einen anderen Netzanalysator portieren läßt, weil es dessen Analyseprämissen nicht erfüllt. Diese Gefahr droht immer dann, wenn der Anwender des Petrinetz-Konzepts bei der Konstruktion eines Netzmodells nicht von vornherein die Restriktionen aller Netzanalysatoren beachtet, die für die spätere Modellauswertung herangezogen werden sollen. Eine solche vorausschauende Restriktionseinhaltung wird hier jedoch aus zwei Gründen abgelehnt. Erstens widerspricht sie fundamental der Zielsetzung dieser Arbeit, ein möglichst ausdrucks mächtiges Modellierungskonzept vorzulegen, das auf Aspekte der Modellauswertung zunächst keine Rücksicht nimmt. Zweitens ist der Konzeptanwender oftmals nicht in der Lage, schon während der Modellkonstruktion vorherzusehen, welche Auswertungsbedürfnisse er später bei der Modellanalyse im einzelnen verfolgen möchte. Vgl. dazu auch die Ausführungen zu Bedürfnisverschiebungen von Modellierungsträgern.

Aufgrund der voranstehend skizzierten Kompatibilitätsmängel, Analyseeinseitigkeiten und analysatorspezifischen Netzeinschränkungen muß bei der automatengestützten Anwendung des Petrinetz-Konzepts derzeit leider noch in einer wenig erfreulichen Weise vorgegangen werden: Zunächst bestimmt der Konzeptanwender dasjenige Softwarepaket, das seine aktuellen Auswertungsabsichten am besten zu erfüllen verspricht. Danach konstruiert er sein Netzmodell nach Maßgabe jener Einschränkungen, die ihm der Netzanalysator vorgibt. Es handelt sich um eine Modellierung nach dem "Prokrustesbett-Prinzip", das schon an früherer Stelle kritisiert wurde.

64) Die Kompatibilitätsmängel wurden schon zuvor inhaltlich angesprochen. Kurz zusammengefaßt erstrecken sie sich im wesentlichen auf drei Ebenen:

- informationstechnische Hindernisse beim Austausch von Netzmodellen zwischen Netzeditoren und -analysatoren;
- informationstechnische Behinderungen beim Austausch von Netzmodellen zwischen verschiedenen Netzanalysatoren;
- modellierungstechnische Hindernisse beim Austausch von Netzmodellen zwischen Netzanalysatoren, die unterschiedlich eingeschränkte Netzklassen voraussetzen.

Diese Kompatibilitätsdefizite entspringen einer Zersplitterung der "Petrinetz-Gemeinde" in eine Vielzahl von Interessengruppen. Sie entwickeln ihre Softwarewerkzeuge für die Konstruktion und Auswertung von Netzmodellen weitgehend unabhängig voneinander. Die Kommunikation zwischen den Interessengruppen bleibt dürftig und oberflächlich. Daher verwundert es nicht, daß eine breite Palette von hoffnungslos inkompatiblen Insellösungen entstanden ist. Sie erfüllen zwar die partikulären Entwicklungsbedürfnisse derjenigen Interessengruppen, die eine Werkzeugentwicklung angestoßen haben. Aber von einer gruppenübergreifenden Bedürfnisbündelung zugunsten kompatibler - oder gar integrierter - Entwicklungsergebnisse kann bisher kaum die Rede sein. Nebenher kommt es zu einer Vergeudung knapper Entwicklungsressourcen, weil die Kommunikationsarmut zwischen den Interessengruppen dazu geführt hat, daß zahlreiche leistungsäquivalente Konstruktions- und Auswertungsinstrumente mehrfach entwickelt worden sind. Der Befund einer geringen Interaktion zwischen den Interessengruppen mag auf den ersten Blick befremden: Zeichnet sich das Petrinetz-Konzept doch durch seine hohe Kommunikabilität aus. Aber die endogenen Eigenschaften eines Konzepts schlagen offensichtlich nicht auf die exogene Konzeptumsetzung durch Interessengruppen durch. Die Art der Konzeptumsetzung unterliegt vielmehr "emergenten" Einflüssen, die im Rahmen der Wissenschaftssoziologie ausführlicher gewürdigt werden. Der Verf. verzichtet darauf, dies näher auszuführen. Darüber hinaus räumt er ein, daß die voranstehende Kritik an der partikulären Struktur der "Petrinetz-Gemeinde" einen subjektiven Eindruck wiedergibt. Er hat sich zwar auf zahlreichen Fachtagungen und anläßlich vieler Einzelgespräche verfestigt. Aber eine "Objektivierung" durch entsprechende empirische Belege erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nicht.

65) Es existieren zwar schon einige wenige Integrationsansätze. Sie sind aber entweder prohibitiv kostspielig oder aber unausgereift. Zum ersten Fall gehört der kombinierte Netzeditor und -analysator DESIGN, der bereits angesprochen wurde. Zu den unausgereiften Integrationsansätzen gehört dagegen das Projekt "Netlab" der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH. Von dieser Großforschungseinrichtung wird seit mehreren Jahren an einem Softwarepaket gearbeitet, das umfangreiche Konstruktions- und Auswertungsleistungen in sich vereinigen soll. Bisher sind jedoch erst einige wenige Bausteinimplementierungen bekannt geworden. Darüber hinaus bleiben die Publikationen über dieses Entwicklungsprojekt weitaus hinter demjenigen Niveau zurück, daß bei ähnlichen Projekten allgemein üblich ist. Es drängt sich daher der Verdacht auf, daß das "Netlab"-Projekt nicht in der ursprünglich gewünschten Weise voranschreitet oder sogar nur noch ein "Schattendasein" fristet. Entsprechende Gerüchte kursierten auf einschlägigen Fachtagungen. Sie ließen sich aber wegen der dürftigen Publikationslage weder bestätigen noch widerlegen.

66) Diese Einschränkung kann durchaus mit den divergenten Implementierungsanforderungen gerechtfertigt werden, die aus den verschiedenartigen Netzdefinitionen der Netzklassen resultieren.

67) Der Verf. wagt auch nicht, darauf in näherer Zukunft zu hoffen. Die Zersplitterung der "Petrinetz-Gemeinde" in Interessengruppen, die jeweils andere Netzklassen präferieren, spricht dagegen.

9.2.2.3 Theoretisch orientierte Gütedeterminanten

9.2.2.3.1 Konsistenz

Die Konsistenz¹⁾ eines Modellierungskonzepts kann aus zweifacher Perspektive beleuchtet werden. Einerseits ist es möglich, die immanente Widerspruchsfreiheit des Modellierungskonzepts zu betrachten. Dabei handelt es sich um eine *conditio sine qua non*. Denn ein in sich widersprüchliches Konzept besitzt überhaupt keinen Erkenntniswert. Diese konzeptionelle Widerspruchsfreiheit erfüllen alle Netzklassen²⁾. Andererseits läßt sich untersuchen, ob ein Modellierungskonzept Hilfestellungen anbietet, um Modelle, die mit seiner Hilfe gestaltet wurden, hinsichtlich ihrer Widerspruchsfreiheit zu überprüfen³⁾. Aus diesem letztgenannten Blickwinkel unterscheiden sich die hier betrachteten drei Netzklassen deutlich. Das wird im folgenden näher ausgeführt.

Bei Untersuchungen der Modellkonsistenz kann entweder das Überprüfungsergebnis oder aber der Überprüfungsprozeß in den Vordergrund gestellt werden. Aus der ergebnisbezogenen Perspektive wird die Widerspruchsfreiheit eines Modells gefordert⁴⁾. Aus dem prozeßbezogenen Blickwinkel wird dagegen die Verifizierbarkeit oder Validierbarkeit von Modellen betont⁵⁾. Die Modellverifizierung dient der Untersuchung der formalen, die Modellvalidierung der Überprüfung der materialen Korrektheit einer Modellierung⁶⁾. Dabei wird die Modellierungskorrektheit anhand von vorgegebenen Korrektheitskriterien untersucht, denen das Modellierungsergebnis nicht widersprechen darf. Daher geht es sowohl aus ergebnis- als auch aus prozeßbezogener Sicht um das gleiche Konsistenzziel, die Widerspruchsfreiheit eines Modells aufzuzeigen⁷⁾.

Grundsätzlich bietet das Petrinetz-Konzept die Möglichkeit, die Widerspruchsfreiheit von Netzmodellen zu überprüfen. Dies gilt nicht nur für die ergebnisbezogene Feststellung oder Widerlegung der Modellkonsistenz⁸⁾. Es trifft ebenso auf die prozeßbezogene Modellverifizierung zu⁹⁾. Dagegen läßt das Petrinetz-Konzept keinen eigenständigen Beitrag erkennen, der darauf abzielt festzustellen, ob ein Netzmodell mit den *informalen* Problemwahrnehmungen oder -beschreibungen eines Modellierungsträgers übereinstimmt¹⁰⁾. Daher leistet das Petrinetz-Konzept keine direkte Unterstützung der Modellvalidierung. Allenfalls läßt sich an die Anschaulichkeit graphisch visualisierter Netzmodelle denken. Sie vermag Validierungsbemühungen auf indirekte Weise zu begünstigen, indem sie die geistige Durchdringung komplizierter Sachzusammenhänge fördert. Dies wird hier aber nicht als hinreichend betrachtet, um von einer eigenständigen Validierungsleistung des Petrinetz-Konzepts zu sprechen.

Die ergebnis- oder prozeßbezogene¹¹⁾ Überprüfung der Modellkonsistenz kann auf unterschiedlich strenge Maßstäbe der Widerspruchsfreiheit bezogen werden. Das Postulat der logischen¹²⁾ Widerspruchsfreiheit bildet die strengste Vorgabe für die Modellkonsistenz. Schwächere Anforderungen an die Modellkonsistenz werden durch Korrektheitskriterien konstituiert¹³⁾. Denn ein Netzmodell kann immer noch einen logischen Widerspruch enthalten, obwohl es alle vorgegebenen Korrektheitskriterien erfüllt. Korrektheitskriterien werden zumeist entweder als Verifizierungskriterien oder aber als Integritätsbedingungen thematisiert. Die schwächste Form der Konsistenzprüfung stellt die Ermittlung von Netzinvarianten dar. Die festgestellten Netzinvarianten erteilen keine unmittelbare Auskunft über Widersprüche. Vielmehr bedürfen sie einer zusätzlichen inhaltlichen Interpretation. Darauf wird später zurückgekommen.

Zunächst wird die strenge Untersuchung der logischen Widerspruchsfreiheit betrachtet. Der Beweis, daß in einem Netzmodell kein logischer Widerspruch vorkommt, beruht auf den beiden Netztheoremen von LAUTENBACH einerseits sowie von MURATA und ZHANG andererseits. Aufgrund seiner beweistechnischen Voraussetzungen läßt sich das invariantenorientierte Netztheorem von LAUTENBACH nur auf Stelle/Transition-Netze anwenden¹⁴⁾. Das erreichbarkeitsbezogene Netztheorem von MURATA und ZHANG kann dagegen sowohl für Stelle/Transition-Netze als auch

für Synthetische Kernnetze benutzt werden¹⁵). Allerdings muß es sich in beiden Fällen um deklarative Netzmodelle handeln. Operationale Netzmodelle verletzen dagegen die Anwendungsvoraussetzungen von beiden Netztheoremen. Das gilt nicht nur für Synthetische Kernnetze. Denn auch alle Erweiterungen des Kernkonzepts Synthetischer Netze beruhen auf operationalen Netzmodellen. Daher ist bis heute keine Technik bekannt, mit deren Hilfe die logische Widerspruchsfreiheit jedes operationalen Synthetischen Kernnetzes oder jedes Erweiterten Synthetischen Netzes nachgewiesen werden kann¹⁶).

Für die Überprüfung der formalen Korrektheit eines Netzmodells werden mitunter Verifizierungskriterien benutzt. Für diesen Zweck bieten sich diejenigen Netzeigenschaften an, die früher vorgestellt wurden, als die Auswertungsmöglichkeiten von Netzmodellen thematisiert wurden. Zu den typischen Eigenschaften, die des öfteren zur Verifizierung von Netzmodellen herangezogen werden, gehören¹⁷):

- ihre Deadlockfreiheit;
- ihre Lebendigkeit;
- ihr Terminieren;
- die Abwesenheit von toten Transitionen;
- das Fehlen von Stellen, deren Belegung durch Markenkopien unbeschränkt anzuwachsen vermag.

Die vorgenannten Netzeigenschaften können zumindest mit Hilfe der Erreichbarkeitsanalyse überprüft werden. Für die hier beurteilten drei Netzklassen bereitet die Auswertung ihrer Erreichbarkeitsgraphen keine Schwierigkeiten. Daher erfüllen sie gemeinsam die Anforderung, die Überprüfung von Verifizierungskriterien zu gestatten¹⁸). Allerdings leiden die verifizierbaren Netzeigenschaften unter dem Nachteil, daß sie oftmals nicht den Verifizierungsbedürfnissen eines Modellierungsträgers entsprechen¹⁹). Dies gilt zumindest für den hier vorausgesetzten produktionswirtschaftlichen Argumentationshintergrund. Denn es handelt sich um Netzeigenschaften, deren Zusammenhang mit intuitiven Vorstellungen über die Korrektheit der Modellierung von Koordinierungsproblemen im allgemeinen nicht unmittelbar ersichtlich ist²⁰).

Diesem Mangel begegnet die Verwendung von Integritätsbedingungen²¹). Denn mit ihrer Hilfe ist es möglich, die intuitiven Korrektheitsvorstellungen eines Modellierungsträgers zunächst in einer präzisen prädikatenlogischen Form auszudrücken. Alsdann kann die Erfüllung der Integritätsbedingungen überprüft werden. Dafür bietet sich z.B. eine Erreichbarkeitsanalyse des betroffenen Netzmodells an. Für ein möglichst großes Formulierungspotential von Integritätsbedingungen ist der prädikatenlogische Ausdrucksreichtum erforderlich. Darüber hinaus ist die unmittelbare Anzeige einer Integritätsverletzung nur dann gewährleistet, wenn für die Repräsentation von Integritätsverletzungen obligatorische oder faktische Transitionen verwendet werden²²). Daher empfehlen sich nur Erweiterte Synthetische Netze für Korrektheitsuntersuchungen, die auf Integritätsbedingungen Bezug nehmen. Auf Stelle/Transition-Netze lassen sie sich dagegen überhaupt nicht anwenden²³). Synthetische Kernnetze eignen sich für die Überprüfung von Integritätsbedingungen allenfalls dann, wenn eine vollständige Analyse ihrer Erreichbarkeitsgraphen sichergestellt ist²⁴).

Schließlich können auch Netzinvarianten benutzt werden, um zu überprüfen, ob ein Netzmodell der zugrundeliegenden Problemspezifizierung gerecht wird²⁵). Diesem Ansatz räumt der Verf. allerdings geringeres Gewicht ein²⁶). Denn er geht nicht von Korrektheitskriterien aus, die aus der jeweils vorgegebenen Problemspezifizierung abgeleitet sind. Vielmehr wird die umgekehrte Richtung eingeschlagen²⁷): Zunächst wird ermittelt, welche S- oder T-Invarianten ein Netzmodell besitzt. Erst danach wird die Frage gestellt, ob sich die Netzinvarianten so interpretieren lassen, daß sie Erkenntnisse über die Korrektheit eines Netzmodells liefern. Dies ist keineswegs immer möglich²⁸). Hinzu kommen erhebliche Schwierigkeiten, die S- oder T-Invarianten von Höheren Netzen zu bestimmen. Daher kann die Invariantenanalyse für die Korrektheitsprüfung von Netzmodellen allenfalls dann größere praktische Bedeutung erlangen, wenn sich die

Modellierung auf Stelle/Transition-Netze stützt. Dagegen kommt die Invariantenanalyse für Modellierungen, die auf der Basis von Synthetischen Kernnetzen oder von Erweiterten Synthetischen Netzen erfolgt sind, wegen ungelöster Ermittlungsschwierigkeiten ohnehin nicht in Betracht.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Die allgemeine Forderung nach Konsistenz wurde schon in der einleitenden Rahmenlegung gewürdigt. Speziell die Konsistenz von Modellen postuliert z.B. DITTRICH, G. (1989b), S. 1. Vgl. ebenso JÄHNICHEN (1990), S. 5, zur Überprüfung der Widerspruchsfreiheit von formalen (Modell-)Spezifikationen. In einem mittelbaren Zusammenhang mit der hier interessierenden Konsistenz eines Modellierungskonzepts steht auch die Forderung von PRESSMAR (1982), S. 343, nach der "logischen und strukturellen Konsistenz eines Planungssystems".

2) Die logische Widerspruchsfreiheit bedeutet aber keineswegs die Freiheit von logischen Antinomien. Es wurde schon dargelegt, daß die Prädikatenlogik zwar widerspruchsfrei ist, dennoch aber logische Antinomien zuläßt. Synthetische Netze erschließen das prädikatenlogische Ausdrucksvermögen. Daher verwundert es nicht, daß auch in Synthetischen Netzen logische Antinomien wiedergegeben werden können. Ein Beispiel dafür wurde an früherer Stelle präsentiert. Daher gestatten zumindest die Synthetischen Kernnetze und die Erweiterten Synthetischen Netze, zwar konsistente, aber dennoch antinomische Netzmodelle zu konstruieren. Ob dies auch auf Stelle/Transition-Netze zutrifft, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Aber ihr geringes aussagenlogisches Ausdrucksvermögen veranlaßt zu vermuten, daß sie keine antinomischen Netzmodelle zulassen. Auf keinen Fall kann mit ihrer Hilfe das Netzbeispiel rekonstruiert werden, dessen antinomischer Charakter oben erwähnt wurde.

3) Es werden hier also nur Modelle hinsichtlich ihrer Konsistenz überprüft, die als (Zwischen-)Ergebnisse von Modellierungsprozessen vorliegen. Dagegen findet die Frage, ob auch *während* eines Modellierungsprozesses vorübergehende Inkonsistenzen in Kauf genommen werden sollen, keine weitere Beachtung. Solche temporären Inkonsistenzen können z.B. bei hierarchischen Modellverfeinerungen anfallen, wenn eine Knotenverfeinerung begonnen, aber noch nicht vollständig ausgeführt worden ist. Vgl. dazu die Hinweise bei DITTRICH, G. (1989b), S. 20, und FEHLING (1990a), S. 13 (Fn. 5) u. 35. Vgl. darüber hinaus WINTER, R. O. (1991), S. 33ff. Er legt eine ausführliche Erörterung von temporalen Inkonsistenzen vor, die sich bei der Verfeinerung hierarchischer Produktionsplanungen einstellen können.

4) Die früher genannten Quellen, die sich generell auf die Forderung nach Widerspruchsfreiheit bezogen, decken auch die Forderung nach Modellkonsistenz als hier interessierenden Spezialfall ab.

5) Vgl. zur Forderung nach Verifizierbarkeit oder Validierbarkeit ULLRICH (1976), S. 0.6; THESEN (1976), S. 414; MOALLA (1977), S. 90; VALETTE (1978a), S. 378; GAITANIDES (1979b), S. 9; DEVY (1979), S. 43; VALETTE (1979b), S. 156; TÖRN (1981), S. 192; MÜLLER, B. (1981), S. 199; SIFAKIS (1982), S. 227; YOELI (1982b), S. 1f.; VALETTE (1982c), S. 3; HERZOG, O. (1983).

Im modelltheoretischen Rahmen wurde zwischen der Verifizierung und Validierung von Modellen unterschieden. Auf diese Differenzierung wird aber bei den o.a. Quellen verzichtet, weil sie die beiden Begriffe in unterschiedsloser Weise verwenden. Darüber hinaus klingen Verifizierbarkeit oder Validierbarkeit von Modellen inhaltlich ebenso an bei SCHUMACHER (1978), S. 2; STEINKE (1980), S. 116, ohne dort als solche angesprochen zu werden. Dies trifft auch auf die Forderung zu, Modelle müßten sich korrekt gestalten lassen. Vgl. zu diesem Verlangen beispielsweise HURA (1982c), S. 433. Denn die Überprüfung der formalen oder materialen Korrektheit eines Modells läßt sich unmittelbar darauf zurückführen, entsprechende Verifizierungs- bzw. Validierungskriterien zu untersuchen; vgl. VALETTE (1979b), S. 156 u. 158; SIFAKIS (1982), S. 227ff. Des weiteren wird die Verifizierbarkeit oder Validierbarkeit von Modellen auf mittelbare Weise auch von HOLT, A. (1975d), S. 157f., angesprochen. Er wünscht sich von einem Modellierungskonzept, die Aufdeckung von Modellierungsfehlern zu unterstützen. Dieses Desiderat läßt sich erfüllen, indem wiederum die Korrektheit eines Modells anhand der vorgenannten Kriterien überprüft wird.

6) Vgl. dazu die Erläuterungen von Modellverifizierungen und -validierungen im modelltheoretischen Rahmen. Vgl. auch die entsprechenden Zuordnungen von formaler bzw. materialer Modellkorrektheit.

7) Der Konsistenzbegriff wird hier in einem weit gefaßten Sinne ausgelegt. Er betrifft die Freiheit von Widersprüchen beliebiger Art. Damit umfaßt er einerseits als Konsistenz i.e.S. die logische Widerspruchsfreiheit. Andererseits erstreckt er sich auch auf die Widerspruchsfreiheit gegenüber Korrektheitskriterien, die inhaltlich beliebig ausgestaltet sein dürfen. Korrektheitskriterien umfassen z.B. Integritätsbedingungen und Verifizierungskriterien. Auf beide wird in Kürze näher eingegangen. Im folgenden wird stets der Konsistenzbegriff i.w.S. vorausgesetzt. Aus dem jeweils aktuellen Argumentationskontext ergibt sich, ob entweder die logische Widerspruchsfreiheit oder aber die Freiheit von Widersprüchen gegenüber Korrektheitskriterien gemeint ist. Daher umschließt die Überprüfung der Modellkonsistenz auch die Untersuchung der Modellkorrektheit, die Analyse von Integritätsbedingungen und die Modellverifizierung.

8) In der Netzliteratur wird zwar der Widerspruchsfreiheit von Netzmodellen keine überragende Beachtung geschenkt. Nur zuweilen wird auf den Beitrag des Petrinetz-Konzepts hingewiesen, für die Konstruktion konsistenter Netzmodelle zu sorgen. Vgl. z.B. SHAPIRO, R. (1972), S. 3.28. Oftmals wird sogar nur festgestellt, Netzmodelle erwiesen sich beim Aufdecken von Inkonsistenzen als hilfreich. Vgl. MELDMAN (1971), S. 65; KRÄMER (1981), S. 470; ESTRAILLIER (1982c), S. 656; REISIG (1983a), S. 309; ROSENSTENGEL (1983). Durch diese zurückhaltende Formulierung wird keineswegs der Anspruch begründet, *alle* Widersprüche eines Netzmodells aufdecken zu kön-

nen. Aber die nachfolgenden Erläuterungen werden aufzeigen, daß das Petrinetz-Konzept durchaus mit beachtlichen Ansätzen zur Konsistenzprüfung von Netzmodellen aufwarten kann.

9) Im Gegensatz zum Aspekt der Modellkonsistenz, der seltener Beachtung findet (vgl. die voranstehende Anmerkung), wird auf Möglichkeiten, die Verifizierung von Netzmodellen zu unterstützen, des öfteren hingewiesen. Vgl. MELDMAN (1971), S. 75; LAUTENBACH (1974a), S. 187; SCHUMACHER (1975), S. 409; SZLANCO (1978), S. 75; HEIMERDINGER (1978), S. 163; HAN (1978a), S. 166; VALETTE (1978a), S. 382; VALETTE (1978b), S. 196f.; DEVY (1979), S. 49; AYACHE (1979a), S. 1050; RAMAMOORTHY (1980), S. 440f.; NOE (1980c), S. 389; SYMONS (1980c), S. 34; BRETSCHNEIDER (1980c), S. 41; MEKLY (1980), S. 422; ESTRAILLIER (1982c), S. 656; KRÄMER (1983a), S. 231; VALETTE (1983), S. 264f.; REISIG (1983a), S. 309; o.V. (1983c), S. 4; RAZOUK (1985c), S. 2 u. 5.

In den vorgenannten Quellen wird zwar des öfteren von Validierungen gesprochen. Aber es wurde schon kurz zuvor darauf hingewiesen, daß die hier bevorzugte Unterscheidung zwischen formaler Modellverifizierung und materialer Modellvalidierung im allgemeinen nicht befolgt wird. Vielmehr werden Verifizierungs- und Validierungsbegriff zumeist in synonyme Weise verwendet. Eine nähere Betrachtung der Quellen läßt darüber hinaus erkennen, daß sie im Regelfall die Verifizierung der formalen Modellkorrektheit meinen. Daher wurden sie hier inhaltlich dem Bereich der Modellverifizierung zugeordnet.

Darüber hinaus wird zumeist nur die horizontale Verifizierung von Netzmodellen betrachtet. Von einer horizontalen Modellverifizierung wird in zwei Fällen gesprochen. Entweder wird die formale Korrektheit eines flachen Netzmodells überprüft, das nicht hierarchisch verfeinert ist. Oder es wird ein Teilnetz betrachtet, das sich in einem hierarchisch verfeinerten Netzmodell ausschließlich auf dieselbe Hierarchieebene erstreckt. Eine vertikale Modellverifizierung liegt dagegen vor, wenn in einem hierarchisch verfeinerten Netzmodell Übergänge zwischen Hierarchieebenen erfolgen. Dabei wird untersucht, ob die Erkenntnisse, die über die formale Teilnetzkorrektheit auf einer Hierarchieebene gewonnen werden konnten, beim Übergang auf eine tiefere oder höhere Hierarchieebene fortbestehen. Im Gegensatz zu den oftmals untersuchten horizontalen Verifizierungen von Netzmodellen sind vertikale Modellverifizierungen weitaus weniger erforscht. Sie bereiten auch erhebliche größere Schwierigkeiten. Vgl. zu den Defiziten bei der vertikalen Verifizierung von Netzmodellen VALETTE (1983), S. 265. Immerhin existieren zumindest zwei bescheidene Ansätze, die sich mit der vertikalen Verifizierung von Netzmodellen befassen. Dabei handelt es sich einerseits um die "top down"-Verifizierung von hierarchisch verfeinerten, modularen Netzmodellen. Andererseits ist ebenso eine "bottom up"-Verifizierung von modular aufgebauten Netzmodellen möglich.

Die entgegengesetzte Ansicht, Petrinetze eignen sich nicht zu Verifizierungszwecken, wird dagegen in MEKLY (1980), S. 423, vertreten. Dort wird behauptet, Netzmodelle von Softwareentwürfen seien einer Verifizierung der formalen Entwurfskorrektheit nicht zugänglich. Der Verf. vermag dieser Einschätzung aufgrund der anschließenden Ausführungen jedoch nicht zu folgen.

10) Allenfalls könnte in der Invariantenanalyse ein Beitrag zur Modellvalidierung gesehen werden. Denn bei der Interpretation einer Netzinvariante wird ein Bezug hergestellt, der dieses formale Konstrukt mit einem Aspekt der informalen Problemwahrnehmung oder -beschreibung verknüpft. Dennoch wird hier die Invariantenanalyse ausschließlich zum Bereich der Modellverifizierung gerechnet. Für diese Einstufung spricht, daß die Auswertungstechnik der Invariantenanalyse in rein formaler Weise definiert ist. Die oben erwähnte Bezugnahme auf einen Ausschnitt aus einer informalen Problemwahrnehmung oder -beschreibung stellt eine *nachträgliche* Zugabe durch den Modellierungsträger dar, die durch die Invariantenanalyse selbst in keiner Weise festgelegt ist. Denn die Invariantenanalyse kennt keine systematische Auseinandersetzung mit informalen Modellierungsfacetten. Insbesondere umfaßt sie keine Anleitung, *auf welche Weise* bei der Interpretation von Netzinvarianten vorgegangen werden soll. Dies bleibt der Intuition des Modellierungsträgers überlassen. Daher wäre es verfehlt, der Invariantenanalyse einen eigenständigen Beitrag zur Validierung von Netzmodellen zuzusprechen.

Die voranstehende Argumentation trifft in analoger Weise auch auf den Gedanken zu, für die Modellvalidierung auf die Auswertungstechnik der Simulationsanalyse zurückzugreifen. Zwar läßt sich vorstellen, durch die simulative Auswertung eines Netzmodells zu testen, ob sich das Netzmodell tatsächlich so verhält, wie es der Modellierungsträger aufgrund seiner informalen Problemwahrnehmung oder -beschreibung erwartet. Aber auch in diesem Fall kann dabei kein eigenständiger Beitrag des Petrinetz-Konzepts zur Modellvalidierung erkannt werden. Denn der simulative Test von Modellverhaltensweisen stellt kein Spezifikum des Petrinetz-Konzepts dar. Vielmehr handelt es sich um eine inhärente Eigenschaft der Auswertungstechnik von Modellsimulationen.

11) Im folgenden wird nicht mehr zwischen ergebnis- und prozeßbezogener Perspektive differenziert, weil alle vorgebrachten Konsistenzaspekte aus beiden Blickwinkeln betrachtet werden können. So läßt sich z.B. das Ergebnis, die logische Widerspruchsfreiheit eines Netzmodells festgestellt zu haben, ebenso als Resultat eines Überprüfungsprozesses thematisieren, in dem die logische Widerspruchsfreiheit verifiziert wurde.

12) Logische Widerspruchsfreiheit wird hier als Oberbegriff zu aussagen- und prädikatenlogischer Widerspruchsfreiheit verwendet. Es hängt von der Ausdrucksmächtigkeit des jeweils untersuchten Netzmodells ab, ob in ihm entweder aussagen- oder aber prädikatenlogische Widersprüche existieren können.

13) Dabei wird unterstellt, daß die logische Widerspruchsfreiheit nicht zu den Korrektheitskriterien gezählt wird.

14) Strenggenommen müssen die Stelle/Transition-Netze sogar noch weitere einschränkende Bedingungen erfüllen. Aufgrund dieser Einschränkungen wird die Möglichkeit, Stelle/Transition-Netze auf logische Widerspruchsfreiheit hin zu untersuchen, später nicht als "ausgezeichnet", sondern nur als "hoch" eingestuft.

Da Stelle/Transition-Netze nur die Ausdrucksmächtigkeit der Aussagenlogik erschließen, gestattet das Netztheorem von LAUTENBACH zunächst nur, die aussagenlogische Widerspruchsfreiheit eines Netzmodells nachzuweisen. Zwar kann seine invariantenorientierte Beweistechnik grundsätzlich auch auf Höhere Netze mit prädikatenlogischer Ausdruckskraft übertragen werden. Aber es wurden schon die erheblichen Schwierigkeiten herausgestellt, mit denen die Invariantenanalyse von Höheren Netzen zu kämpfen hat. Daher stellt das Netztheorem von LAUTENBACH keinen praktikablen Ansatz dar, um die prädikatenlogische Widerspruchsfreiheit von Netzmodellen nachzuweisen.

15) Daher erlaubt das Netztheorem von MURATA und ZHANG, sowohl die aussagen- als auch die prädikatenlogische Widerspruchsfreiheit eines Netzmodells nachzuweisen. Im ersten Fall wird auf ein Stelle/Transition-Netz, im zweiten auf ein Synthetisches Kernnetz Bezug genommen. Der zweite Fall deckt auch andere Höhere Netze - wie z.B. Prädikat/Transition-Netze - mit prädikatenlogischer Ausdruckskraft ab.

16) Die Möglichkeit, die logische Widerspruchsfreiheit von Synthetischen Kernnetzen nachzuweisen, wird später als "mittelmäßig" eingestuft, weil sie zwar nicht für operationale, wohl aber noch für deklarative Netzmodelle besteht. Für Erweiterte Synthetische Netze geht diese Nachweismöglichkeit dagegen vollkommen verloren.

17) Vgl. PNUELI (1979), S. 4f.; SIFAKIS (1982), S. 228; ABEL, D. (1990), S. 43 (Verklemmungsfreiheit als spezieller Korrektheitsbeweis).

18) Dies gilt nicht nur für die oben aufgelisteten typischen Netzeigenschaften. Denn an früherer Stelle wurde gezeigt, daß sich alle dynamischen Netzeigenschaften, die in dieser Arbeit von Interesse waren, mit Hilfe der Erreichbarkeitsanalyse von Netzmodellen untersuchen lassen. Daher trifft das Verifizierbarkeitsurteil zumindest auf alle interessanten dynamischen Netzeigenschaften zu. Statische Netzeigenschaften werden hier als Verifizierungskriterien nicht in Erwägung gezogen. Denn sie spielen für die Überprüfung der Korrektheit von Netzmodellen im allgemeinen keine Rolle.

19) Vgl. dazu BERNSTEIN (1974), S. 340.

Wenn die Verifizierung von Netzmodellen ausschließlich auf die o.a. Netzeigenschaften beschränkt bleibt, besteht die Gefahr, falsch formulierte Verifizierungsprobleme richtig zu lösen. Daher droht ein Fehler 3. Art. Vgl. zu dieser Fehlerkategorie die Erläuterungen, die im modelltheoretischen Kontext erfolgten.

20) Die ausführlicheren Erläuterungen der o.a. Netzeigenschaften, die hinsichtlich der Auswertungsmöglichkeiten von Netzmodellen vorgetragen wurden, zeigten aber auf, daß es sich in der Tat um produktionswirtschaftlich interessante Eigenschaften handelt. Nur ist ihre produktionswirtschaftliche Relevanz nicht so offensichtlich, daß sich die Netzeigenschaften unmittelbar als Verifizierungskriterien aufdrängen.

21) Die Verwendung von Integritätsbedingungen überdeckt auch zwei eng verwandte Konzepte, die zur Korrektheitsprüfung von Netzmodellen herangezogen werden könnten. Erstens handelt es sich um einen Vorschlag von KRÄMER (1981), S. 470. Er regt an, für die Modellierung eines Realproblems eine Liste von Formeln zu spezifizieren, die auf jede korrekte Problemmodellierung zutreffen sollen. Dann läßt sich ein Netzmodell dadurch verifizieren, daß untersucht wird, ob das Netzmodell die Gültigkeit aller Formeln aus der vorgegebenen Liste zu garantieren vermag. Diese Formeln lassen sich unmittelbar mit Integritätsbedingungen identifizieren, die unter allen erreichbaren Markierungen des Netzmodells erfüllt sein müssen. Zweitens findet sich bei VALK (1983b), S. 3, und VALK (1983c), S. 343, eine entgegengesetzte Vorgehensweise. Er legt keine Formeln fest, die in allen korrekten Modellierungen gültig sein sollen. Vielmehr konzentriert er sich auf Eigenschaften, die für alle korrekten Modelle unerwünscht sind. Dabei werden solche Modelleigenschaften betrachtet, die sich durch Netzmarkierungen ausdrücken lassen. Beispielsweise kann es sich bei den früher behandelten Deadlockmarkierungen um einen besonders prägnanten Fall solcher unerwünschten Netzmarkierungen handeln. Um ein Netzmodell zu verifizieren, muß überprüft werden, ob es möglich ist, mindestens eine der unerwünschten Netzmarkierungen zu erreichen. Dies kann z.B. auf unmittelbare Weise durch eine Erreichbarkeitsanalyse geschehen. Ebenso ist es möglich, jeder unerwünschten Netzmarkierung eine Integritätsbedingung zuzuordnen, die verletzt ist, sobald die zugehörige unerwünschte Markierung erreicht wird. Dann ist eine mittelbare Überprüfung der Frage, ob sich eine unerwünschte Netzmarkierung erreichen läßt, anhand der zugeordneten Integritätsbedingung möglich. Folglich erweist sich das Konzept der Integritätsbedingungen als so leistungsfähig, daß es auch Verifizierungen von Netzmodellen umfaßt, die sich auf Formellisten oder auf Klassen unerwünschter Markierungen stützen.

22) An früherer Stelle wurde auch dargelegt, daß gewöhnliche Transitionen nicht *garantieren* können, jede mögliche Verletzung einer Integritätsbedingung aufzuzeigen. Dies liegt an der Permissivität des Schaltens von aktivierten gewöhnlichen Transitionen. Denn eine Transition, deren Schaltakt eine Integritätsverletzung darstellen würde, braucht trotz einer Aktivierung nicht unbedingt geschaltet zu werden. Daher können Integritätsverletzungen mit Sicherheit erst dann angezeigt werden, wenn mit dem Schaltzwang von aktivierten obligatorischen oder mit dem Aktivierungsverbot von faktischen Transitionen gearbeitet wird. Bei obligatorischen Transitionen wird eine Integri-

tätsverletzung angezeigt, indem eine ausgezeichnete Stelle markiert wird. Bei faktischen Transitionen läßt sich eine drohende Integritätsverletzung durch den Hinweis auf einen unzulässigen Schaltakt erkennen.

23) Dies schließt aber keineswegs aus, daß mit anderen Netzklassen, die in dieser Arbeit nicht untersucht wurden, die Einhaltung von Integritätsbedingungen durchaus untersucht werden kann. So ist es z.B. oftmals üblich, Stelle/Transition-Netze oder Prädikat/Transition-Netze um faktische Transitionen zu erweitern. In derart angereicherten Netzklassen bereitet die Überprüfung von Integritätsbedingungen keine Schwierigkeiten.

24) In diesem Fall können die obligatorischen oder faktischen Transitionen, die in Erweiterten Synthetischen Netzen die Integritätsbedingungen repräsentieren, durch gewöhnliche Transitionen ersetzt werden. Zwar geht auf diese Weise die Garantie verloren, jede Integritätsverletzung *unmittelbar* anzuzeigen. Aber aufgrund der Erforschung des *gesamten* Erreichbarkeitsgraphen gilt: Falls eine Integritätsbedingung verletzt werden kann, wird im Erreichbarkeitsgraphen irgendwann diejenige Schaltkante entdeckt, deren zugehörige Transition die Integritätsbedingung repräsentiert. Das Schalten der Transition, das durch die Schaltkante ausgedrückt wird, zeigt dann die Verletzung der Integritätsbedingung an.

Allerdings gelten die voranstehenden Erläuterungen nur für endliche Erreichbarkeitsgraphen. Sie liegen zwar für die Modellierungen dieser Arbeit aufgrund der Finitheitsprämisse immer vor. Aber im allgemeinen Fall können auch unendliche Erreichbarkeitsgraphen existieren. In ihnen läßt sich nicht mehr sicherstellen, irgendwann diejenige Schaltkante aufzufinden, die eine Integritätsverletzung anzeigt. Bei Netzmodellen mit unendlichen Erreichbarkeitsgraphen kann jedoch ebensowenig garantiert werden, das integritätsverletzende Schalten einer obligatorischen Transition oder die integritätsverletzende Aktivierung einer faktischen Transition gewahr zu werden. Daher reichen bei infiniten Netzmodellen auch Erweiterte Synthetische Netze nicht aus, um die Einhaltung aller Integritätsbedingungen stets mit Sicherheit zu erkennen.

25) Vgl. zur Anwendung der Invariantenanalyse auf die Konsistenzprüfung (Verifizierung) von Netzmodellen VALETTE (1979b), S. 157; AZEMA (1980), S. 602ff.; WINAND (1980), S. 1252; ROSENSTENGEL (1983); PAGNONI (1990), S. 153ff.

26) Vgl. ebenso VALETTE (1979b), S. 156ff. Dort findet sich eine ausführliche Kritik der Einschränkungen, denen die Verifizierung von Netzmodellen mittels der Invariantenanalyse unterliegt.

27) Vgl. zum folgenden die Erläuterungen zur Invariantenanalyse.

28) Die allgemeinen Interpretationsprobleme der Invariantenanalyse wurden schon herausgestellt. Vgl. zur speziellen Schwierigkeit, Netzinvarianten hinsichtlich der Korrektheit von Netzmodellen zu interpretieren, VALK (1981b), S. 148.

9.2.2.3.2 Eindeutigkeit

Die Forderung nach Eindeutigkeit¹⁾ wird hier in einer speziellen, auf Modellierungsaufgaben bezogenen Weise ausgelegt: Ein Modellierungskonzept gilt als eindeutig, wenn seine Konzeptbestandteile so präzise bestimmt sind²⁾, daß sie von allen Konzeptanwendern jederzeit in der gleichen Weise eingesetzt werden können³⁾. Erwartet wird also die Eindeutigkeit der Konzeptanwendung⁴⁾. Das Petrinetz-Konzept verstößt im wesentlichen⁵⁾ auf dreifache Weise gegen dieses Eindeutigkeitsgebot⁶⁾.

Der ersten Mehrdeutigkeit unterliegen die drei beurteilten Netzklassen ohne Unterschied. Sie erstreckt sich auf die mangelhafte Bestimmtheit des Schaltens von aktivierten Transitionen. Diese Unterbestimmtheit wurde im Zusammenhang mit Stelle/Transition-Netzen ausführlicher behandelt. Sie betrifft einerseits die Frage, auf welche Weise Schaltkonflikte aufgelöst werden sollen. Hierfür sind Konfliktstrategien erforderlich. Andererseits bleibt offen, welchen Umfang Schaltschritte annehmen sollen, wenn mehrere nebenläufig aktivierte Transitionen vorliegen. Um diese Lücke zu schließen, sind Schaltstrategien i.e.S. erforderlich. Konfliktstrategien und eng definierte Schaltstrategien lassen sich zu Schaltstrategien i.w.S. zusammenfassen. In der Netzdefinition einer Netzklasse ist aber keine Information über eine solche Schaltstrategie (i.w.S.⁷⁾) vorgesehen. Statt dessen muß sich der Konzeptanwender selbst eine Schaltstrategie zurechtlegen. Die Schaltstrategieauswahl kann anwenderindividuell variieren. Daher ist der Konzeptbestandteil "Schalten von Transitionen" - trotz seiner zentralen Bedeutung für das Petrinetz-Konzept - nicht eindeutig festgelegt.

Ein zweiter Eindeutigkeitsverstoß betrifft ausschließlich Synthetische Kernnetze⁸⁾. Er liegt immer dann vor, wenn in einem Netzmodell mindestens eine Transition mit mehreren Ausgangskanten existiert⁹⁾. Dann ist zunächst nicht eindeutig festgelegt, ob mehrere Ausgangskanten derselben Transition entweder in ad- oder aber in konjunktiver Weise verknüpft sind. Denn von Synthetischen Kernnetzen werden beide Verknüpfungsarten für die Ausgangslogik einer Transition zugelassen. Wiederum muß der Konzeptanwender entscheiden, welche Alternative er bevorzugt. Bei adjunktiv verknüpften Ausgangskanten resultieren deklarative, bei konjunktiv verknüpften Ausgangskanten dagegen operationale Netzmodelle. Solange die zusätzliche Information über den intendierten Modelltyp nicht vorliegt, bleibt die Verknüpfungslogik von mehreren Ausgangskanten derselben Transition unterbestimmt.

Dieser Bestimmtheitsmangel der Ausgangslogik von Transitionen wirkt sich auf die Forderung nach Eindeutigkeit erheblich aus. Denn die Ausgangslogik von Transitionen gehört zur Definition der Schaltregel eines Netzes. Die Schaltregel ist wiederum eine herausragende Konstituente der Netzdefinition einer Netzklasse. Daher bildet die Gesamtheit aller Synthetischen Kernnetze eine Netzklasse mit zweideutiger Netzdefinition¹⁰⁾. Dieser gravierende Definitionsdefekt wird erst dadurch beseitigt, daß bei Synthetischen Kernnetzen zwischen der Subklasse der deklarativen und der Subklasse der operationalen Netzmodelle unterschieden wird. Daher existieren zwei Netzsubklassen mit jeweils eindeutiger Netzdefinition:

- einerseits deklarative Synthetische Kernnetze und
- andererseits operationale Synthetische Kernnetze.

Bei der Beurteilung der beiden vorgenannten Verstöße gegen die Forderung nach Eindeutigkeit ist allerdings ein weiterführender Gesichtspunkt zu beachten: Jeder Eindeutigkeitsmangel eröffnet einen Freiheitsgrad, den der Modellierungsträger nach seinen Bedürfnissen auszunutzen vermag. Daher kann durchaus ein Interesse daran bestehen, auf die präzisierende - aber zugleich einengende - Fixierung von Schaltstrategien und Ausgangslogiken von Transitionen zu verzichten. Aus diesem Grund wurde das Konzept Synthetischer Netze in dieser Arbeit für beliebige Schaltstrategien offengehalten. Ebenso wurden Synthetische Kernnetze bewußt so umfassend

ausgelegt, daß sie einem Modellierungsträger die Auswahl zwischen deklarativen und operationalen Modellen gestatten.

Eine dritte Verletzung der Eindeutigkeitsforderung läßt sich nicht mehr durch gewollte Freiräume für einen Modellierungsträger rechtfertigen. Sie betrifft ausschließlich Stelle/Transition-Netze¹¹⁾. Ihre Schaltregel ist nicht eindeutig bestimmt, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind. Erstens müssen für Stellen beschränkte Markkapazitäten zugelassen sein. Zweitens muß es sich um Stelle/Transition-Netze handeln, in denen 1-Schleifen erlaubt sind. Stelle/Transition-Netze, die keiner Einschränkung unterliegen, werden beiden Voraussetzungen gerecht. In diesem allgemeinen Fall bleibt es offen, ob bei der Überprüfung der Aktivierung einer Transition die Brutto- oder die Nettoeffekte ihrer Schaltwirkung berücksichtigt werden sollen¹²⁾. Darüber hinaus legt die Schaltregel von Stelle/Transition-Netzen nicht eindeutig fest, ob unter derselben Markierung für dieselbe Transition ein multiples Schalten zulässig ist. In dieser Arbeit wurden die beiden Präzisierungslücken durch zusätzliche Vereinbarungen geschlossen: Bei der Aktivierung einer Transition wird eine Kombination aus Brutto- und Nettoeffekten berücksichtigt. Multiples Schalten einer Transition wird grundsätzlich nicht zugelassen.

Es wurden vier Aspekte des Petrinetz-Konzepts aufgezeigt, die dem Eindeutigkeitspostulat nicht gerecht werden. Allerdings erweisen sie sich nicht als schwerwiegend. Denn die Eindeutigkeitsmängel lassen sich ohne größere Schwierigkeiten heilen. Dies wurde schon zuvor aufgezeigt: Die Netzdefinitionen der drei Netzklassen können durch Informationen über die eingesetzten Schaltstrategien ergänzt werden. Bei der Klasse der Synthetische Kernnetze ist es möglich, sich entweder auf deklarative oder aber auf operationale Netzmodelle festzulegen. Für Stelle/Transition-Netze reicht eine Entscheidung zwischen Brutto- und Nettoeffekten aus. Danach liegen entsprechend präzierte Netz(sub)klassen vor, die jeweils eine eindeutige Anwendung des Petrinetz-Konzepts festlegen.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. JORDAN (1978), S. 8; YOELI (1982b), S. 2; BEKHI (1989), S. 245; DITTRICH, G. (1989b), S. 1; JÄHNICHEN (1990), S. 5.

2) Das Kriterium der Konzeptindeutigkeit läßt sich daher ebenso als Kriterium der Konzeptpräzision ansprechen. Der Verf. bevorzugt hier den Eindeutigkeitsbegriff, weil Verletzungen der Eindeutigkeit unmittelbar festgestellt werden können. Beurteilungen der Präzision erforderten dagegen zunächst eine Erörterung des zugrundeliegenden Präzisionsmaßstabs.

Das Eindeutigkeitskriterium überschneidet sich aufgrund seines Präzisionsbezugs mit dem nachfolgend behandelten Kriterium der Formalisierung. Denn auch die Formalisierung eines Modellierungskonzepts trägt zu seiner Präzision bei.

3) Ob die Anwender eines Modellierungskonzepts dessen Bestandteile *tatsächlich* in gleicher Weise anwenden, hängt auch von der Bereitschaft der Konzeptanwender ab, die Anwendungsbestimmungen des Modellierungskonzepts zu befolgen. Diese Bereitschaft stellt aber keine Eigenschaft des zu beurteilenden Modellierungskonzepts dar. Daher wird hier nur gefordert, daß die Konzeptbestandteile so präzise bestimmt sein sollen, daß sie von "gutwilligen" Konzeptanwendern grundsätzlich in der gleichen Weise eingesetzt werden *können*.

4) Wegen der geforderten Unabhängigkeit der Konzeptanwendung von der *Person* des Konzeptanwenders kann von einer interpersonalen oder transsubjektiven Invarianz der Konzeptanwendung gesprochen werden. Da ein Modellierungskonzept *jederzeit* in der gleichen Weise eingesetzt werden soll, läßt sich von einer intertemporalen Invarianz der Konzeptanwendung reden. Sofern die intertemporale Anwendungsinvarianz auf denselben Konzeptanwender bezogen wird, liegt eine intrapersonale Invarianz der Konzeptanwendung vor.

Die Konkretisierung des Eindeutigkeitskriteriums durch die Eindeutigkeit der Konzeptanwendung grenzt zugleich andere Eindeutigkeitsinterpretationen aus. Dazu gehören vor allem die Forderungen nach eindeutigen Modellierungsergebnissen oder nach eindeutigen Ausführungen von Modellierungsprozessen.

Die Eindeutigkeit der Modellierungsergebnisse wird hier nicht verlangt. Statt dessen soll der Freiraum bestehen, dasselbe Modellierungsobjekt je nach Interessenlage des Modellierungsträgers auf verschiedene Weise zu repräsentieren. Z.B. können Objektmodellierungen aus divergierenden Perspektiven der Problemwahrnehmung oder auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen in Betracht gezogen werden. Ein anschauliches Exempel für diese gewollte Ergebnismehrdeutigkeit findet sich bei GENRICH (1980a), S. 86ff., und REISIG (1982d), S. 6ff. Dort wird dasselbe Modellierungsobjekt - der Zugriff auf eine Datenbank - durch strukturell verschiedene Petrinetze repräsentiert. Es läßt sich eine Vielzahl weiterer Beispiele für die Ergebnismehrdeutigkeit des Petrinetz-Konzepts anführen. Im folgenden werden nur einige wenige herausgestellt, um die Fülle mehrdeutiger Modellierungsergebnisse zu veranschaulichen.

Ein Aspekt der Ergebnismehrdeutigkeit, der bei der Verwendung von Synthetischen Netzen auftritt, wurde schon erwähnt: Wenn die Eigenschaft eines Objekts repräsentiert werden soll, kann dies grundsätzlich auf zwei verschiedene Weisen erfolgen. Entweder wird das Objekt durch die Kopie einer objektartspezifischen Attributmarke wiedergegeben. Die Objekteigenschaft läßt sich dann durch ein Attribut der Marke repräsentieren. Oder dasselbe Objekt wird durch ein Teilnetz erfaßt. In diesem Fall kann jede Ausprägung der Objekteigenschaft durch ein einstelliges Prädikatssymbol repräsentiert werden, das einer Stelle aus dem Teilnetz zugeordnet ist. Es steht in der Freiheit des Modellierungsträgers, welche Art der Objektdarstellung und Eigenschaftsrepräsentation er in einem Netzmodell bevorzugt. Er kann auch beide Modellierungsweisen innerhalb desselben Netzmodells miteinander kombinieren, wenn er sie auf verschiedenartige Objekte anwendet. In der früher präsentierten Fallstudie wurde z.B. die Objektart "Bearbeitungsstation" durch ein stationspezifisches Netzmodul (Teilnetz) repräsentiert. Die unterschiedlichen Zustände einer Bearbeitungsstation, die nichts anderes als Ausprägungen von Objekteigenschaften darstellen, wurden durch entsprechende Prädikatssymbole erfaßt. Die Modellierung der Objektart "Werkstück" erfolgte dagegen mit der Hilfe einer Werkstückmarke. Koordinierungsrelevante Werkstückeigenschaften wurden durch die Attribute der Werkstückmarke repräsentiert.

Falls sich der Modellierungsträger zugunsten der markenbezogenen Objekt- und Eigenschaftsmodellierung entschieden hat, eröffnet sich ihm ein weiterer Freiheitsgrad. Sobald *mehrere* Eigenschaften desselben Objekts repräsentiert werden sollen, können die Eigenschaften entweder durch ein "flaches" Tupel aus Markenattributen repräsentiert werden. Oder es wird auf eines von mehreren denkmöglichen "tiefen" Attributetupeln zurückgegriffen, in denen hierarchische Unter- und Überordnungsbeziehungen zwischen den repräsentierten Eigenschaften zum Ausdruck gelangen.

Des weiteren können Schaltvoraussetzungen für Transitionen mitunter auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden. Dieser Gestaltungsspielraum besteht z.B., wenn eine Transition nur dann aktiviert sein soll, falls sich auf einer ihrer Eingangsstellen eine Markenkopie mit einer bestimmten Attributausprägung "at_q" befinden soll. Diese Aktivierungsbedingung läßt sich auf zwei Weisen erfassen. Entweder erhält die Eingangskante, welche die Transition mit der betroffenen Eingangsstelle verknüpft, das Kantengewicht "<...,at_q,...>". Oder die Transition umfaßt in ihrer Schaltvoraussetzung die Restriktionsformel "X=at_q". Bei dieser Alternative wird die Eingangskante mit dem variablen Kantengewicht "<...,X,...>" versehen.

Ein Freiheitsgrad besteht auch bei der Repräsentation von Entscheidungsalternativen. Erstens können sie als ein Knappheitskonflikt zwischen mehreren konfliktionär aktivierten Transitionen modelliert werden. Zweitens lassen sie sich als ein Abundanzkonflikt einer multipel aktivierten Transition erfassen. Drittens kommt eine Makrotransition mit disjunktiver Ein- oder Ausgangslogik in Betracht, falls sie so aktiviert ist, daß für ihr Schalten zwischen mehreren Ein- bzw. Ausgangskanten ausgewählt werden muß. Alle drei Repräsentationsoptionen stehen bei der Verwendung von Erweiterten Synthetischen Netzen offen.

Darüber hinaus bietet das Petrinetz-Konzept verschiedenartige Netzkonstruktionen an, um zeitbezogene Problem-determinanten zu repräsentieren. In dieser Arbeit wurden transitions-, stellen- und markenbezogene Modellierungsansätze unterschieden. Diese Ansätze führen zwar zu strukturell verschiedenen Zeitnetzen. Sie können daher nicht innerhalb derselben Netzklasse angewendet werden. Dies ändert aber nichts an der Ergebnismehrdeutigkeit des Petrinetz-Konzepts als Gesamtheit. Denn dieselbe temporale Determinante wird in strukturell verschiedenen Netzmodellen repräsentiert je nachdem, welche Zeitnetzart zugrundeliegt. Ein anderer konstruktiver Spielraum wurde für die Netzrepräsentation von Integritätsformeln aufgezeigt.

Schließlich wurde im Rahmen des Petrinetz-Konzepts die interessante Frage aufgeworfen, ob sich bei einer fest vorgegebenen Spezifizierung des erwünschten Modellverhaltens definitiv erkennen läßt, daß entweder genau ein spezifikationserfüllendes Netzmodell oder aber mehrere, strukturell verschiedene spezifikationserfüllende Netzmodelle existieren; vgl. VALK (1980), S. 5. Diese Frage konnte bis heute nicht abschließend beantwortet werden. Daher muß grundsätzlich damit gerechnet werden, daß die eindeutige Spezifizierung des intendierten Modellverhaltens nicht ausreicht, um das Ergebnis eines Modellierungsprozesses - das Netzmodell - eindeutig zu determinieren. Auch dieser Sachverhalt spricht gegen die Ergebniseindeutigkeit des Petrinetz-Konzepts. Sie interessiert hier aber nicht weiter, weil nur die Eindeutigkeit der Konzeptanwendung durch unterschiedliche Modellierungsträger beurteilt wird.

Ebensowenig wird die Eindeutigkeit der Ausführung von Modellierungsprozessen verlangt. Statt dessen wird z.B. die nebenläufige Ausführung einzelner Modellierungsphasen zugelassen. Dafür kommen z.B. die Konstruktion neuer Modellmodule und die Verifizierung von bereits vorliegenden Modulen in Betracht. Aufgrund der kausalen Unabhängigkeit von nebenläufigen Teilprozessen wäre es eine unnötige Einschränkung, solchen Teilprozessen (Phasen) eine eindeutige Ausführungsreihenfolge vorzuschreiben. Hieran zeigt sich, daß die charakteristische Nebenläufigkeit von Petrinetzen auch auf die Anwendung des Petrinetz-Konzepts Modellierungszwecken übertragen werden kann. In dieser Hinsicht läßt sich von einer "reflexiven Überhöhung" der netzspezifischen Nebenläufigkeit sprechen.

5) Eine vierter Eindeutigkeitsmangel betrifft das Extensionalitätsaxiom für Bedingung/Ereignis- und Stelle/Transition-Netze. In einer früheren Anmerkung wurde aufgezeigt, daß sich Mehrdeutigkeiten bei der formalen Axiomdefinition durch Extensionalitätsprädikate ergeben, sobald unreine Netze mit 1-Schleifen zugelassen werden. Auch die natürlichsprachlichen Formulierungen, die für das Extensionalitätsaxiom verwendet werden, fallen dann inhaltlich auseinander. Allerdings wird diese Mehrdeutigkeit hier nicht als gravierend eingestuft. Denn axiomatische Aspekte des Petrinetz-Konzepts spielen in dieser Arbeit keine herausragende Rolle.

Darüber hinaus wird die Aufzählung von Eindeutigkeitsverletzungen nur auf die hier beurteilten drei Netzklassen bezogen. Das schließt keineswegs weitere Mehrdeutigkeiten aus, die in anderen Netzklassen existieren. Beispielsweise besitzt die Netzklasse, die dem Programmpaket PASIPP zugrundeliegt, eine zweideutige Definition für die Markenkapazitäten von Stellen. Diese zusätzliche Mehrdeutigkeit wird hier aber nicht weiter beurteilt, weil in dieser Arbeit nur eine von den beiden Kapazitätsdefinitionen benutzt wurde. Prädikat/Transition-Netze leiden darunter, daß der ontologische Status ihrer Individuen-Tupel nicht eindeutig geklärt ist.

6) Daher kann sich der Verf. nicht dem Urteil anschließen, das Petrinetz-Konzept gewährleiste eindeutige Modellierungen. Vgl. zu dieser abweichenden Ansicht TOURRES (1976), S. 217 (als Vermeiden von Mehrdeutigkeit); WHITE, G. (1977), S. 159; VALETTE (1979b), S. 157; MEKLY (1980), S. 422; BECKER, B. (1991), S. 30.

Allerdings räumt der Verf. ein, daß den vorgenannten Quellen ein anderes Eindeutigkeitsverständnis zugrundeliegen mag, als es oben festgesetzt wurde. Vgl. dazu auch die Hinweise auf alternative Eindeutigkeitsinterpretationen, die in einer früheren Anmerkung erfolgten. Dieser Aspekt wird hier aber nicht weiter vertieft, weil den Quellen nicht klar entnommen werden kann, welche Eindeutigkeitsauffassung dort konkret vertreten wird.

Dagegen wendet sich der Verf. nicht von vornherein gegen die Einschätzung, daß sich das Petrinetz-Konzept anbiete, um Mehrdeutigkeiten bei der Modellierung aufzudecken. Diese Meinung vertritt z.B. MELDMAN (1971), S. 65. Die Mehrdeutigkeit des Petrinetz-Konzepts bedeutet nicht, daß Netzmodelle in jeder Hinsicht mehrdeutig sind. Vielmehr erstrecken sich die Eindeutigkeitsmängel - wie nachfolgend erläutert - auf wohlbestimmte Bestandteile des Petrinetz-Konzepts. Solange diese Konzeptbestandteile nicht berührt werden, besteht auch kein Zweifel an der Eindeutigkeit des Petrinetz-Konzepts. Daher können Netzmodelle, die in diesem - begrenzten - Ausmaß eindeutig bestimmt sind, durchaus benutzt werden, um Mehrdeutigkeiten in *anderen* Modellierungskonzepten aufzudecken. Dabei wird vorausgesetzt, daß das Petrinetz-Konzept und das alternative Modellierungskonzept jeweils auf dasselbe Modellierungsobjekt angewendet werden.

7) Auf den präzisierenden Zusatz "i.w.S." wird fortan verzichtet, weil nur noch weit aufgefaßte Schaltstrategien thematisiert werden.

8) Erweiterte Synthetische Netze sind nicht betroffen, weil sie von vornherein auf operationale Netzmodelle beschränkt werden.

9) Auf diesen Aspekt wird aus der Perspektive der Konzepteinheitlichkeit später noch einmal eingegangen.

10) Bei der Zweideutigkeit der Netzdefinition handelt sich keineswegs nur um einen definatorischen oder "bloß formalen" Mangel. Vielmehr zieht er auch inhaltlich bedeutsame Konsequenzen nach sich. Die wichtigste Auswirkung besteht darin, daß sich die strenge prädikatenlogische Konsistenzanalyse nur für deklarative, nicht aber für operationale Netzmodelle durchführen läßt. Daher kann es eine erhebliche Rolle spielen, ob - innerhalb derselben Netzklasse - entweder ein deklarativ oder aber ein operational definiertes Netzmodell konstruiert worden ist.

11) Für Synthetische Kernnetze trifft die nachfolgende Zweideutigkeit von Brutto- und Nettoeffekten nicht zu, da ihre Schaltregel von vornherein so definiert wurde, daß nur die Nettoeffekte beachtet werden. Gleiches gilt für die Erweiterten Synthetischen Netze, bei denen dieser Schaltregelaspekt unverändert übernommen wurde.

12) Diese Problematik wurde an früherer Stelle ausführlicher diskutiert. Sie führt unter anderem dazu, daß 1-Schleifen in Stelle/Transition-Netzen eine vollkommen unterschiedliche Qualität besitzen je nachdem, ob der Aktivierung ihrer Transitionen entweder Netto- oder aber Bruttoeffekte zugrundeliegen. Da beide Effekte in Frage kommen, sind die Aktivierungsbedingungen von Transitionen so lange mehrdeutig definiert, wie keine explizite Festlegung auf genau einen Effekt erfolgt.

9.2.2.3.3 Formalisierung

Die Formalisierung¹⁾ eines Modellierungskonzepts kann in mehreren Abstufungen betrachtet werden. Auf der ersten Stufe steht die Forderung nach einer vollständig formalsprachlichen Modelldefinition. Eine weiterreichende Formalisierung wird geboten, wenn die Modelldefinition in einem formalen Fundament verankert werden kann. Dabei werden logische oder mathematische Theorien als Inbegriff eines ausgereiften formalen Fundaments betrachtet. Schließlich wird der höchste Formalisierungsgrad erreicht, wenn es gelingt, das Modellierungskonzept über einer axiomatischen Basis zu errichten.

Die Vollständigkeit der formalsprachlichen Modelldefinition wird von den drei Netzklassen in unterschiedlicher Weise erfüllt²⁾. Stelle/Transition-Netze leiden zunächst hinsichtlich ihrer Schaltregel unter einem Formalisierungsdefizit. Es läßt sich aber ohne Schwierigkeiten beheben. Synthetische Kernnetze wurden von vornherein als umfassend formalsprachlich definierte Konstrukte eingeführt. Für Erweiterte Synthetische Netze wurde dagegen auf eine vollständige Formalisierung ihrer neuartigen Netzkonstrukte verzichtet. Statt dessen erfolgten nur Hinweise darauf, wie sich einzelne Konstrukte formal definieren oder durch eine formale Implementierungssprache ausdrücken lassen. Daher besitzen Erweiterte Synthetische Netze in der Form, in der sie in dieser Arbeit präsentiert wurden, nur einen niedrigen Formalisierungsgrad. Es bestehen aber keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, die Formalisierungslücken in späteren Ausarbeitungen zu schließen.

Die umfangreiche und tiefe logisch-mathematische Fundierung des Petrinetz-Konzepts ist weithin anerkannt³⁾. Sie wurde in den vorliegenden Untersuchungen nur in dem Ausmaß entfaltet, wie es für die Definition und die spätere Beurteilung des Konzepts Synthetischer Netze erforderlich erschien⁴⁾. Dies betrifft insbesondere⁵⁾ das prädikatenlogische und das algebraische Fundament der Synthetischen Netze. Auf weitere formale Grundlagen des Petrinetz-Konzepts wurde dagegen weniger intensiv oder überhaupt nicht eingegangen, weil sie für die Thematik dieser Arbeit keine besondere Rolle spielen. Um die Breite und Tiefe des formalen Fundaments von Petrinetzen einschätzen zu können, ist jedoch zumindest ein Überblick über die Spannweite seiner theoretischen Basis erforderlich. Daher werden die wesentlichen logischen und mathematischen Disziplinen, die dem Petrinetz-Konzept zugrundeliegen, stichwortartig aufgelistet:

- Aussagen- und Prädikatenlogik,
- modale, dynamische und temporale Logiken,
- Mengen- und Relationentheorie,
- Kategorientheorie,
- Topologie,
- Graphentheorie⁶⁾,
- PRESBURGER-Arithmetik,
- lineare Algebra⁷⁾,
- sortierte Algebra⁸⁾,
- Automatentheorie⁹⁾,
- Theorie formaler Sprachen.

Hinsichtlich dieser formalen Fundamente läßt sich eine deutliche Zäsur zwischen Stelle/Transition-Netzen einerseits sowie Synthetischen Kernnetzen und Erweiterten Synthetischen Netzen andererseits feststellen. Denn die beiden letztgenannten Netzklassen sind in allen vorgenannten formalen Fundamenten verankert. Stelle/Transition-Netze unterliegen dagegen zwei wesentlichen Einschränkungen. Wegen ihrer begrenzten Ausdrucksmächtigkeit reichen sie über

Aussagenlogik und PRESBURGER-Arithmetik nicht hinaus. Daher bleiben ihnen Prädikatenlogik bzw. sortierte Algebra als formale Fundamente verschlossen.

Über die formale Fundierung hinaus weist die Forderung, ein Modellierungskonzept solle sich auf eine axiomatische Basis zurückführen lassen¹⁰⁾. Ein entsprechender Anspruch wurde für das Petrinetz-Konzept schon früh erhoben¹¹⁾. Aber zunächst wurden formale Netzdefinitionen für diverse Netzklassen entwickelt und ihre theoretischen Fundamente erforscht. Erst mit einiger zeitlicher Verzögerung gelang es, eine axiomatische Basis des Petrinetz-Konzepts zu rekonstruieren¹²⁾. Sie leistet im wesentlichen eine Axiomatisierung von halbgeordneten Ereignismengen. Im Rahmen dieser Axiomatisierung werden zwei zentrale Aspekte des Petrinetz-Konzepts erklärt: Einerseits handelt es sich um die kausale Unabhängigkeit - die Nebenläufigkeit - von Ereignisgeschehnissen. Andererseits läßt sich in den Geschehniszusammenhang von halbgeordneten Ereignismengen das umfassende Konzept nebenläufiger Prozesse¹³⁾ einbetten.

Allerdings beruht die Axiomatisierung des Petrinetz-Konzepts auf einer eigenständigen Netzklasse: den Geschehnisnetzen (occurrence nets). Daher trifft diese axiomatische Basis auf die hier untersuchten Netzklassen nur in dem Ausmaß zu, wie es gelingt, die Netzklassen auf die Klasse der Geschehnisnetze zurückzuführen¹⁴⁾. Für Stelle/Transition-Netze ist dies - mit Abstrichen - noch möglich¹⁵⁾. Die Einschränkungen betreffen vor allem die problematische Behandlung von 1-Schleifen¹⁶⁾ und den Umgang mit Stellen, deren Markkapazitäten keinen Beschränkungen unterliegen¹⁷⁾. Falls solche Problemfälle ausgeklammert werden, läßt sich zu Recht von einer axiomatischen Basis der Stelle/Transition-Netze sprechen. Ob die vorgenannten Problemfälle für wesentlich gehalten werden, bleibt letztlich der subjektiven und situationsabhängigen Einschätzung des Beurteilenden überlassen. Der Verf. räumt den Problemfällen nur geringes Gewicht ein, weil in seinen Modellierungen weder 1-Schleifen noch Stellen mit unbeschränkten Markkapazitäten eine beachtenswerte Rolle spielen¹⁸⁾. Daher gesteht er Stelle/Transition-Netzen zu, die Forderung nach Axiomatisierung in hohem Ausmaß zu erfüllen.

Für Synthetische Kernnetze fällt das Abstrahieren von Problemfällen schon erheblich schwerer. Zwar könnte darauf hingewiesen werden, daß Synthetische Kernnetze "im Prinzip" mit Prädikat/Transition-Netzen übereinstimmen. Prädikat/Transition-Netze lassen sich ihrerseits auf Stelle/Transition-Netze zurückführen. Folglich trifft die axiomatische Basis von Stelle/Transition-Netzen via Prädikat/Transition-Netze auch auf Synthetische Kernnetze zu. Diese Argumentation übersieht jedoch - über die o.a. Einschränkungen für Stelle/Transition-Netze hinaus¹⁹⁾ - zwei gravierende Schwierigkeiten. Erstens weichen Synthetische Kernnetze von Prädikat/Transition-Netzen in einigen Besonderheiten ab, die erhebliche Zweifel daran aufkommen lassen, ob Synthetische Kernnetze tatsächlich auf Prädikat/Transition-Netze oder Stelle/Transition-Netze reduziert werden können²⁰⁾. Als pars pro toto wird auf das allgemeine Übergangsschema verwiesen, das für die Spezifizierung der Schaltprozedur einer Transition entwickelt wurde. Der Verf. sieht keinen Ansatz, dieses Übergangsschema mit den Ausdrucksmitteln von Prädikat/Transition-Netzen oder Stelle/Transition-Netzen zu rekonstruieren. Zweitens trifft die oben angeführte Behauptung, Prädikat/Transition-Netze ließen sich auf Stelle/Transition-Netze zurückführen, nur auf *endliche* Prädikat/Transition-Netze zu. Denn der Reduktionszusammenhang zwischen den beiden Netzklassen beruht auf einer Entfaltungsoperation. Die Entfaltung eines Prädikat/Transition-Netzes führt nur dann zu einem endlichen²¹⁾ Stelle/Transition-Netz, wenn die Definitionsbereiche der "Individuen" eines Prädikat/Transition-Netzes endlich sind. Dies muß jedoch keineswegs der Fall sein. Daher scheitert die Reduzierung eines Prädikat/Transition-Netzes auf ein endliches Stelle/Transition-Netz, sobald das Prädikat/Transition-Netz für seine Individuen mindestens einen unendlichen Definitionsbereich aufweist. Den Definitionsbereichen von Individuen in Prädikat/Transition-Netzen entsprechen in Synthetischen Kernnetzen die Definitionsbereiche der Attribute von Attributmarken. Wie die exemplarische Modellierung eines Realproblems in der Fallstudie zeigte, gehören unendliche Definitionsbereiche von Attributen durchaus zur "natürlichen" Repräsentation alltäglicher Sachverhalte²²⁾.

Aus den beiden vorgenannten Gründen ist die axiomatische Basis von Synthetischen Kernnetzen in größere Ferne gerückt. Allerdings kann auf den Umstand verwiesen werden, daß zwei zentrale Konzepte, die in der axiomatischen Basis der Geschehnisnetze verwurzelt sind, auch in Synthetischen Kernnetzen eine bedeutsame Rolle spielen. Es handelt sich um die Nebenläufigkeit von Ereignisgeschehnissen²³⁾ und die Definition nebenläufiger Schaltprozesse. Vor diesem Hintergrund läßt sich immerhin noch von einem Axiomatisierungsrest sprechen.

Bei Erweiterten Synthetischen Netzen geht die Anbindung an die axiomatische Basis der Geschehnisnetze dagegen vollkommen verloren. Zwar beruhen auch Erweiterte Synthetische Netze auf nebenläufigen Ereignisgeschehnissen und Schaltprozessen. Aber die neuartigen Netzkonstrukte, die bei der Erweiterung des Kernkonzepts Synthetischer Netze eingeführt werden, lassen sich im allgemeinen Fall überhaupt nicht mehr auf Geschehnisnetze zurückführen²⁴⁾. Beispielsweise gestatten es Geschehnisnetze nicht, die Nulltestfähigkeit von Inhibitorkanten oder die Schaltprioritäten von Transitionen zu rekonstruieren.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. zur Forderung nach Formalisierung HELMER (1959), S. 25; MEYER, W. (1972), S. 503; OPP, K. (1976), S. 320ff., 343ff. u. 376; ESSER, H. (1977a), S. 183f.; DELAHAYE (1987), S. 38; DITTRICH, G. (1989b), S. 1. Die Präferenz für formalisierte Konzepte wurde schon gerechtfertigt.

Mitunter wird auch nicht unmittelbar die Formalisierung eines Konzepts empfohlen. Statt dessen werden schwächere Anforderungen gestellt, wie z.B. der Wunsch nach Exaktheit, Präzision oder Genauigkeit. Für die Erfüllung solcher Postulate ist die Konzeptformalisierung keineswegs notwendig. Aber sie erweist sich als hinreichend. Da das Petrinetz-Konzept ohnehin in formaler Aufbereitung vorliegt, wird darauf verzichtet, nach anderen Ansätzen zu suchen, mit deren Hilfe sich die vorgenannten Anforderungen ebenso erfüllen lassen. Vgl. zu solchen schwächeren Anforderungen nach Exaktheit, Präzision oder Genauigkeit, die hier als Synonyma betrachtet werden: HELMER (1959), S. 25f.; STEGMÜLLER (1970a), S. 373; POPPER (1972a), S. 31; ALBERT, H. (1976a), Sp. 4680; OPP, K. (1976), S. 226ff.; CHMIELEWICZ (1979), S. 38; ALBERT, H. (1987), S. 96, 105, 147 u. 161; SCHANZ (1988b), S. 20f.

2) Die Formalsprachlichkeit von Netzmodellen wird nur selten explizit thematisiert.

3) Vgl. PATIL (1971), S. 1; HOLT, A. (1971), S. 202; HACK, M. (1972), S. 7; LAUTENBACH (1973), S. 1; SCHMID, H. (1974), S. 165; LAUTENBACH (1974a), S. 187; LIEN (1974a), S. 1; FERNANDEZ (1975), S. 1; LOCKEMANN (1975), S. 9; AGERWALA (1975), S. 17; HOLT, A. (1975d), S. 157; TOURRES (1976), S. 217; MOALLA (1976b), S. 117; LIEN (1976b), S. 251; HOLT, A. (1976), S. 146; MELDMAN (1977), S. 32f. u. 36; SIFAKIS (1977a), S. 75; PETERSON, J. (1977), S. 223; KRIEG, B. (1977), S. 1; COTRONIS (1977), S. 198; ZERVOS (1977), S. 6; JONES, N. (1977), S. 277; TRIER (1977), S. 48; ZISMAN (1977), S. 25; PETERSON, J. (1978a), S. 144; GENRICH (1978b), S. 84; OBERQUELLE (1979a), S. A.1; PRIESE (1979), S. 4; HOLT, A. (1979), S. 40; GRIESE, W. (1979), S. 1; SIFAKIS (1979b), S. 93; MAYR, E. (1980a), S. 1; RAMAMOORTHY (1980), S. 441; PERL (1980), S. 11.1; HRUSCHKA (1980a), S. 269; MEKLY (1980), S. 422; ZUBEREK (1980), S. 88; OBERQUELLE (1980), S. 505f.; VALK (1981a), S. 299; PETERSON, J. (1981), S. 1; SCHNUPP (1981), S. 61; HURA (1982c), S. 433; JOHNSON, R.R. (1982), S. 74; GIRAULT (1982a), S. 0.1; HACKMANN (1982), S. 22 u. 83; NELSON, R.A. (1982), S. 5; CHRISTODOULAKIS (1982), S. 117 (mit der seltenen Unterscheidung zwischen einer horizontalen Fundierung durch Netzinvarianten und einer vertikalen Fundierung durch Netzmorphismen); KRÄMER (1983a), S. 231; MÜLLER-SILVA (1984a), S. 45; BEKHI (1989), S. 245; PINCI (1990b); ROSENSTENGEL (1991), S. VII, 2 u. 4; KIEBLER (o.J.), S. 40.

Des öfteren wird die formale Eleganz des logisch-mathematischen Fundaments hervorgehoben; vgl. LIEN (1974a), S. 1; AGERWALA (1975), S. 17; PETRI, C. (1976b), S. 11; LIEN (1976b), S. 251; SIFAKIS (1977b), S. 17; ELLIS, C.J. (1979), S. 5; PRIESE (1979), S. 4; SIFAKIS (1979b), S. 93; JOHNSON, R.R. (1982), S. 75.

Ebenso wird die Petrinetz-Theorie, die auf diesem Fundament errichtet wurde, mitunter als intensiv erforschte und tiefeschürfende Theorie gewürdigt; vgl. ZERVOS (1977), S. 16; BAER, J. (1977), S. 395; NELSON, R.A. (1982), S. 53.

Ein indirekter Hinweis auf die formale Fundierung des Petrinetz-Konzepts mag auch darin gesehen werden, daß zuweilen seine Abstraktheit hervorgehoben wird; vgl. PATIL (1971), S. 1; SCHMID, H. (1974), S. 165; LAUTENBACH (1974a), S. 187; LOCKEMANN (1975), S. 9; PETERSON, J. (1977), S. 223; ZUBEREK (1980), S. 88; STARKE (1980), S. 0; HURA (1982c), S. 433.

4) Beispielsweise mußte für die Definition sortierter Marken zuvor das Formulierungspotential einer algebraisch erweiterten, sortierten Prädikatenlogik erschlossen werden. Ebenso läßt sich die Operationalität von Synthetischen Netzen nur dann umfassend beurteilen, wenn die operationale Dimension prädikatenlogischer Beweistechniken bekannt ist. Zumindest dürfte es erhebliche Schwierigkeiten bereiten, das Phänomen der Semi-Entscheidbarkeit, das eine gravierende Operationalitätsschranke darstellt, ohne entsprechendes prädikatenlogisches Vorwissen zu würdigen.

5) Daneben wurden auch Multimengen ausführlicher behandelt. Sie besitzen jedoch weniger den Charakter eines Fundaments. Eher lassen sie sich als formale Konstrukte mit Hilfsfunktion einstufen.

6) Vgl. BYRN (1974), S. II-6; NELSON, R.A. (1982), S. 53; THOME, R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 5; SCHMITZ, P. (1991), S. V.

7) Vgl. THOME, R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 5. Die lineare Algebra liegt vornehmlich der Auswertung jener Gleichungssysteme zugrunde, die für die Ermittlung von Netzinvarianten gelöst werden müssen. Es mag darüber gestritten werden, ob bei jenen Auswertungstechniken für lineare Gleichungssysteme von einer "Algebra" gesprochen werden darf. Denn diese Form der linearen Algebra beruht im Prinzip nur auf den arithmetischen Grundrechenarten für Ganzzahlen. Damit bleibt sie weit hinter jenem algebraischen Ansatz zurück, der in dieser Arbeit als sortierte Algebra behandelt wurde. Dennoch hält der Verf. hier am Begriff der linearen Algebra fest, weil er sich für die arithmetische Auswertung linearer Gleichungssysteme weithin etabliert hat.

8) Darüber hinaus bestehen auch enge Beziehungen zwischen Petrinetzen und algebraischen Modellierungskonzepten für Systeme aus nebenläufigen Prozessen; vgl. WINKOWSKI (1982), S. 323.

9) Vgl. PASSINO (1988a), S. 626ff., insbesondere S. 627 (dort werden Petrinetze in der typischen Gestalt von abstrakten Automaten behandelt, ohne daß explizit von Automaten gesprochen wird). Vgl. auch den Hinweis auf "Petrinetz-Computer" an früherer Stelle.

10) Vgl. zur Forderung, formale Konzepte sollten eine axiomatische Basis besitzen ("Axiomatisierung"), CARNAP (1959a), S. 18ff.; HELMER (1959), S. 26; CARNAP (1961), S. 2f.; ALBERT, H. (1964), S. 54f.; CARNAP (1968), S. 67 u. 69f.; MEYER, W. (1972), S. 503; JEHLE (1973), S. 155f. u. 159ff. (kritisch distanziert); STÄHLIN (1973), S. 17 u. 62; RESCHER (1974), S. 698ff. u. 702; WEINBERG (1974), Sp. 362ff.; OPP, K. (1976), S. 311, 321ff., 343ff., 376 u. 417; STEGMÜLLER (1976b), S. 376ff.; WOSSIDLO (1976), S. 477ff.; HOLT, A. (1976), S. 139; RESCHER (1979), S. 40ff.; RESCHER (1985b), S. 65f.; STEGMÜLLER (1986a), S. 469ff.; SCHANZ (1988b), S. 29ff. u. 50.

Ein wesentliches Motiv von Axiomatisierungen besteht darin, einem formalen Konzept den Charakter einer Ad hoc-Konstruktion zu nehmen. Denn seine Rückführung auf eine axiomatische Basis soll die Wohlfundiertheit des Konzepts offenlegen. Allerdings beruht diese Qualifizierung auf der Präsupposition, daß die Axiome selbst keinen Ad hoc-Charakter tragen, sondern als "evident", "natürlich" oder ähnlich erscheinen. Etliche Axiomensysteme lassen aber erhebliche Zweifel aufkommen, ob sie tatsächlich diese Präsupposition erfüllen. Sie erwecken dann den Eindruck, ex post so konstruiert worden zu sein, daß sie ein formales Konzept nachträglich als "fundiert" erscheinen lassen. Der Ad hoc-Charakter eines formalen Konzepts wird in solchen Fällen aber nicht beseitigt, sondern pflanzt sich in seine axiomatische Basis fort. Die erforderliche "Evidenz" oder "Natürlichkeit" läßt sich dann kaum noch entdecken. Vielmehr verkümmert die Existenzberechtigung der betroffenen Axiome auf ihr Potential, die Ableitung des betrachteten formalen Konzepts zu gestatten. Es würde den Rahmen der hier vorgelegten Ausarbeitung übersteigen, den voranstehend skizzierten Vorbehalt gegenüber Axiomatisierungen durch entsprechende Belege abzusichern. Er wird lediglich angeführt, um die Skepsis anzudeuten, die der Verf. gegenüber dem Beurteilungskriterium der Axiomatisierung trägt. Darüber hinaus verweist er auch auf die Quellen, die an anderer Stelle zur axiomatischen Basis des Petrinetz-Konzepts genannt werden. Auch manche der dort behandelten Axiome lassen erhebliche Zweifel an ihrer "Evidenz" oder "Natürlichkeit" aufkommen. Das trifft z.B. auf die beiden Axiome der N- und K-Dichte zu. Sie werden bei PETRI, C. (1980b), als Postulate Nr. 7 (S. 254f.) bzw. Nr. 8 (S. 255), aufgeführt.

Neben dem Motiv, den Ad hoc-Charakter eines formalen Konzepts aufzuheben, lassen sich für Axiomatisierungen auch andere Rechtfertigungen anführen. Dazu gehört vor allem die Absicht, ein formales Konzept auf einen kompakten, redundanzfreien Kern zurückzuführen, aus dem heraus sich das gesamte Konzept ableiten läßt. Der Konzeptkern besitzt den Vorzug, aufgrund seiner Kompaktheit relativ leicht hinsichtlich ausgezeichneter formaler Qualitäten untersucht werden zu können. Dazu gehören insbesondere aus formallogischer Perspektive die Widerspruchsfreiheit, Unabhängigkeit, Verknüpftheit (Kohärenz) und Folgerungsmächtigkeit der axiomatischen Konzeptbasis. Die Kompaktheit begünstigt ebenso Vergleiche mit den axiomatischen Kernen von anderen formalen Konzepten. Solchen Argumenten zugunsten einer axiomatischen Basis, die ausschließlich auf formale Analyseoptionen Bezug nehmen, schließt sich der Verf. vorbehaltlos an.

Vgl. auch die allgemeinen Überblicke über axiomatisch basierte Ansätze bei KANITSCHIEDER (1971), S. 64; PETRI, C. (1973), S. 137; OPP, K. (1976), S. 311 u. 343ff. In den vorgenannten Quellen schwingt zumeist eine positive Würdigung der axiomatischen Vorgehensweise mit.

11) Vgl. PETRI, C. (1962a), S. 2; PETRI, C. (1967), S. 123.

12) Vgl. zur Axiomatisierung des Petrinetz-Konzepts HOLT, A. (1975d), S. 151; PETRI, C. (1976b), S. 1f.; PETRI, C. (1977a), S. 132; SCHESCHONK (1977), S. 3; EGGERT (1978), S. 39, 41 u. 53; BAUMGARTEN (1978), S. 51 (allerdings nur hinsichtlich der "Axiomatisierung" von Begriffen, die nicht klar erkennen läßt, ob sie über eine schlichte Präzisierung von Begriffsdefinitionen hinausreicht); HOLT, A. (1979), S. 40; JANICKI (1979), S. 110; O.V. (1979b), S. 14; JANICKI (1980a), S. 178; ROSENSTENGEL (1991), S. 4.

Substantielle Darlegungen der axiomatischen Basis finden sich vor allem bei PETRI, C. (1980b), S. 251ff. (dort werden die Axiome als Postulate thematisiert; vgl. S. 260).

Ein spezieller Aspekt der Axiomatisierung des Petrinetz-Konzepts wurde schon an früherer Stelle beleuchtet: Es handelt sich um das Extensionalitätsaxiom. Es wurde im Zusammenhang mit den Erreichbarkeitsgraphen von Stelle/Transition-Netzen gewürdigt. Vgl. ebenso seine Erwähnung im Zusammenhang mit Eindeutigkeitsverletzungen. Ein weiterer axiomatischer Ansatz könnte darin gesehen werden, daß das Petrinetz-Konzept auf eine eigenständige Handlungslogik zurückgeführt wurde. Auch im Rahmen dieser Handlungslogik sind Axiome formuliert, die von jedem Handlungsplan erfüllt werden müssen. Der handlungslogische Ansatz des Petrinetz-Konzepts hat jedoch bis heute keine größere Beachtung gefunden. Er wird daher im folgenden nicht weiter als Axiomatisierungsbeitrag berücksichtigt.

13) Hier sind die nebenläufigen Prozesse i.w.S. gemeint, wie sie für Stelle/Transition-Netze eingeführt und für Synthetische Kernnetze übernommen wurden. Sie umschließen daher sowohl die nebenläufigen Prozesse i.e.S. als auch die sequentiellen Prozesse.

14) Das Petrinetz-Konzept leidet generell unter einer deutlichen Diskrepanz. Sie besteht zwischen seiner axiomatischen Basis und den vorherrschenden Netzklassen, wie z.B. Stelle/Transition-Netzen und Prädikat/Transition-Net-

zen. Diese Diskrepanz äußert sich auf zwei Ebenen. Einerseits ist es bisher noch nicht gelungen, die axiomatische Basis des Petrinetz-Konzepts so zu formulieren, daß sie unmittelbar auf die vorherrschenden Netzklassen Bezug nimmt. Statt dessen müssen stets umständliche Reduktionszusammenhänge konstruiert werden, um von jenen Netzklassen zur axiomatisierten Klasse der Geschehnisnetze zurückzuschreiten. Vgl. dazu die Erläuterungen in den nachstehenden Anmerkungen. Andererseits scheinen "Berührungspunkte" zu bestehen zwischen denjenigen Autoren, die sich vornehmlich mit Geschehnisnetzen und axiomatischen Netzaspekten befassen, und den anderen Autoren, die vorherrschende Netzklassen untersuchen und anwenden. Beide Autorengruppen publizieren weitgehend unabhängig voneinander. Daher verwundert es kaum, daß axiomatisch ausgerichtete Beiträge zum Petrinetz-Konzept die Anbindung ihrer Erkenntnisse an vorherrschende Netzklassen oftmals vermissen lassen. Ebenso wenig interessieren sich die Beiträge zu vorherrschenden Netzklassen für die Frage nach ihrer axiomatischen Basis. Daher liegt eine bemerkenswerte wechselseitige "Entfremdung" oder "Entkopplung" zwischen der axiomatischen Basis des Petrinetz-Konzepts und ihrem "Überbau" vor.

15) Dabei werden Stelle/Transition-Netze im allgemeinen nicht direkt auf Geschehnisnetze reduziert. Vielmehr wird zunächst gezeigt, daß sich Stelle/Transition-Netze auf Bedingung/Ereignis-Netze zurückführen lassen. Danach wird der Sachverhalt ausgenutzt, daß Geschehnisnetze als "Abwicklungen" von Bedingung/Ereignis-Netzen aufgefaßt werden können.

Der zweite Transformationsschritt bereitet keine prinzipiellen Schwierigkeiten. Es wurde schon dargelegt, daß jeder Prozeß, der in einem Bedingung/Ereignis-Netz durch Ereignisgeschehnisse vorangetrieben wird, als ein prozeßspezifisches Geschehnisnetz (Prozeßnetz) dargestellt werden kann. Daher läßt sich jedes Bedingung/Ereignis-Netz auf die Gesamtheit aller Geschehnisnetze zurückführen, die aus der "Abwicklung" aller Prozesse hervorgehen, welche im Bedingung/Ereignis-Netz zulässig sind. Umgekehrt kann ein Bedingung/Ereignis-Netz als "Faltung" von Geschehnisnetzen angesehen werden. Vgl. zu diesem wechselseitigen Abwicklungs- und Faltungszusammenhang zwischen Bedingung/Ereignis-Netzen und Geschehnisnetzen PETRI, C. (1980b), S. 258f., insbesondere Abb. 1a) u. 1c) auf S. 259; ROSENSTENGEL (1991), S. 48ff.

Den ersten Schritt, bei dem ein Stelle/Transition-Netz in ein Bedingung/Ereignis-Netz transformiert wird, betrachten zwar etliche Autoren als unproblematisch. Vgl. z.B. PAGNONI (1990), S. 134 ("every place/transition net can easily be unfolded into a condition/event net") u. 139. Tatsächlich ist dieser erste Transformationsschritt aber zwei wesentlichen Einschränkungen unterworfen. Sie werden im folgenden genannt.

16) Es wurde schon dargelegt, daß das Schaltverhalten von Transitionen, die an einer 1-Schleife teilhaben, bei Stelle/Transition-Netzen unterschiedlich behandelt wird. Daher müßte bei der Rückführung von Stelle/Transition-Netzen auf Geschehnisnetze zunächst geklärt werden, welches Schaltverhalten in bezug auf 1-Schleifen vorausgesetzt wird. Danach wäre zu untersuchen, ob der Reduktionszusammenhang zwischen den beiden Netzklassen auch dann noch zutrifft, wenn bei 1-Schleifen ein anderes Schaltverhalten zugrundeliegt. Statt dessen kann die Problematik von 1-Schleifen auch von vornherein umgangen werden, indem reine Netze unterstellt werden. Dann gilt die Rückführung auf Geschehnisnetze aber qua Voraussetzung nicht mehr für die Klasse aller Stelle/Transition-Netze, sondern nur noch für die echte Teilklasse der reinen Stelle/Transition-Netze. Dieser zweite Weg wird im allgemeinen bevorzugt, um die Schwierigkeiten von 1-Schleifen grundsätzlich zu vermeiden. Dies wurde deutlich, als das Extensionalitätsaxiom diskutiert wurde. Es trifft in seiner ursprünglichen, in der Netzliteratur verbreiteten Fassung ausschließlich auf reine Bedingung/Ereignis- und reine Stelle/Transition-Netze zu. Sobald zu allgemeinen Stelle/Transition-Netzen übergegangen wird, die auch 1-Schleifen enthalten dürfen, verliert das originäre Extensionalitätsaxiom seine Gültigkeit. Dann läßt sich nur noch eine modifizierte Version aufrechterhalten.

17) Stelle/Transition-Netze werden im allgemeinen zunächst auf Bedingung/Ereignis-Netze zurückgeführt. Auf einer Stelle aus einem Bedingung/Ereignis-Netz darf sich höchstens eine Kopie der Basismarke befinden. Dies entspricht einer Markenkapazität von nur einer Markenkopie. Daher wird eine Stelle s_m aus einem Stelle/Transition-Netz mit der Markenkapazität KAP_m in einem Bedingung/Ereignis-Netz durch insgesamt KAP_m Stellen wiedergegeben. Die Stellenanzahl eines Bedingung/Ereignis-Netzes kann zwar beliebig groß sein, aber immer nur einen endlichen Wert annehmen. Daher läßt sich die Rückführung einer Stelle s_m aus einem Stelle/Transition-Netz mit der Markenkapazität KAP_m auf insgesamt KAP_m Stellen eines Bedingung/Ereignis-Netzes nur so lange durchführen, wie die Markenkapazität der Stelle s_m einen endlichen, beschränkten Wert $KAP_m \in \mathcal{N}_+$ annimmt. Für unbeschränkte Markenkapazitäten $KAP_m = \omega$ ist eine Rückführung auf Bedingung/Ereignis-Netze mit endlichen Stellenanzahlen dagegen nicht mehr möglich.

18) Das problematische Konstrukt der 1-Schleifen wurde in Synthetischen Netzen durch die Kombination aus Informationsstellen und -kanten ersetzt. Dies gilt zumindest in dem Ausmaß, wie die 1-Schleifen zur Repräsentation von Nebenbedingungen dienen. Andere 1-Schleifen können auch in Synthetischen Netzen verwendet werden. Es handelt sich dann aber um untypische 1-Schleifen, die etwa das schaltbedingte Verändern einer Attributausprägung darstellen können. In solchen untypischen 1-Schleifen besitzen die zugehörigen Transitionen ein klar definiertes Schaltverhalten. Daher besteht dort kein Problem mehr, welches Schaltverhalten der Transitionen vorausgesetzt werden soll.

Unbeschränkte Markenkapazitäten wurden in den Modellierungen dieser Arbeit nur in dem Ausmaß verwendet, wie sie nicht drohten, die Finitheitsprämisse für die Erreichbarkeitsgraphen von Netzmodellen zu verletzen. Die unbeschränkten Markenkapazitäten erfüllten dann nur die Vereinfachungsfunktion, nicht konkret festlegen zu müssen, welche beschränkten Markenkapazitäten die jeweils betroffenen Stellen besitzen. Die Markenkapazitäten hätten aber jederzeit durch beschränkte Markenkapazitäten ersetzt werden können. Denn in jedem endlichen Erreichbarkeitsgraphen läßt sich für jede Stelle ermitteln, welche Anzahl von Markenkopien sich auf ihr unter einer *beliebigen* erreichbaren Markierung *maximal* befindet. Diese maximale Kopienanzahl - oder eine beliebige größere, aber endliche Kopienanzahl - kann als beschränkte Markenkapazität der betrachteten Stelle festgelegt werden.

19) Diese Einschränkungen gelten für Synthetische Kernnetze und für Erweiterte Synthetische Netze ebenso. Sie werden im folgenden nicht mehr explizit erwähnt.

20) Konzeptionelle Unterschiede zwischen Prädikat/Transition-Netzen und Synthetischen Netzen wurden in Kapitel 5.1.1.2 ausführlicher behandelt.

21) Stelle/Transition-Netze sind grundsätzlich als endliche Konstrukte mit endlicher Stellen- und endlicher Transitionenmenge definiert.

22) Das trifft z.B. auf Markenattribute zu, deren Definitionsbereiche durch die Menge aller reellen Zahlen festgelegt sind.

23) Nebenläufige Ereignisgeschehnisse spiegeln sich in den nebenläufigen Schaltakten von Transitionen wider, die zu einem selben Schaltschritt gehören.

24) Es könnte zwar auf Hilfskonstruktionen von der Art hingewiesen werden, wie sie für die Substitution von Inhibitorkanten vorgestellt wurden. Aber diese Substitute verfehlen die wesentliche Bedeutung der Netzerweiterungen. Denn die Substitute lassen sich nur in denjenigen Fällen einsetzen, in denen aufgrund bestimmter Netzbeschränkungen die Netzerweiterungen im Grunde nicht notwendig sind. Im Hinblick auf Inhibitorkanten handelt es sich um die Einschränkung, daß die adjazenten Stellen beschränkte Markenkapazitäten aufweisen. Dagegen erlangen die Netzerweiterungen ihre volle Bedeutung erst in allen anderen Fällen, in denen die Netzbeschränkungen nicht mehr erfüllt sind. Dann können die substitutiven Hilfskonstruktionen aber nicht mehr eingesetzt werden. Folglich spielen die Hilfskonstruktionen genau dann keine Rolle mehr, wenn die Netzerweiterungen von besonderem Interesse sind.

9.2.2.3.4 Interpretierbarkeit

Zuvor wurde beleuchtet, in welchem Ausmaß das Petrinetz-Konzept Stufen zunehmender Formalisierung zu erklimmen vermag. Die Formalisierung eines Modellierungskonzepts wird jedoch nicht als Selbstzweck angesehen. Vielmehr kommt der Formalisierung nur die dienende Funktion zu, eine möglichst präzise, transparente und folgerungsmächtige Modellierung von Realproblemen zu ermöglichen¹⁾. Ein hochgradig formalisiertes Modellierungskonzept würde daher seinen Modellierungszweck verfehlen, wenn sein Anschluß an die zu modellierenden Realprobleme verloren ginge²⁾. Folglich soll ein Modellierungskonzept über seine Formalisierung hinaus auch Gelegenheit bieten, formale Modelle auf der Grundlage der repräsentierten Realprobleme material³⁾ zu interpretieren⁴⁾. Diese Forderung nach Interpretierbarkeit⁵⁾ läßt sich als "krönende" Ergänzung eines formalisierten Modellierungskonzepts betrachten⁶⁾. Sie gewährleistet die materiale Anschlußfähigkeit⁷⁾ von Modellierungen.

Stelle/Transition-Netze verhalten sich aus der Perspektive ihrer materialen Anschlußfähigkeit neutral. Einerseits bieten sie keine besondere Unterstützung, um formale Netzmodelle hinsichtlich ihrer zugrundeliegenden Realprobleme zu interpretieren. Darin stimmen sie mit zahlreichen anderen Modellierungskonzepten überein⁸⁾. Andererseits öffnen sich Stelle/Transition-Netze gegenüber interpretativen Modellerweiterungen. Dabei handelt es sich um Netzinterpretationen, die sich auf nahezu⁹⁾ alle Petrinetze anwenden lassen¹⁰⁾. Sie gelten daher ebenso für Synthetische Kernnetze und für Erweiterte Synthetische Netze¹¹⁾.

Die Interpretationsmöglichkeiten, die den materialen Anschluß eines Netzmodells an das jeweils repräsentierte Realproblem gestatten, erstrecken sich auf zwei Ebenen¹²⁾. Auf der ersten, konkreten Ebene handelt es sich um Interpretationen, die auf reale Objekte und reale Aktivitäten aus dem modellierten Realitätsausschnitt Bezug nehmen. Die zweite, abstrakte Ebene wird durch Informationen konstituiert, die einzelne Aspekte des modellierten Realitätsausschnitts wiedergeben. Im einzelnen kommen für die wichtigsten Konstrukte der drei betrachteten Netzklassen als gemeinsame materiale Ausdeutungen in Betracht¹³⁾:

- Stellen lassen sowohl eine konkrete als auch eine abstrakte Interpretation zu. Im ersten Fall werden sie als Orte aufgefaßt, an denen sich reale Objekte befinden können¹⁴⁾. Im zweiten Fall stellen sie Informationen über Aspekte des modellierten Realitätsausschnitts dar, die sich durch atomare aussagen- oder prädikatenlogische Formeln ausdrücken lassen¹⁵⁾. Die Informationsgehalte dieser Formeln erstrecken sich auf:
 - ☞ Bedingungen, die in einem Realitätsausschnitt erfüllt oder verletzt sein können¹⁶⁾;
 - ☞ Eigenschaftsausprägungen, die auf reale Objekte zutreffen können;
 - ☞ Beziehungen, die zwischen realen Objekten bestehen können.

Es ist möglich, die konkreten Stelleninterpretationen in das abstrakte Deutungsmuster dadurch einzubinden, daß Informationen über die ortsbezogene Befindlichkeit von realen Objekten ausgedrückt werden.

- Transitionen besitzen die materiale Qualität von Aktivitäten, die im modellierten Realitätsausschnitt stattfinden können. Die Aktivitäten lassen sich in vielfachen Varianten ausdeuten. Dazu gehören insbesondere punktförmige Ereignisse und zeitlich ausgedehnte Vorgänge. Wenn der spezielle Aspekt betont werden soll, daß ein handelndes Subjekt im modellierten Realitätsausschnitt Veränderungen bewirkt, so lassen sich seine Handlungen als Aktionen hervorheben. Wenn eine Aktivität stattfindet, verändert sie die ortsbezogene Befindlichkeit von realen Objekten oder den Gehalt von Informationen, die über einen modellierten Realitätsausschnitt aktuell zur Verfügung stehen.

- Kanten werden in dieser Arbeit als Komponenten aus kausalen Beeinflussungs- und Wirkungszusammenhängen interpretiert, in die alle Aktivitäten eingebettet sind. Die Kantenrichtung gibt dabei die Beeinflussungs- bzw. Wirkungsrichtung der zugrundeliegenden Kausalzusammenhänge wieder. Diese generelle kausale Auslegung umschließt als Unterfälle:
 - ☞ Kanten als abstrakte oder kommunikative Verknüpfungen zwischen Informationssendern und Informationsempfängern¹⁷⁾;
 - ☞ Kanten als konkrete oder materielle Verbindungen, die einen gerichteten Fluß realer Objekte zwischen Objektmittlern und Objektrezipienten ermöglichen¹⁸⁾.

Daneben lassen sich Netzkanten ebenso als logische Verknüpfungen zwischen den formelrepräsentierenden¹⁹⁾ Stellen eines deklarativen Netzmodells auffassen. Dann geht aber ihr kausaler Charakter verloren²⁰⁾.

- Markenkopien stellen grundsätzlich Objekte dar. Dabei können sowohl konkrete als auch abstrakte Objekte repräsentiert werden. Im ersten Fall handelt es sich um reale Objekte aus dem jeweils modellierten Realitätsausschnitt. Im zweiten Fall liegen Markenkopien vor, die Informationen über interessante Aspekte des modellierten Realproblems ausdrücken. Dazu dienen entweder Kopien von Informationsmarken²¹⁾. Oder es werden Kopien der Basismarke benutzt, um durch ihre Anwesenheit die Gültigkeit²²⁾ einer Formel mit aussagenlogischer Qualität darzustellen²³⁾.
- Netzmarkierungen repräsentieren Situationen, in denen sich ein Realitätsausschnitt so lange befindet, wie in der Konzeptualisierung des zugrundeliegenden Realproblems keine modellierungsrelevante Veränderung des Realitätsausschnitts erfolgt²⁴⁾. Die Situationsbeschreibung kann sich einerseits auf die aktuelle räumliche Verteilung realer Objekte beziehen. Andererseits ist es ebenso möglich, daß die Situationsbeschreibung durch die aktuell verfügbaren Informationen über interessante Aspekte des modellierten Realitätsausschnitts erfolgt.
- Die graphische Visualisierung von Netzmodellen kann durch natürlichsprachliche Anschriften von Netzkomponenten bereichert werden²⁵⁾. Die informalen Beschriftungen lassen sich benutzen, um einzelne Modellkomponenten mit den jeweils repräsentierten Aspekten des modellierten Realproblems auf anschauliche Weise zu assoziieren²⁶⁾.

Allen vorgenannten Interpretationsmöglichkeiten gemeinsam ist, daß sie in den formalen Netzdefinitionen von Stelle/Transition-Netzen, Synthetischen Kernnetzen oder Erweiterten Synthetischen Netzen auf keine Weise verankert sind. Es handelt sich daher um informale "Zugaben", die ein formales Netzmodell nachträglich erweitern. Ein systematischer Zusammenhang zwischen den materialen Interpretationen einzelner formaler Netzkonstrukte und den formalen Konstruktdefinitionen liegt jedoch nicht vor.

Synthetische Netze zeichnen sich hingegen dadurch aus, daß sie zusätzlich eine wohlfundierte materiale Anschlußfähigkeit bieten. Dies gilt sowohl für Synthetische Kernnetze als auch für Erweiterte Synthetische Netze. Beide Netzklassen gestatten, in die formale Netzdefinition von vornherein eine Semantik einzubetten, die sowohl denotationalen als auch dynamischen Charakter trägt. Zu diesem Zweck lassen sich die Namen von Prädikatssymbolen und Transaktionen frei formulieren. Daher ist es möglich, durch die Namensgebung unmittelbar auf die jeweils repräsentierten Problemaspekte zu verweisen. Dabei besitzen die "gewöhnlichen"²⁷⁾ Prädikatssymbole die materiale Qualität, Eigenschaftsausprägungen von oder Beziehungen zwischen realen Objekten auszudrücken. Der degenerierte Fall von nullstelligen Prädikatssymbolen wird durch Bedingungen interpretiert, die im modellierten Realitätsausschnitt entweder erfüllt oder aber verletzt sein können. Darüber hinaus lassen sich mit den Namen von Prädikatssymbolen auch unmittelbar Orte bezeichnen, an denen sich im modellierten Realitätsausschnitt Objekte befinden können. Die vorgenannten realen Objekteigenschaften und -beziehungen, Bedingungen sowie Orte werden gemeinsam als Sachverhalte angesprochen. Die materiale Interpretation von

Transaktionen erstreckt sich dagegen auf beliebige Aktivitäten. Sie wurden schon oben als Ereignisse, Vorgänge oder Aktionen identifiziert. Wenn sie im modellierten Realitätsausschnitt stattfinden, bewirken sie Veränderungen von Sachverhalten.

Die namensvermittelte Zuordnung von Sachverhalten zu Prädikatssymbolen und von Aktivitäten zu Transaktionen konstituiert die denotationale Semantik eines Netzmodells. Aus der speziellen Perspektive der Realitätsveränderungen, die von Aktivitäten bewirkt werden können, wird die denotationale Netzsemantik als auch dynamische Semantik des Netzmodells angesprochen. Im folgenden wird ein Netzmodell vorausgesetzt, in dem jedem Prädikatssymbol- und jedem Transaktionsnamen eine materiale Bedeutung zugeordnet ist²⁸⁾.

Eine Markierung des Netzmodells umfaßt aufgrund ihrer formalen Definition die Gesamtheit aller atomaren prädikatenlogischen Formeln, die im aktuellen Zustand des Netzmodells gültig sind. Jeder gültigen atomaren prädikatenlogischen Formel liegt dasjenige Prädikatssymbol zugrunde, aus dem die Formel hergeleitet ist. Da jedes Prädikatssymbol vermittels seines Namens eine wohlbestimmte, sachverhaltsbezogene materiale Bedeutung besitzt, gilt für die betrachtete Markierung des Netzmodells: Die materiale Interpretation der Netzmarkierung ist die Gesamtheit aller Sachverhalte, die auf das modellierte Realproblem in derjenigen Situation zutreffen (sollen²⁹⁾), die durch den aktuellen Zustand des Netzmodells³⁰⁾ repräsentiert wird. Das Ausführen eines Schaltschritts bewirkt einen Übergang zwischen zwei aufeinander folgenden Netzmarkierungen. Das Schalten jeder Transition, die zu dem Schaltschritt gehört, wird durch eine transitionsspezifische Transaktion festgelegt. Jeder Transaktion ist über ihren Namen eine wiederum wohlbestimmte, nun aber aktivitätsbezogene materiale Bedeutung zugeordnet. Daher ist die materiale Interpretation des Schaltschritts die Gesamtheit aller Aktivitäten, die im modellierten Realitätsausschnitt stattfinden (sollen), um einen Übergang zwischen zwei realen Situationen³¹⁾ zu bewirken.

Erweiterte Synthetische Netze bieten über die voranstehend skizzierte denotationale und dynamische Semantik hinaus zwei besondere Ansätze, um die materiale Interpretation von Netzmodellen zu erweitern. Erstens kommen Realtransitionen in Betracht, um ein Netzmodell unmittelbar an Aktionen anzukoppeln, die im modellierten Realitätsausschnitt tatsächlich ausgeführt worden sind oder dort tatsächlich ausgeführt werden sollen. Zu diesem Zweck werden in die Schaltvorschriften der Realtransitionen Systemmeldungen bzw. Steuerungsanweisungen aufgenommen. Systemmeldungen informieren über Ereignisse, die in einem zugrundeliegenden realen Produktionssystem durch dort ausgeführte Aktionen hervorgerufen wurden. Steuerungsanweisungen informieren Aktionsträger im zugrundeliegenden realen Produktionssystem über Aktionen, die dort ausgeführt werden sollen. Zweitens lassen sich alle Sach- und Formalziele, die ein Entscheidungsträger bei der Modellierung eines realen Koordinierungsproblems verfolgt, in die formale Definition eines Erweiterten Synthetischen Netzes aufnehmen. Dazu dienen erwünschte Endmarkierungen und Schaltwerte von Transitionen.

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Vgl. dazu die Rechtfertigung formaler Fundamente.
- 2) Dann wäre der oftmals erhobene Vorwurf des Modell-Platonismus gerechtfertigt.
- 3) Vgl. zur inhaltlichen Ausdeutung des Begriffs "material" die Festlegungen im semiotischen Bezugsrahmen. Insbesondere wird an das Konzept einer "materialen Logik" erinnert, in der sowohl semantische als auch pragmatische Aspekte zusammengefaßt werden.
- 4) Wenn in diesem Kapitel von "Interpretationen" gesprochen wird, ist stets ein weit gefaßter Interpretationsbegriff gemeint. Er erstreckt sich nicht nur auf die semantische, sondern ebenso auf die pragmatische Modelldimension (vgl. die voranstehende Anmerkung). Die Formulierung "materiale Interpretation" stellt keinen Pleonasmus dar. Vielmehr grenzt sie sich von den *formalen* Interpretationen ab, die im Rahmen einer formalen Semantik erfolgen.
- 5) Ähnliche Forderungen finden sich RAUBOLD (1972), S. 211, und ULLRICH (1976), S. 0.6; ESSER, H. (1977a), S. 180. Dort wird der Wunsch geäußert, die Interpretierbarkeit von formalen Modellen oder die Anpaßbarkeit ihrer Semantik solle unterstützt werden.
- 6) Es mag der Eindruck entstehen, daß die *materiale* Anschlußfähigkeit keine "Krönung", sondern einen Widerspruch zur *Formalisierung* eines Modellierungskonzepts darstellt. Aus den nachfolgenden Ausführungen wird aber deutlich werden, daß Formalisierungen von Modellierungskonzepten erst dann den Modellierungszweck erfüllen können, wenn sie durch *materiale* Konzeptergänzungen abgeschlossen werden.
- 7) Der Begriff der Anschlußfähigkeit wird aus dem systemtheoretischen Denkmuster LUHMANN's entlehnt. Vgl. dazu z.B. LUHMANN (1988), S. 62, 123, 169, 204, 233, 258 u. 363.
- 8) Das trifft z.B. auch auf OR-Programme zu. Den meisten Netzplänen liegt dagegen zumeist von vornherein eine *materiale* Interpretation ihrer Knoten oder Kanten zugrunde. So lassen sich Vorgangsknoten-, Vorgangskanten- und Ereignisknoten-Netzpläne voneinander unterscheiden.
- 9) Die nachfolgend angeführten Interpretationsoptionen treffen auf Stelle/Transition-Netze, auf Synthetische Kernnetze und auf Erweiterte Synthetische Netze ohne Einschränkungen zu. Da nur diese Netzklassen beurteilt werden, brauchen Möglichkeiten der Optionsanwendung auf andere Netzklassen nicht im Detail untersucht zu werden. Nur zur Verdeutlichung wird auf eine wesentliche Einschränkung hingewiesen: Die *materiale* Interpretation von Netzmarkierungen scheidet für Netzklassen von vornherein aus, für die überhaupt keine Markierungen definiert sind. Dazu gehören z.B. die Allgemeinen Netze und die Petrinetze i.e.S.
- 10) Vgl. allgemein zur interpretativen Offenheit von Petrinetzen, die eine Bezugnahme auf unterschiedlichste Realprobleme gestattet, SIFAKIS (1977a), S. 75; PETRI, C. (1979c), S. 82; ELLIS, C.J. (1979), S. 9; HAN (1979), S. 271; OBERQUELLE (1980), S. 505; PAGNONI (1990), S. 121 u. 123 (dort wird sogar eine *Interpretationsnotwendigkeit* hervorgehoben); THOME, R. (1990), Abschnitt H 16.4, S. 45f.; ROSENSTENGEL (1991), S. 7 u. 113; KIEBLER (o.J.), S. 40. Besonders eindringlich haben ROSENSTENGEL und WINAND die Interpretierbarkeit von Petrinetzen charakterisiert: "Anders als viele mathematische Disziplinen erleichtern Petri-Netze die Wahrung einer interpretativen Komponente und damit die Anwendung in konkreten Situationen. Der Modellierer ist damit nie einem vielleicht inadäquaten, mathematischen Mechanismus ausgeliefert, der die Gefahr birgt, daß das Ergebnis nur schwer oder nicht mehr interpretierbar ist." (ROSENSTENGEL (1982), S. 51).
- 11) Allerdings bieten diese beiden Varianten Synthetischer Netze eine zusätzliche Interpretationsmöglichkeit, die Stelle/Transition-Netze nicht besitzen.
- 12) Die beiden Ebenen schließen sich keineswegs gegenseitig aus. Vielmehr lassen sich die konkreten Interpretationen der ersten Ebene stets auf der zweiten Ebene als abstrakte Informationen über die konkreten Realitätsaspekte reformulieren. Dadurch wird lediglich der unmittelbar Realitätsbezug von Interpretationen der ersten Ebene durch einen mittelbaren - informationsvermittelten - Realitätsbezug auf der zweiten Ebene ersetzt. Die Umkehrung des Vorhergesagten trifft jedoch nicht immer zu. Denn es läßt sich nicht garantieren, daß jeder abstrakte Informationsgehalt auf diejenigen konkreten realen Objekte oder Aktivitäten zurückgeführt werden kann, die in einem Netzmodell repräsentiert werden. Dies trifft z.B. auf die Modellierung von Nebenbedingungen zu. Sie nehmen mitunter auf Objekte oder Aktivitäten inhaltlich Bezug, die im jeweils betroffenen Netzmodell nicht als solche expliziert worden sind.
- 13) In *anderen* Netzklassen sind weitere Interpretationen der formalen Netzkonstrukte möglich. Insbesondere wird auf die Kanal/Instanz-Netze verwiesen. Sie lassen eine reichhaltige Palette verschiedenartiger materieller Bedeutungen für ihre Stellen und Transitionen zu. Vgl. zur Variabilität der Interpretation von Kanal/Instanz-Netzen auch DITTRICH, G. (1989b), S. 3f.; WENDT (1989), S. 228f.
Es existieren auch Netzklassen, die auf bestimmte Interpretationen ihrer Netzknotten spezialisiert sind. Als *pars pro toto* wird auf die Klasse der Rolle/Aktivität-Netze verwiesen. Dort besitzen die Stellen die Bedeutung von "Rollen".

Die Rollen stellen abstrakte Aufgabenbeschreibungen dar, die von den aufgabenerfüllenden Subjekten losgelöst sind. Die Transitionen werden als Aktivitäten bezeichnet. Dabei handelt es sich um diejenigen Aktionen, die von Subjekten zur Erfüllung von Aufgaben ausgeführt werden können oder sollen.

14) Dazu gehört vor allem die Interpretation von Stellen als Objektelager.

15) In Synthetischen Netzen werden diese Formeln den betroffenen Stellen explizit zugeordnet. Darauf wird in Kürze näher eingegangen. In Stelle/Transition-Netzen erfolgt die Interpretation der Stellen durch problembeschreibende Formeln nur implizit.

16) Vgl. z.B. GRAUBMANN (1982b), S. 11.

17) Dies trifft vor allem auf die Informationskanten zu. Die gleiche kommunikative Interpretation gilt aber auch für alle anderen Kanten, über die Kopien von Marken fließen können, die als Informationsmarken definiert sind. Vgl. dazu die Verwendung von Informationsmarken in der Fallstudie.

Informationskanten geben kausale Beeinflussungszusammenhänge wieder. Denn sie ermöglichen die Kenntnisnahme von Informationsinhalten, von denen Ereignisgeschehnisse oder Prozeßausführungen abhängen können. Das Vorhandensein von Informationsmarkenkopien vermag einerseits Ereignisgeschehnisse und Prozeßausführungen zu beeinflussen. Andererseits ist es ebenso möglich, daß solche Markenflüsse von den vorgenannten Aktivitäten bewirkt werden.

18) Diese Kanteninterpretation läßt sich anwenden, falls entlang einer Netzkante Markenkopien fließen dürfen, die als Repräsentanten realer Objekte definiert sind. Dabei kann es sich z.B. um die Kopien von Werkstück- oder Werkzeugmarken handeln, die in der Fallstudie vorgestellt wurden. Das Vorhandensein und das Fließen realer Objekte lassen sich unmittelbar in die Erfahrungskategorien des kausalen Beeinflussens bzw. Bewirkens einbetten.

Die materiellen Verknüpfungen können die kommunikativen Verbindungen als Spezialfall umschließen. Dies gilt immer dann, wenn nicht die ausgetauschten Informationsinhalte, sondern die materiellen Informationsträger als ausgetauschte Objekte betrachtet werden.

19) Die Formeln, die den Stellen zugeordnet sind, können ihrerseits wieder durch die o.a. materiellen Bedeutungen von Stellen interpretiert werden, also z.B. als Bedingungen oder Beziehungen.

20) Aus diesem Grund wurden in der hier vorgelegten Ausarbeitung operationale Netzmodelle bevorzugt, in denen die kausale Kanteninterpretation erhalten bleibt. Zugleich zeigt sich in der Unterscheidung zwischen kausaler und logischer Kantenqualität ein Aspekt der Uneinheitlichkeit.

In anderen Netzklassen sind weitere, abermals von der kausalen Ausdeutung abweichende Kanteninterpretationen möglich. Dazu gehört z.B. ein Ansatz, Kanten als organisatorische Verknüpfungen zwischen Aufgaben und aufgabenerfüllenden Aktionen aufzufassen. Vgl. dazu den Hinweis auf Rollen/Aktivität-Netze.

21) Die Markenkopien stellen dann das abstrakte, objektsprachliche Objekt "Information" dar.

22) Die Abwesenheit einer Kopie der Basismarke drückt zunächst nur aus, daß der Gültigkeitsstatus der betroffenen Formel unbekannt ist. Es wurde bereits erläutert, daß aus dem Unbekanntsein des Gültigkeitsstatus einer Formel das Wissen über ihre Ungültigkeit nicht streng gefolgert werden kann. Daher braucht die Abwesenheit einer Basismarkenkopie keineswegs als Formelungültigkeit interpretiert zu werden. Statt dessen kann der betroffenen Formel der Gültigkeitsstatus "unbekannt" zugeordnet werden. Dies erfordert allerdings den Übergang zu einer dreiwertigen Logik. Dieser Schritt wird in der Netzliteratur jedoch nur selten nachvollzogen. Dort herrscht die Sichtweise vor, die Abwesenheit einer Basismarkenkopie als Ungültigkeit der betroffenen Formel zu deuten.

23) In diesem Fall repräsentieren die Markenkopien das abstrakte, metasprachliche Objekt "Gültigkeitsstatus". Es kann nur die Ausprägungen "gültig" ("wahr"), "ungültig" ("falsch") oder "unbekannt" annehmen. Vgl. dazu auch die Erläuterung in der voranstehenden Anmerkung.

24) Sofern ein Netzmodell in systemtheoretischer Weise interpretiert wird, stellt jede Situation einen Systemzustand dar.

25) Vgl. BAER, J. (1977), S. 395; KIEBLER (o.J.), S. 40. Auf diese Beschriftungsmöglichkeit wurde in dieser Arbeit des öfteren zurückgegriffen. Dabei wurden die natürlichsprachlichen Anschriften in "Kartuschen" eingefasst, um sie als informale Modellerweiterungen hervorzuheben. Vgl. dazu - als Beispiel - die verdeutlichenden Anschriften im Netzmodell eines Transportsystems, das im Rahmen der Fallstudie entfaltet wurde. Von interpretierenden Netzanschriften wurde auch bei Kanal/Instanz-Netzen reger Gebrauch gemacht.

26) In dieser Hinsicht besitzen Netzanschriften den Charakter von Korrespondenzregeln. Auf die allgemeine Bedeutung von Korrespondenzregeln wurde schon anläßlich der semiotischen Rahmenlegung hingewiesen.

27) Damit sind Prädikatssymbole gemeint, die ein- oder mehrstellige Argumente besitzen.

28) Sofern diese Voraussetzung teilweise, aber nicht vollständig erfüllt ist, beziehen sich die nachstehenden Erläuterungen nur auf jene Teile eines Netzmodells, dessen Prädikatssymbole und Transaktionen material interpretiert sind.

29) Strenggenommen ist nicht sicher, ob die Sachverhalte auf das modellierte Realproblem tatsächlich zutreffen. Denn Validitätsmängel der Modellierung können zu Diskrepanzen zwischen Original und Modell führen. Dies wird hier als bekannt und akzeptiert unterstellt. Daher wird zur Vereinfachung der Diktion zugelassen, im folgenden von solchen Verwerfungen zwischen Modell und modelliertem Realitätsausschnitt zu abstrahieren.

30) Der aktuelle Zustand des Netzmodells ist identisch mit der aktuellen Netzmarkierung. Es handelt sich um synonyme Bezeichnungen. Im ersten Fall wird das Netzmodell als System aufgefaßt. Im zweiten Fall dominiert die Terminologie des Petrinetz-Konzepts.

31) Bei den beiden realen Situationen handelt es sich um diejenigen Situationen, die von den zwei aufeinander folgenden Netzmarkierungen repräsentiert werden, die im Netzmodell vor und nach der Schaltschrittausführung vorliegen.

9.2.2.3.5 Operationalität

Unter der Operationalität¹⁾ eines Modellierungskonzepts wird das Ausmaß verstanden, in dem Probleme, die sich im Rahmen des Konzepts modellieren lassen, durch Auswertung der problemrepräsentierenden Modelle auch tatsächlich bewältigt werden können²⁾. Dabei wird unter der Bewältigung eines Problems verstanden, die Menge seiner Lösungen zu erkennen. Dies kann sowohl die Erkenntnis einer oder mehrerer Problemlösungen bedeuten als auch zu der Einsicht führen, daß das Problem grundsätzlich keine Lösung besitzt. Eine Klasse gleichartiger Probleme heißt bewältigbar, wenn mindestens ein Algorithmus existiert, mit dessen Hilfe für alle klassenzugehörigen Probleme festgestellt werden kann, welche Lösungsmenge sie besitzen.

Auf den ersten Blick ist zu vermuten, daß jedes Problem bewältigt werden kann, wenn es nur formalsprachlich spezifiziert und in ein entsprechendes formales Modell umgesetzt worden ist³⁾. Beispielsweise bestehen keine prinzipiellen Schwierigkeiten, alle Probleme zu bewältigen, die als Netzpläne oder OR-Programme modelliert worden sind⁴⁾. Bei näherem Hinsehen zeigt sich jedoch, daß die Operationalität des Petrinetz-Konzepts Einschränkungen unterliegt⁵⁾. Denn es existieren durchaus Problemklassen, die sich zwar mit der Hilfe von Petrinetzen modellieren lassen, aber dennoch nicht im oben festgelegten Sinne algorithmisch bewältigt werden können.

Bereits die einfache Klasse der Stelle/Transition-Netze besitzt keine vollständige Operationalität⁶⁾. Lange Zeit fokussierten sich die Zweifel an ihrer Operationalität auf "das" ⁷⁾ Erreichbarkeitsproblem. Dort gilt es zu entscheiden, ob in einem Netz von einer vorgegebenen Ausgangsmarkierung aus eine ebenso vorgegebene, für das Netz zulässige Markierung durch endlich viele Schaltakte seiner Transitionen erreicht werden kann. Die Entscheidbarkeit⁸⁾ des Erreichbarkeitsproblems stand lange Zeit offen. Nach mehreren gescheiterten und zum Teil unverstandenen Beweisversuchen gelang es erst vor knapp einem Jahrzehnt nachzuweisen, daß das Erreichbarkeitsproblem für Stelle/Transition-Netze tatsächlich entscheidbar ist⁹⁾. Folglich existiert auch mindestens ein Algorithmus, mit dessen Hilfe alle Erreichbarkeitsprobleme für Stelle/Transition-Netze bewältigt werden können¹⁰⁾. Es lassen sich aber andere, weniger anschauliche Klassen von Entscheidungsproblemen formulieren, deren Unentscheidbarkeit für Stelle/Transition-Netze definitiv nachgewiesen wurde¹¹⁾. Für diese Problemklassen existiert kein Entscheidungsalgorithmus. Daher können sie zwar modelliert, aber nicht mehr bewältigt werden.

Die Operationalitätslücken fallen bei Synthetischen Kernnetzen noch größer aus. Denn aufgrund ihrer Ausdrucksmächtigkeit, die Prädikatenlogik und Arithmetik umfaßt, unterliegen alle Synthetischen Kernnetze der prädikatenlogischen Semi-Entscheidbarkeit¹²⁾. Daher kann mit Synthetischen Kernnetzen eine Fülle von Entscheidungsproblemklassen modelliert werden, für die kein Entscheidungsalgorithmus existiert. Dies wurde als operationale Dimension des Kernkonzepts Synthetischer Netze bereits ausführlich erläutert. Bei Erweiterten Synthetischen Netzen verschärft sich dieses Operationalitätsdefizit noch. Dort führen einzelne der neuartigen Netzkonstrukte dazu, daß sich Entscheidungsproblemklassen, die vormals noch entschieden werden konnten, nunmehr als unentscheidbar erweisen¹³⁾. Wiederum existieren keine entsprechenden Entscheidungsalgorithmen.

Die zuvor skizzierten Operationalitätsmängel nehmen von Stelle/Transition-Netzen über Synthetische Kernnetze bis hin zu Erweiterten Synthetischen Netzen deutlich zu. Bei der Beurteilung dieser Schwächen sind allerdings zwei Aspekte zu würdigen. Erstens lassen sich die anwachsenden Einbußen an Operationalität grundsätzlich nicht vermeiden¹⁴⁾. Denn sie folgen zwangsläufig aus der größer werdenden allgemeinen Modellierungsfähigkeit der drei Netzklassen¹⁵⁾. Aufgrund dieses immanent gegenläufigen Zusammenhangs zwischen Ausdrucksmächtigkeit und Operationalität kann nicht damit gerechnet werden, ein Modellierungskonzept zu finden, für das gilt: Es umfaßt mindestens die Ausdrucksmächtigkeiten der vorgenannten Netzklassen, leidet aber zugleich nicht unter deren Operationalitätsdefiziten¹⁶⁾. Zweitens bezie-

hen sich die oben skizzierten Mängel immer nur auf *Klassen* gleichartiger Entscheidungsprobleme, für die kein entsprechender *Entscheidungsalgorithmus* existiert. Nur die Problemklasse als Ganzes kann grundsätzlich nicht bewältigt werden. Dies schließt aber keineswegs aus, daß *Entscheidungsverfahren* existieren, mit deren Hilfe sich eine Vielzahl von einzelnen klassenzugehörigen Problemen entscheiden läßt¹⁷⁾. Für die *praktische* Anwendung eines Modellierungskonzepts können solche Entscheidungsverfahren durchaus hinreichen¹⁸⁾. Aber hier interessiert nur das *theoretisch* orientierte Operationalitätskriterium, das sich auf die algorithmische Bewältigbarkeit ganzer Problemklassen bezieht.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Die Forderung nach Operationalität wird in der Weise, wie sie hier ausgeführt ist, in der einschlägigen Literatur kaum erhoben. Zu den seltenen Ausnahmen gehört die explizite Diskussion der Operationalität bei ZENTES (1976), S. 35f. Die inhaltliche Nähe seines Ansatzes zum hier verfolgten Operationalitätsverständnis wurde schon in einer früheren Anmerkung dargelegt. Darüber hinaus finden sich ähnliche Operationalitätsauffassungen bei NEWELL (1969), S. 372; PETERSON, J. (1977), S. 246; HURA (1982c), S. 433; VON WEIZSÄCKER (1985), S. 92f. u. 95. Dort wird allerdings der Operationalitätsbegriff durch andere Bezeichnungen ersetzt. So wird z.B. von Entscheidbarkeit, Entscheidungsfähigkeit, Lösbarkeit oder Lösungswahrscheinlichkeit gesprochen.

2) Das Operationalitätsverständnis, das in dieser Arbeit bei der Modellierung von Problemen zugrundeliegt, wurde bereits während der konzeptionellen Rahmenlegung erläutert. Es nimmt keinen Bezug auf die Vorstellung von präzisen, intersubjektiv eindeutig verwendbaren Begriffsdefinitionen. Statt dessen geht es hier um eine Repräsentation von Problemen, die so konkret ist, daß sie die Lösbarkeit oder Unlösbarkeit der Probleme erkennen läßt.

Darüber hinaus besteht eine Verbindung zum analytischen Potential eines Modellierungskonzepts, weil auf Modellauswertungen verwiesen wird. Bei der Beurteilung des analytischen Potentials wurden aber *spezielle* Modelleigenschaften und *spezielle* Auswertungstechniken zur Überprüfung solcher Eigenschaften betrachtet. Dagegen interessiert hier aus dem Blickwinkel der Operationalität nur der *allgemeine* Aspekt, in welchem Ausmaß sich *beliebige*, inhaltlich nicht näher spezifizierte Probleme durch ebenso *beliebige* Auswertungen der problemrepräsentierenden Modelle bewältigen lassen. Dabei könnte zwischen einer theoretischen und einer praktischen Operationalität unterschieden werden. Aus theoretischer Sicht interessiert nur, ob modellierte Probleme überhaupt mit beliebig großem - aber endlichem - Ressourceneinsatz bewältigt werden können. Die Höhe der erforderlichen Ressourcen spielt jedoch keine Rolle. Dagegen widmet sich die praktische Operationalität der Frage, in welchem Ausmaß sich modellierte Probleme noch bewältigen lassen, wenn Ressourcenrestriktionen eingehalten werden müssen. Erkenntnisse über die praktische Rationalität hängen per definitionem von der Höhe der vorausgesetzten Ressourcenbeschränkungen ab. Diese Höhe kann aber von Einzelfall zu Einzelfall variieren. Daher eignet sich die praktische Operationalität kaum als Kriterium für die allgemeine Beurteilung eines Modellierungskonzepts. Darüber hinaus überschneidet sie sich stark mit dem Kriterium der Auswertungseffizienz. Dies wird später ausführlicher behandelt. Auch aus diesem Grunde wird auf die praktische Operationalität nicht weiter eingegangen. Statt dessen erstrecken sich die folgenden Erläuterungen ausschließlich auf die Variante der theoretischen Operationalität.

3) Diese "naive" Präsupposition lag auch der Definition operativer Problemrepräsentationen zugrunde, die schon kurz zuvor erwähnt wurde.

4) Auch die Erkenntnis, das die Lösungsmenge eines Problems die leere Menge ist, stellt eine wohldefinierte Problembewältigung dar. Sie entspricht der Einsicht, daß das modellierte Problem überhaupt keine Lösung besitzt, weil es inkonsistent spezifiziert ist.

5) Abweichender Ansicht ist HURA (1982c), S. 438. Er spricht dem Petrinetz-Konzept generell eine hohe Operationalität (Entscheidungsfähigkeit) zu. Aufgrund der nachfolgenden Erläuterungen kann der Verf. diese Beurteilung nicht nachvollziehen.

6) Dies klingt in unterschiedlichen Formulierungen - z.B. als Offenheit oder Ungeklärtsein von Analyseproblemen - an bei HACK, M. (1975a), S. 14; MURATA, T. A. (1976c), S. 36; CRESPI-REGHIZZI (1977), S. 144; MURATA, T. A. (1977c), S. 2; PAKAS-SKEWES (1979), S. 281.

Allerdings ist zu beachten, daß sich die vorgenannten Quellen im allgemeinen - zumindest implizit - auf Zweifel an der Entscheidbarkeit des Erreichbarkeitsproblems beziehen. Darauf wird anschließend näher eingegangen. Dabei wird sich zeigen, daß *dieses* Entscheidungsproblem die Operationalität von Stelle/Transition-Netzen nicht beeinträchtigt. Denn seine Entscheidbarkeit ist mittlerweile nachgewiesen. Es existieren aber *andere* Entscheidungsprobleme, die tatsächlich unentscheidbar sind.

7) Bei der Bezugnahme auf "das" Entscheidungsproblem handelt es sich um eine allgemein übliche generische Redeweise. Sie meint inhaltlich die Klasse aller Probleme, welche die nachfolgende Definition von Erreichbarkeitsproblemen erfüllen.

8) Die Entscheidbarkeit einer Klasse von gleichartigen Entscheidungsproblemen ist ein Sonderfall der Bewältigbarkeit einer Problemklasse. Denn in beiden Fällen existiert per definitionem ein Algorithmus, mit dessen Hilfe für jedes klassenzugehörige Problem die Lösungsmenge ermittelt werden kann. Im Fall von Entscheidungsproblemen nimmt die Lösungsmenge lediglich die besondere Gestalt an, immer nur entweder aus der Antwort "ja" oder aber aus der Antwort "nein" zu bestehen. Vgl. dazu die Erläuterungen zu Entscheidungsproblemen und ihrer Entscheidbarkeit. Im folgenden wird nur noch auf Entscheidungsprobleme Bezug genommen, da sie bei Untersuchungen über die Operationalität von problemmodellierenden Konzepten die Hauptrolle spielen. Vgl. dazu den Hinweis auf die Möglichkeit, andere Probleme, wie z.B. Optimierungsprobleme, auf Entscheidungsprobleme zurückzuführen.

9) Der Verf. hat die historische Entwicklung der Bearbeitung des Erreichbarkeitsproblems in ZELEWSKI (1989a), S. 121ff., ausführlicher beschrieben.

10) Die bisher vorgelegten Entscheidungsalgorithmen fallen allerdings überaus komplex aus.

11) Dazu gehört z.B. das Problem, ob Stelle/Transition-Netze mit gleichen Stellenmengen die gleichen Erreichbarkeitsmengen besitzen. Darauf wurde schon früher eingegangen. Ebenso spricht MURATA, TA. (1980b), S. 42, vom Risiko der Unentscheidbarkeit für Netze. Allerdings konkretisiert er nicht, an welche unentscheidbaren Probleme er denkt.

12) Die Semi-Entscheidbarkeit ist ein Unterfall der Unentscheidbarkeit.

13) Die Verwendung von Inhibitorkanten verweist schon auf die Ursache, die der abnehmenden Operationalität von Erweiterten Synthetischen Netzen zugrundeliegt: Es handelt sich um die Ausweitung ihrer Modellierungsfähigkeit auf die Ausdrucksmächtigkeit von TURING-Automaten. Denn mit TURING-Automaten läßt sich eine Fülle unentscheidbarer Problemklassen formulieren. Den herausragenden Repräsentanten dieser Problemklassen stellt das Halteproblem dar, das bereits thematisiert wurde. Aus seiner Unentscheidbarkeit folgt die Unentscheidbarkeit aller anderen Problemklassen, die sich auf das Halteproblem von TURING-Automaten zurückführen lassen. Mit dieser Rückführungsmöglichkeit ist insbesondere dann zu rechnen, wenn bei der Konstruktion von Netzmodellen jene Ausdrucksmittel verwendet werden, die zur Erlangung der TURING-Mächtigkeit eingeführt wurden. Dazu gehören z.B. die oben erwähnten Inhibitorkanten.

14) Ein deutlicher Hinweis auf das Absinken der Operationalität von Modellierungen bei gesteigerter Ausdrucksmächtigkeit findet sich auch bei HURA (1982c), S. 433. Er stellt heraus, daß Modellierungen mit Zustandsautomaten noch ein großes Entscheidungsvermögen zukommt. Dagegen falle die Entscheidbarkeit von Modellierungen mit der Ausdruckskraft von TURING-Automaten sehr gering aus. Dabei entsprechen die Zustandsautomatenmodelle den Zustandsautomatennetzen, die bereits in einer früheren Anmerkung angesprochen wurden. Sie stellen eine Teilklasse der Stelle/Transition-Netze dar. Modellierungen, denen die Ausdruckskraft von TURING-Automaten zukommt, korrespondieren dagegen mit der Anwendung von Erweiterten Synthetischen Netzen.

15) Die Zwangsläufigkeit liegt darin begründet, daß in den Beweisen der Unentscheidbarkeit einer Entscheidungsproblemklasse auf eben diejenigen Ausdrucksmittel zurückgegriffen wird, die zur Ausdrucksmächtigkeit der jeweils betrachteten Netzklasse beitragen. Beispielsweise folgt die Semi-Entscheidbarkeit von Entscheidungsproblemklassen, die sich mit Synthetischen Kernnetzen modellieren lassen, erst aus der Bereicherung von Stelle/Transition-Netzen um prädikatenlogische Ausdrucksmittel. Denn erst innerhalb einer arithmetisch erweiterten Prädikatenlogik läßt sich das Halteproblem für TURING-Automaten formulieren. Aus dessen Unentscheidbarkeit resultiert letztlich die Semi-Entscheidbarkeit allgemeiner prädikatenlogischer Entscheidungsprobleme. Diese Semi-Entscheidbarkeit ist ein Spezialfall der Unentscheidbarkeit.

Es mag hier auf den ersten Blick als ein Widerspruch erscheinen, daß die Semi-Entscheidbarkeit der Synthetischen Kernnetze auf die Unentscheidbarkeit des Halteproblems von TURING-Automaten zurückgeführt wird, obwohl Synthetische Kernnetze noch nicht die Ausdrucksmächtigkeit von TURING-Automaten besitzen. Dieser scheinbare Widerspruch läßt sich jedoch leicht auflösen: Solange nur ein Synthetisches Kernnetz betrachtet wird, wird die allgemeine Modellierungsfähigkeit von TURING-Automaten grundsätzlich nicht erreicht. Dies gilt aber nicht mehr, wenn ein Entscheidungsproblem formuliert wird, das sich auf die Auswertung einer Klasse von Netzmodellen erstreckt. In diesem Fall kann die Unentscheidbarkeit des Halteproblems für TURING-Automaten wirksam werden, sobald die Netzmodelle das arithmetisch-prädikatenlogische Ausdrucksvermögen von Synthetischen Kernnetzen voll ausschöpfen dürfen. Denn in die *Formulierung des Entscheidungsproblems* für eine Klasse von Netzmodellen können Ausdrucksmittel eingehen, die bereits die Formulierungsmächtigkeit von TURING-Automaten voraussetzen, obwohl die zugrundeliegenden Netzmodelle selbst noch keine TURING-Mächtigkeit besitzen. Dies wird besonders deutlich für das unentscheidbare Problem, das kurz zuvor erwähnt wurde. Dort ging es um das Entscheidungsproblem, ob Stelle/Transition-Netze mit gleichen Stellenmengen die gleichen Erreichbarkeitsmengen besitzen. Zwar sind Stelle/Transition-Netze von der Ausdrucksmächtigkeit der TURING-Automaten noch weit entfernt. Aber für das Entscheidungsproblem, das sich auf die Klasse aller Stelle/Transition-Netze, deren Stellen- und deren Erreichbarkeitsmengen bezieht, existiert kein Entscheidungsalgorithmus. Denn diese *Problemformulierung* ist bereits so mächtig, daß sie den Ausdrucksreichtum von TURING-Automaten voraussetzt. Dies folgt aus dem Umstand, daß sich die Unentscheidbarkeit des vorgenannten Entscheidungsproblems nachweisen läßt, indem es auf die Unentscheidbarkeit des Halteproblems für TURING-Automaten zurückgeführt wird.

16) In dieser Hinsicht liegt eine besondere Variante des Modellierungsdilemmas vor, das an früherer Stelle behandelt wurde. Sie läßt sich anhand von Netzplänen und OR-Programmen verdeutlichen. Beide leiden nicht unter den Operationalitätsmängeln, die hier für die drei Netzklassen aufgezeigt wurden. Das wurde schon oben angemerkt. Dafür muß aber in Kauf genommen werden, daß die Netzplantechnik und das Konzept der OR-Programme nicht imstande sind, alle Probleme zu modellieren, die mit den drei beurteilten Netzklassen des Petrinetz-Konzepts erfaßt werden können. Das gilt vor allem in bezug auf die beiden Varianten Synthetischer Netze.

17) Vgl. dazu die frühere Differenzierung zwischen Entscheidungsalgorithmen und Entscheidungsverfahren.

18) Vgl. den Hinweis, daß mitunter nur einige wenige "pathologische" Probleme dazu führen, daß sich eine Problemklasse nicht mehr algorithmisch bewältigen läßt. Aus der Perspektive einer praktisch ausgerichteten Konzeptbeurteilung wäre es daher zu begrüßen, wenn zwei Aspekte bekannt sind: Erstens interessiert es, *welche* Probleme die Bewältigbarkeit einer Problemklasse verhindern. Zweitens ist es wünschenswert zu wissen, welche *praktische Relevanz* diesen Problemen zukommt. Beide Fragestellungen sind aber für die hier angesprochenen Operationalitätsdefizite des Petrinetz-Konzepts noch nicht systematisch untersucht worden. Es würde auch den Rahmen dieser Arbeit sprengen, nach Antworten darauf zu suchen. Daher wird die praktische Perspektive der Operationalitätsbeurteilung nicht weiterverfolgt. Dies entspricht der früheren Ausgrenzung der praktischen Operationalitätsvariante.

9.2.2.3.6 Realitätsadäquanz

Die Realitätsadäquanz¹⁾ eines Modellierungskonzepts stellt ein komplexes, in sich heterogenes Beurteilungskriterium dar. Dies gilt zumindest dann, wenn es zwecks inhaltlicher Präzisierung in die beiden Subkriterien der Vollständigkeit und der Natürlichkeit aufgespalten wird. Das Subkriterium der Vollständigkeit fordert, alle "wesentlichen" Aspekte der vorgegebenen Modellierungsobjekte repräsentieren zu können. Es wurde bereits anhand eines Katalogs spezieller Modellierungsfähigkeiten entfaltet und untersucht. Daher gehört es nicht zur hier interessierenden Modellierungsgüte, sondern zur früher beurteilten Modellierungsfähigkeit eines Modellierungskonzepts. Aus diesem Grund wird der Aspekt der Vollständigkeit als Determinante der Realitätsadäquanz in diesem Kapitel nicht mehr gewürdigt. Statt dessen wird im folgenden nur noch auf das Subkriterium der Natürlichkeit eingegangen²⁾.

Die Natürlichkeit³⁾ eines Modellierungskonzepts läßt sich durch zwei Teilaspekte konkretisieren: die Spezifität und die Fundiertheit. Einerseits erfordert eine natürliche Problemrepräsentation, daß jede wesentliche Problemdeterminante durch eine determinantenspezifische Modellkomponente repräsentiert wird (Spezifität). Andererseits soll sich auch jede Modellkomponente als Repräsentation einer wesentlichen Problemdeterminante rechtfertigen lassen (Fundiertheit).

Netzmodelle werden oftmals als natürliche, unmittelbare Repräsentationen von komplexen Problemen gelobt⁴⁾. Insbesondere die graphische Visualisierung der Netztopologie trägt zum Empfinden einer natürlichen Problemdarstellung bei. Denn die Art, in der die Knoten eines netzrepräsentierenden Graphen durch seine Kanten miteinander verknüpft werden, läßt sich auf unmittelbare, intuitive Weise als Veranschaulichung struktureller⁵⁾ Zusammenhänge auffassen. Ähnliches gilt für die visuelle Veranschaulichung von Prozessen durch Markenflüsse. Dabei entspricht die Bewegung von Markenkopien, die durch ein Netz fortgeschaltet werden, der natürlichen Anschauung vom Voranschreiten einer Prozeßausführung.

Allerdings existieren auch zwei deutliche Verletzungen des Natürlichkeitsgebots. Sie betreffen die Forderung nach Fundiertheit⁶⁾. Gegen das Fundiertheitsgebot wird durch artifizielle Konstruktionen verstoßen, die keine Repräsentation wesentlicher Problemdeterminanten leisten.

Ein erstes Artefakt schleicht sich bei der Repräsentation von Nebenbedingungen durch Stelle/Transition-Netze ein. Für diesen Zweck sind 1-Schleifen erforderlich. Die 1-Schleife besteht aus einer Transition, deren Aktivierung von der Erfüllung einer Nebenbedingung abhängt, und aus einer Stelle, welche die Nebenbedingung repräsentiert. Auf der Stelle befindet sich genau dann eine Markenkopie, wenn die Nebenbedingung erfüllt ist. Falls die aktivierte Transition schaltet, wird die Markenkopie von der Stelle abgezogen und *uno actu* dort wieder abgelegt. Dieser zirkulare Markenfluß ist sowohl notwendig als auch artifiziell. Der Markenfluß muß einerseits erfolgen, weil in Stelle/Transition-Netzen jedes Beeinflussen des Schaltens einer Transition zwangsläufig mit dem Entfernen oder Ablegen⁷⁾ von Markenkopien verbunden ist⁸⁾. Andererseits stellt der Markenfluß ein Artefakt dar. Denn dem schaltbedingten Fließen der Markenkopie in der 1-Schleife entspricht kein Aspekt der repräsentierten Nebenbedingung. Darüber hinaus erweist sich diese Repräsentationsweise nicht nur als unnatürlich, sondern sogar als widernatürlich⁹⁾: Die Bewegung der Markenkopie in der 1-Schleife besitzt die Qualität einer Veränderung. Dies steht im krassen Gegensatz zur "Natur" der repräsentierten Nebenbedingung, die per definitionem das Schalten der Transition beeinflussen, von diesem Schalten aber selbst nicht verändert werden soll¹⁰⁾.

Ein weiteres Artefakt wird in Erweiterten Synthetischen Netzen erforderlich, um die Anschauungsform "Zeit" in Netzmodellen berücksichtigen zu können. Denn zu diesem Zweck muß das spezielle Netzmodul der Systemuhr eingeführt werden. Die Systemuhr stellt aber keine wesentliche Determinante der modellierten Koordinierungsprobleme dar¹¹⁾. In der Regel umfassen

die Konzeptualisierungen der Realprobleme überhaupt keine Determinante, die den Charakter einer Uhr trägt. Daher handelt es sich beim Netzmodul der Systemuhr um ein typisches Artefakt¹²⁾.

Weitere Artefakte schleichen sich in die Koordinierung von Produktionsprozessen vor allem in der Gestalt von Sequentialisierungen ein. Sie liegen immer dann vor, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Einerseits läßt sich das Verhalten des modellierten Objekts auf natürliche Weise durch eine Menge von Ereignisgeschehnissen beschreiben, die zunächst nur einer Halbordnung unterliegen¹³⁾.
- Andererseits erfolgt die Koordinierung des Objektverhaltens derart, daß nur die sequentielle Abfolge von Ereignisgeschehnissen zugelassen wird.

Dann müssen in das Koordinierungskonzept sequentialisierende Restriktionen eingeflossen sein, die sich mit der natürlichen Beschreibung des Objektverhaltens nicht vereinbaren lassen. Solche künstlichen Sequentialisierungen sind bei produktionswirtschaftlichen Prozeßkoordinierungen oftmals anzutreffen¹⁴⁾. Daher wird die Natürlichkeit eines Modellierungskonzepts gefördert, wenn es von vornherein für die Gestaltung nicht-sequentieller Prozeßausführungen ausgelegt ist. Dies trifft auf das Petrinetz-Konzept in vorzüglicher Weise zu. Denn seine nebenläufigen Schaltprozesse erlauben es, auf alle künstlichen Sequentialisierungen von Grund auf zu verzichten. Daher liegt eine besondere Stärke des Petrinetz-Konzepts in der natürlichen Modellierung von nebenläufigen Prozessen¹⁵⁾. Das gilt für alle hier betrachteten Netzklassen.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. zur Forderung nach Realitätsadäquanz, Realitätsnähe u.ä. KERN,W. (1962b), S. 169; BRETZKE (1980), S. 235; CZERANOWSKY (1980), S. 54; VIEFHUES (1982), S. 145ff.; SCHRÖDER,H. (1983), S. 79.

Der Begriff der Realitätsadäquanz wurde in einer früheren Anmerkung ausführlicher erläutert. Dort wurden auch die nachfolgend benutzten Auffächerungen des Adäquanzbegriffs eingeführt.

2) Die Natürlichkeit der Modellierung kann sich nur auf solche Problemeterminanten beziehen, deren Repräsentation grundsätzlich möglich ist. Diese Feststellung mag auf den ersten Blick trivial erscheinen. Dennoch erweist sie sich hier als bedeutsam. Denn die Natürlichkeit der Modellierung kann bei einer Netzklasse durch Aspekte beeinträchtigt werden, die sich von einer anderen Netzklasse überhaupt nicht modellieren lassen. Insofern kann nicht ausgeschlossen werden, daß die Modellierungsnatürlichkeit einer Netzklasse als Begleiterscheinung ihrer anwachsenden Modellierungsvollständigkeit abnimmt. Dieses Phänomen stellt sich beim Übergang von Synthetischen Kernnetzen zu Erweiterten Synthetischen Netzen ein. Denn dieser Übergang erschließt erstmals die Repräsentationsmöglichkeit der Anschauungsform "Zeit". Insofern erhöht er die Vollständigkeit der Modellierung. Zugleich werden zeitbezogene Problemeterminanten mit der Hilfe einer zentralen Systemuhr erfaßt. Sie verletzt als Artefakt die Natürlichkeit der Modellierung. Darauf wird in Kürze zurückgekommen. Das gleiche Phänomen kann auftreten, wenn von Bedingung/Ereignis-Netzen ausgegangen wird, in denen auf die Modellierung von Nebenbedingungen verzichtet wird. Falls dann zu Stelle/Transition-Netzen übergewechselt wird, in denen Nebenbedingungen durch 1-Schleifen repräsentiert werden, nimmt die Modellierungsvollständigkeit zu. Zugleich wird die Natürlichkeit der Modellierung aber durch die widernatürliche Konstruktion der 1-Schleifen beeinträchtigt. Auch dies wird im folgenden näher ausgeführt.

Eine Alternative bestünde darin, die Natürlichkeit der Modellierung nur auf die Schnittmenge aller Problemeterminanten zu beziehen, die von den drei beurteilten Netzklassen gemeinsam repräsentiert werden können. Von dieser Beurteilungsvariante wird jedoch Abstand genommen. Denn sie verwehrt den Blick auf die Natürlichkeit der Repräsentation jener Problemeterminanten, die nicht zur vorgenannten Schnittmenge gehören.

3) Die Forderung nach Natürlichkeit der Modellierung wird oftmals in verschiedenen terminologischen Varianten vorgetragen. So wird beispielsweise auch von "unmittelbaren" Modellierungen gesprochen. Wesentliche inhaltliche Nuancierungen hinsichtlich der zugrundeliegenden intuitiven Vorstellung über eine "natürliche" oder "unmittelbare" Modellierung lassen sich dabei aber nicht entdecken. Vgl. zu solchen Stellungnahmen zugunsten einer natürlichen, unmittelbaren o.ä. Modellierungsweise ZAVE (1976), S. 35; ZERVOS (1977), S. 16; MOALLA (1977), S. 90; BEKHI (1989), S. 245; JÄHNICHEN (1990), S. 6.

Das Verständnis der Modellierungsnatürlichkeit, auf dem die hier vorgelegten Ausführungen beruhen, wurde schon in einer früheren Anmerkung erläutert.

4) Vgl. zur Natürlichkeit von Netzmodellen BAKER,H. (1973a), S. 1 (er hebt die Modellierungsnatürlichkeit von Netzen gegenüber derjenigen von TURING-Automaten hervor); AGERWALA (1975), S. 15 u. 218; PETERSON,J. (1977), S. 249; MELDMAN (1977), S. 32f. u. 36 (allerdings in abweichender Formulierung als Expliztheit der Modellierung); GODBERSEN (1978), S. 46; MEMMI (1978c), S. 505; AGERWALA (1978b), S. 309; HAN (1979), S. 271; CARSTENSEN (1982), S. 3; HURA (1982c), S. 438; HANSEN,N. (1983), S. 132; BEKHI (1989), S. 245.

5) Hiermit sind nicht nur Zusammenhänge der statischen, sondern ebenso der dynamischen Struktur gemeint. Denn die kausale Interpretation der Kanten eines Netzes, die im Kontext Synthetischer Netze besonders herausgestellt wurde, bietet einen unmittelbaren Zugang zur Netzdynamik.

6) Die komplementäre Forderung nach Spezifität wird von den drei Netzklassen, die hier beurteilt werden, erfüllt. Dies trifft aber auf das Petrinetz-Konzept als Ganzes nicht mehr zu. Denn das Spezifitätsgebot wird z.B. von Prädikat/Transition-Netzen verletzt. Denn dort werden sowohl bewegliche Objekte als auch deren Eigenschaften durch das gleiche Netzkonstrukt - ein "Individuum" oder ein Tupel aus "Individuen" - repräsentiert. Den Individuen eines Prädikat/Transition-Netzes läßt es sich nicht unmittelbar ansehen, ob sie jeweils ein eigenständiges Objekt oder aber nur eine objektzugehörige Eigenschaft darstellen sollen. Dies verstößt aber gegen das Spezifitätsgebot. Denn sowohl Objekte als auch ihre Eigenschaften können zu den "wesentlichen" Determinanten eines Problems gehören. Zugleich handelt es sich bei Objekten und ihren Eigenschaften um kategorial verschiedene Entitäten. Daher widerspricht es der Intuition einer natürlichen Modellierung, zwei wesentliche, kategorial verschiedene Problemeterminanten in einem Netzmodell durch das gleiche Netzkonstrukt zu repräsentieren. Diese Unzulänglichkeit trug an früherer Stelle dazu bei, dem Konzept Synthetischer Netze eine "Markenontologie" zugrunde zu legen, um den voranstehend skizzierten Mangel zu vermeiden. Er wird in Synthetischen Netzen dadurch ausgeschlossen, daß zwischen einerseits Marken, deren Kopien eigenständige Objekte repräsentieren, und andererseits Markenattributen, die Objekteigenschaften wiedergeben, streng unterschieden wird.

Gegen das Spezifitätsgebot verstoßen ebenso die Auswertungsnetze, die in einer früheren Anmerkung erwähnt wurden. Dort können Entscheidungsalternativen allenfalls in den Schaltprozeduren von Transitionen berücksichtigt werden. Auf diese Weise lassen sich zwar Entscheidungsalternativen repräsentieren. Aber sie gehören zu den "wesentlichen" Determinanten von Koordinierungsproblemen. Daher bedarf es aufgrund des Spezifitätsgebots einer ge-

sonderten Konstruktion, in der das Vorliegen von Entscheidungsalternativen offensichtlich wird. Bei den Netzklassen, die in dieser Arbeit behandelt wurden, wird diese Anforderung erfüllt. Denn alle Entscheidungsalternativen werden durch Knappheits-, Abundanz- und Permissivitätskonflikte von Transitionen als solche deutlich hervorgehoben. Diese Konflikte stellen ein Spezifikum dar, das speziell auf die Repräsentation von Entscheidungsalternativen - einschließlich der Unterlassungsalternative - zugeschnitten ist. In Auswertungsnetzen treten dagegen die Entscheidungsalternativen, die in den Schaltprozeduren erfaßt werden, keineswegs als solche hervor. Vielmehr werden sie durch die Vermengung mit anderen Prozedurdeterminanten vor dem unmittelbaren Gewährwerden verborgen. Nur ein überaus sorgfältiges Studium von Auswertungsnetzen läßt erkennen, ob - und gegebenenfalls wo - Entscheidungsalternativen berücksichtigt sind. Damit verletzen Auswertungsnetze auch das Postulat von NOE (1975a), S. 5, in Modellen sollten das Verhalten oder die Struktur des jeweils modellierten Originals nicht verdeckt werden. Schließlich könnten den Synthetischen Netzen einige Spezifitätsverletzungen besonderer Art vorgehalten werden. Sie erstrecken sich darauf, wie in Synthetischen Netzen logische Formelsysteme wiedergegeben werden:

- Für die Repräsentation von atomaren aussagenlogischen Formeln existiert kein spezielles Netzkonstrukt. Statt dessen werden die Formeln, bei denen es sich aus prädikatenlogischer Perspektive um atomare nullstellige Formeln handelt, in bedeutungsgleiche einstellige Formeln transformiert. Diese einstelligen Formeln werden im Prinzip genau so erfaßt wie "gewöhnliche" einstellige Prädikate, die Eigenschaften von Objekten repräsentieren. In beiden Fällen kann die eine Argumentstelle der Formeln von der Kopie einer argumentsspezifischen Markenart eingenommen werden. Die einstelligen Formeln, die aus aussagenlogischen Formeln hervorgegangen sind, zeichnen sich lediglich dadurch aus, daß ihre eine Argumentstelle von vornherein auf Kopien der Basismarke eingeschränkt wird.
- Junktoren, mit denen atomare Formeln untereinander verknüpft sind, werden in deklarativen Netzmodellen grundsätzlich nicht durch spezielle Netzkonstrukte erfaßt. Vielmehr sind sie im topologischen Netzzusammenhang implizit enthalten, der durch die Konstruktionsweise deklarativer Netzmodelle festgelegt wird. In operationalen Netzmodellen werden konjunktive Formelverknüpfungen ebenso nicht explizit dargestellt. Immerhin werden adjunktive und disjunktive Verknüpfungen durch entsprechende Kantenverknüpfungen repräsentiert. Negationen werden mit der Hilfe von Inhibitorkanten ausgedrückt.
- Quantoren werden grundsätzlich nicht durch spezifische Netzkonstrukte ausgedrückt. Statt dessen gelten im Regelfall alle Variablen aus Formeln, die in einem Netzmodell repräsentiert werden, als allquantifiziert. Ihren Allquantoren entsprechen in Netzmodellen aber keine eigenständigen Netzkonstrukte. Die Allquantifizierung gilt als implizit vereinbart. Für Existenzquantoren wird vorausgesetzt, daß sie zuvor durch Skolemisierungsoperationen in Allquantoren transformiert worden sind. Nur in Sonderfällen, in denen mit faktischen Transitionen gearbeitet wird, lassen sich auch Existenzquantoren berücksichtigen. Diese Existenzquantoren gehen dann aber aus der Konstruktion der faktischen Transitionen auch nur implizit hervor.

Diese Vorbehalte werden aber nicht als Argumente gegen die Natürlichkeit von Netzmodellen eingestuft, die auf Synthetischen Netzen aufbauen. Denn die Repräsentation eines Realproblems durch aussagen- oder prädikatenlogische Formelsysteme stellt bereits ein stark formalisiertes Objektmodell dar. Es ist weit entfernt von der intuitiven Vorstellung einer "natürlichen" Modellierung. Daher wird hier das Spezifitätsgebot nur auf die mentale Wahrnehmung oder auf die natürlichsprachliche Beschreibung eines Realproblems bezogen. Es erstreckt sich aber nicht mehr auf die formalsprachliche Problemspezifizierung durch ein logisches Formelsystem. Daher werden die vorgenannten "Mängel" Synthetischer Netze auch nicht als Verstöße gegen das Spezifitätsgebot natürlicher Modellierungen qualifiziert.

7) Die Schaltbeeinflussung durch Markenkopien, die von der Eingangsstelle einer Transition abgezogen wird, ist offensichtlich. Denn die Transition kann nur dann aktiviert sein - und a fortiori auch erst dann schalten -, wenn sich auf ihren Eingangsstellen die erforderlichen Markenkopien befinden. Ausgangsstellen einer Transition können dagegen durch ihre Markenkapazitäten die Aktivierung - und somit auch das Schalten - der Transition verhindern. Dies ist immer dann der Fall, wenn unter der aktuellen Netzmarkierung die freie Markenkapazität der Stelle nicht ausreicht, um alle Markenkopien aufzunehmen, die beim Schalten der Transition auf ihr abgelegt würden.

8) Die Abhängigkeit der Transitionsaktivierung von der Erfüllung der Nebenbedingung läßt sich nur dadurch erfassen, daß die Markenkopie, die auf der Stelle die Erfüllung der Nebenbedingung anzeigt, von eben dieser Stelle zunächst abgezogen wird. Zugleich soll die Erfüllung der Nebenbedingung durch das Schalten der Transition nicht verändert werden. Dies folgt unmittelbar aus dem Begriff der Nebenbedingung. Daher muß die Markenkopie auf dieselbe Stelle, von der sie entfernt wurde, uno actu wieder abgelegt werden.

Bei Synthetischen Netzen ist die voranstehende Konstruktion nicht erforderlich. Dort können Schaltbeeinflussungen auch durch die flußfreie Kenntnisnahme der Attributausprägungen von Markenkopien erfolgen, die sich auf einer Informationsstelle befinden. Hinzu kommt die Schaltbeeinflussung durch das Nichtvorhandensein von Markenkopien auf einer Stelle, die mit der betroffenen Transition über eine Inhibitorkante verknüpft ist. Aus beiden Gründen lassen sich Nebenbedingungen in Synthetischen Netzen modellieren, ohne auf die artifiziellen Markenflüsse der 1-Schleifen von Stelle/Transition-Netzen zurückgreifen zu müssen. Statt dessen leisten Informationskanten und Inhibitorkanten eine natürlich anmutende Repräsentation von Nebenbedingungen. Darüber hinaus sind sie so ausdrucksmächtig, daß das Schalten einer Transition sowohl vom Erfülltsein als auch vom Nichterfülltsein einer

Nebenbedingung abhängen darf. Im ersten Fall wird auf Informations-, im zweiten auf Inhibitoranten zurückgegriffen. Daher gilt die o.a. Kritik an der unnatürlichen Repräsentation von Nebenbedingungen nur für Stelle/Transition-Netze.

Anhand der voranstehenden Gegenüberstellung, in der die artifizielle Repräsentation von Nebenbedingungen in Stelle/Transition-Netzen mit der natürlichen Repräsentation von Nebenbedingungen in Synthetischen Netzen konfrontiert wird, läßt sich ein grundsätzliches Defizit zahlreicher Netzklassen verdeutlichen. Angesprochen sind alle Netzklassen, in denen Beeinflussungen des Schaltverhaltens von Transitionen stets mit der Bewegung von Markenkopien verknüpft sind. Stelle/Transition-Netze gehören dazu ebenso wie Prädikat/Transition-Netze, Bedingungs/Ereignis-Netze und eine Vielzahl weiterer Netzklassen. Die Kopplung von Schaltbeeinflussungen an Markenbewegungen resultiert aus den historischen Wurzeln des Petrinetz-Konzepts. Denn PETRI befaßte sich in seiner wegweisenden Dissertation mit der Aufgabe, den physikalischen Signalfluß in realen Automatischen Informationsverarbeitungssystemen zu modellieren. Vgl. dazu PETRI, C. (1962a), passim. Aus dieser Perspektive war es folgerichtig, alle Beeinflussungen von informationsverarbeitenden Aktivitäten auf den Fluß realer Objekte - auf die Ausbreitung physikalischer Signale - zurückzuführen. Dieser konzeptionelle Ansatz durchdringt die meisten Netzmodellierungen auch noch heute. Er führt dazu, alle Beeinflussungen der Schaltaktivitäten von Transitionen auf den Fluß von objekt- oder signalrepräsentierenden Markenkopien zu beziehen. Diese einseitige Ausrichtung an Objekt-, Signal- oder Markenflüssen wird mitunter sogar als besonderer Vorzug von Petrinetzen hervorgehoben; vgl. z.B. GENRICH (1980c), S. 720.

Dabei wird jedoch übersehen, daß Netzmodelle oftmals auf einer Abstraktionsebene verwendet werden, auf der die Repräsentation eines realen Problems von den physikalischen Konstituenten des betroffenen Realitätsausschnitts weit abgehoben ist. Dies trifft auch auf das oben diskutierte Beispiel der Repräsentation von Nebenbedingungen zu. Dort interessiert es in keiner Weise, daß die Überprüfung, ob eine Nebenbedingung tatsächlich erfüllt ist, auf der informationstechnischen Ebene mit einem physikalischen Signalfluß in einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem verbunden sein kann. Statt dessen nimmt das "natürliche" Verständnis einer Nebenbedingung solche informationstechnischen Details überhaupt nicht wahr. Daher erfordert die natürliche Modellierung einer Nebenbedingung, sich von der historischen Grundlage des Petrinetz-Konzepts - der Modellierung physikalischer Signalflüsse - zu verabschieden. Folglich muß die "abstrakte" Modellierungsebene, auf der sich ein Modellierungsträger mit seinem intuitiven Verständnis einer Nebenbedingung bewegt, von der physikalischen Basisebene entkoppelt werden. Diese Entkopplung ist in den o.a. Netzklassen nicht vollzogen worden. Dort liegt immer noch das Denken in physikalischen Signalflüssen zugrunde. Das gilt auch dann noch, wenn die konzeptionelle Verwurzelung dieser Denkweise zahlreichen Netzanwendern nicht mehr bewußt sein mag. Erst durch Netzkonstrukte, die das *flußfreie* Beeinflussen der Schaltaktivitäten von Transitionen gestatten, emanzipiert sich das Petrinetz-Konzept von den Fesseln seiner Kopplung an physikalische Signalflüsse. Genau dies leisten die oben angeführten Informations- und Inhibitoranten.

9) Eine artifizielle Problemrepräsentation wird hier als "nur unnatürlich" bezeichnet, wenn das Artefakt lediglich keine Entsprechung im repräsentierten Problem findet. Dagegen wird von einer "widernatürlichen" Problemrepräsentation gesprochen, wenn das Artefakt darüber hinaus einem charakteristischen Aspekt des repräsentierten Problems krass zuwiderläuft.

10) Die Widernatürlichkeit läßt sich auch durch das Argument einer doppelten Fehlerkompensation veranschaulichen, das in einer früheren Anmerkung angeführt wurde: Zunächst wird der Repräsentationsfehler begangen, die Markenkopie, die das Erfülltsein der Nebenbedingung ausdrückt, von ihrer Stelle abzuziehen. Da die Erfüllung der Nebenbedingung vom Schalten der Nebenbedingung nicht verändert werden soll, muß der erste Repräsentationsfehler durch ein zweite, abermals fehlerhafte Markenbewegung kompensiert werden. Dadurch wird die zuvor abgezogene Markenkopie auf der Stelle wieder abgelegt. Nur durch die gegenseitige Kompensation der beiden fehlerhaften Markenbewegungen wird insgesamt erreicht, daß die Nebenbedingung "unverändert" erfüllt wird.

Aufgrund der voranstehend erläuterten Repräsentationsprobleme wird mitunter die Ansicht vertreten, Nebenbedingungen sollten oder könnten in Petrinetzen grundsätzlich nicht repräsentiert werden. Diese Meinung wird vor allem in bezug auf Bedingungs/Ereignis-Netze artikuliert; vgl. PETRI, C. (1977a), S. 150; COX, L. (1978), S. 905; GENRICH (1980c), S. 720. Die Ausgrenzung von Nebenbedingungen erfolgt des öfteren auch aus einem anderen, lösungsorientierten Motiv. Dort geht es darum, Analyseprobleme mit Hilfe der Auswertung von Inzidenzmatrizen zu lösen. Auf diesem Ansatz beruht z.B. die Auswertungstechnik der Invariantenanalyse. In Inzidenzmatrizen können aber 1-Schleifen nicht erfaßt werden. Daher wird von solchen Auswertungstechniken im allgemeinen vorausgesetzt, es müßten "reine" - d.h. von allen 1-Schleifen freie - Netzmodelle vorliegen. Dadurch wird die Repräsentation von Nebenbedingungen ebenso verhindert.

Wenn dieser Ansicht gefolgt wird, geht allerdings eine wesentliche Determinante der Modellierungsvollständigkeit verloren. Denn dann wird auf die Repräsentation von Nebenbedingungen, die für die Modellierung von Realproblemen durchaus eine bedeutsame Rolle spielen können, von vornherein verzichtet. Daher folgt der Verf. diesem Repräsentationsverzicht nicht.

Eine analoge widernatürliche Problemrepräsentation findet sich auch bei Selbstmodifizierenden Netzen. Sie beruhen auf dem Ansatz, Netzkanten mit variablen Gewichten zu versehen. Die Kantengewichte werden in Selbstmodifizie-

renden Netzen auf die aktuellen Markierungen jeweils einer Stelle bezogen. Veränderungen der Stellenmarkierungen entstehen durch Schaltprozesse. Variable Stellenmarkierungen tragen daher zur Repräsentation von Netzverhaltensweisen bei. Wenn die Markenanzahl auf einer Stelle zwischen dem Wert Null und beliebigen positiven Werten wechselt, gilt das Gleiche für den Wert desjenigen Kantengewichts, das mit der Markierung dieser Stelle identifiziert worden ist. Ein Kantengewicht mit dem Wert Null bedeutet jedoch das Nichtvorhandensein der Kante, während jedes positive Kantengewicht die Existenz der Kante voraussetzt. Nichtvorhandensein und Existenz von Kanten stellen einen Aspekt des strukturellen Netzzusammenhangs dar. Folglich kann es in Selbstmodifizierenden Netzen dazu kommen, daß markierungsverändernde Netzverhaltensweisen zugleich auch die Netzstruktur "modifizieren". Im Regelfall liegt solchen Strukturmodifizierungen jedoch keine entsprechende strukturelle Veränderung des repräsentierten Problems zugrunde. Daher stellt die Vermengung von Verhaltens- und Strukturaspekten in Selbstmodifizierenden Netzen in der Regel ein unerwünschtes Artefakt dar. Auch aus diesem Grund steht der Verf. dieser Netzklasse ablehnend gegenüber. Vgl. auch die kurze Auseinandersetzung mit Selbstmodifizierenden Netzen.

11) Daher stellt die zentrale Systemuhr einen jener übermäßigen Kunstgriffe zur Modellierung vertrauter Problem Aspekte dar, die ZAVE (1976), S. 35, aus dem Blickwinkel der Natürlichkeit zu Recht kritisiert.

12) Allerdings ist zu beachten, daß das Vermeiden dieses Artefakts zu erheblichen unerwünschten Nebenwirkungen führen würde. Denn entweder müßte von vornherein darauf verzichtet werden, Prozesse in der Anschauungsform "Zeit" zu repräsentieren. Dies ist bei Stelle/Transition-Netzen und Synthetischen Netzen ebenso wie bei den meisten anderen Netzklassen der Fall. Oder es würden sich die gravierenden Modellierungsmängel von stellen- und transitionsbezogenen Zeitnetzen einstellen, die an früherer Stelle erörtert wurden. Daher hat sich der Verf. zugunsten des "kleinsten Übels" entschieden, die beiden vorgenannten Alternativen zu vermeiden, indem markenzugewandene Zeitnetze mit dem Artefakt einer zentralen Systemuhr benutzt werden. Darüber hinaus wurde gezeigt, daß sich mit der Hilfe des Artefakts "Systemuhr" immerhin noch eine natürlicher anmutende Erfassung der Anschauungsform "Zeit" verwirklichen läßt, als es bei Datenmodellierungen auf der Grundlage von relationalen Datenbankschemata oder von Entity Relationship-Ansätzen üblich ist.

13) Ob diese Halbordnung durch kausale Folgebeziehungen oder durch temporale Präzedenzbeziehungen konstituiert wird, spielt dabei keine Rolle.

14) Dies wurde anhand sequentieller Arbeitspläne in exemplarischer - aber ausführlicher - Weise aufgezeigt. Vgl. auch die Anmerkungen zur opportunistischen Prozeßkoordinierung.

15) Vgl. AGERWALA (1978b), S. 309. Die Natürlichkeit der Modellierung von Nebenläufigkeit klingt auch bei CARSTENSEN (1982), S. 3, an. Er hebt hervor, daß TURING-Automaten bei weitem keine so natürliche Repräsentation nebenläufiger Prozesse erreichen, wie sie sich bei der Verwendung von Petrinetzen erzielen läßt.

9.2.2.3.7 Einfachheit

Das Kriterium der Einfachheit¹⁾ fordert, Modellierungen mit dem geringst möglichen Einsatz von Konstruktions- und Analysemitteln zu verwirklichen. Dieses Sparsamkeitsgebot gilt allerdings nur in dem Ausmaß, wie seine Beachtung den Erfüllungsgrad anderer Beurteilungskriterien nicht gefährdet²⁾. Die Forderung nach Modellierungseinfachheit verhält sich komplementär zum Postulat der Realitätsadäquanz. Denn aus der Perspektive der Realitätsadäquanz wurde u.a. danach gestrebt, alle "wesentlichen" Aspekte von Modellierungsobjekten repräsentieren zu können³⁾. Dies schloß keineswegs aus, darüber hinaus auch "unwesentliche"⁴⁾ Objektfacetten zu repräsentieren. Erst aus der Vorgabe der Einfachheitsforderung, mit Konstruktions- und Analysemitteln so sparsam wie möglich umzugehen, folgt das komplementäre Verdikt, die Repräsentation aller unwesentlichen Aspekte von Modellierungsobjekten zu unterlassen⁵⁾.

Die Beurteilung der Einfachheit eines Modellierungskonzepts bereitet erhebliche Schwierigkeiten⁶⁾. Der Verf. sieht keinen erfolgversprechenden Ansatz, der es gestatten würde, die Konzept Einfachheit mit affirmativer Intention zu überprüfen. Statt dessen ist es allenfalls möglich zu erkennen, daß gegen die Einfachheitsforderung verstoßen wird. Zu diesem Zweck ist es erforderlich, die unnötige Kompliziertheit eines Modellierungskonzepts nachzuweisen. Dafür muß zumindest eine konzeptionelle Alternative aufgezeigt werden, die mit geringeren⁷⁾ Konstruktions- und Analysemitteln auskommt⁸⁾. Darüber hinaus liegt erst dann eine echte Modellierungsvereinfachung vor, wenn das Alternativkonzept alle anderen Beurteilungskriterien mindestens ebenso gut wie das beurteilte Modellierungskonzept zu erfüllen vermag⁹⁾. Falls ein solcher zweischichtiger Vereinfachungsnachweis nicht gelingt, ist damit aber noch keineswegs die Einfachheit des beurteilten Modellierungskonzepts bestätigt. Denn das Scheitern des Vereinfachungsversuchs kann auch an der mangelnden Phantasie des Konzeptbeurteilenden liegen.

Des öfteren wird die Einfachheit von Modellierungen mit Petrinetzen gepriesen¹⁰⁾. Der Maßstab der Einfachheit bleibt dabei aber im dunkeln. Eine vereinfachte Modellierung gegenüber anderen Modellierungskonzepten wird ebensowenig nachgewiesen. Allenfalls läßt sich die Modellierungseinfachheit auf die Möglichkeit der graphischen Netzrepräsentation zurückführen. Dabei scheinen aber die Kriterien der Einfachheit und Anschaulichkeit miteinander verwechselt zu werden¹¹⁾. Denn es läßt sich nicht nachvollziehen, warum graphische Modellierungsweisen per se besonders einfach ausfallen sollen. Es wird in dieser Hinsicht auf die Netzgraphiken der Fallstudie verwiesen, z.B. auf die Modellierung des Transportsystems oder einer Bearbeitungsstation. Der Verf. trägt erhebliche Bedenken, diese Netzgraphiken, die sich über mehrere Seiten hinweg erstrecken, noch als "einfach" einzustufen¹²⁾. Darüber hinaus ist zu beachten, daß den graphischen Netzrepräsentationen formale Netzspezifikationen zugrundeliegen, die im allgemeinen intuitiven Vorstellungen über einfache Modellierungen zuwiderlaufen¹³⁾.

Immerhin lassen sich zwei Ansatzpunkte identifizieren, die prima facie konkrete Erkenntnisse über die Einfachheit oder über die unnötige Kompliziertheit von Netzmodellen vermitteln. Einerseits ist die Repräsentation von Nebenbedingungen betroffen. Andererseits geht es um die Darstellung von aussagenlogischen Formeln.

Die Repräsentation von Nebenbedingungen erfordert in Stelle/Transition-Netzen die Konstruktion von 1-Schleifen. In Synthetischen Netzen¹⁴⁾ läßt sich die gleiche Modellierungsaufgabe mit Informationsstellen und -kanten erfüllen. Auf den ersten Blick führen Synthetische Netze zu einer vereinfachten Repräsentation von Nebenbedingungen. Denn an die Stelle der *zwei* entgegengesetzt gerichteten Kanten einer 1-Schleife tritt - *ceteris paribus* - nur *eine* Informationskante. Darüber hinaus sinkt der Erfüllungsgrad keines anderen Beurteilungskriteriums, wenn Nebenbedingungen nicht mehr durch 1-Schleifen, sondern durch Informationsstellen und -kanten repräsentiert werden¹⁵⁾. Dennoch liegt bei genauerer Analyse keine Vereinfachung vor. Denn der Reduzierung der *Kantenanzahl* steht eine Vergrößerung der *Kantenarten* gegenüber. In Synthe-

tischen Netzen werden nicht nur die Ein- und Ausgangskanten von Transitionen¹⁶⁾ unterschieden. Vielmehr kommen die Informationskanten als eigenständige dritte Kantenart hinzu¹⁷⁾. Daher steht der Vereinfachung bei der Kantenzahl eine Komplizierung hinsichtlich der Kantenarten gegenüber. Von einer echten Modellierungsvereinfachung im oben festgelegten Sinne kann daher nicht gesprochen werden¹⁸⁾.

Bei der Wiedergabe einer atomaren aussagenlogischen Formel scheinen dagegen Synthetische Netze zu einer unnötig komplizierten Konstruktion zu führen. Denn die atomare aussagenlogische Formel wird zunächst aus prädikatenlogischer Perspektive als der Grenzfall einer atomaren nullstelligen Formel behandelt. Danach wird dieses nullstellige Prädikat in eine bedeutungsgleiche einstellige Formel transformiert. Dabei wird ein - an sich bedeutungsloses - Objekt eingeführt, das die eine Argumentstelle der einstelligen Formel einnehmen kann. Es wird vereinbart, daß das Objekt die Argumentstelle genau dann belegt, wenn die zugrundeliegende aussagenlogische Formel gültig ist. Das Objekt erhält dadurch die metasprachliche Qualität, durch seine Anwesenheit die Gültigkeit der aussagenlogischen Formel anzuzeigen. Diese Formel wird in einem Synthetischen Netz durch ein einstelliges Prädikatssymbol repräsentiert, dessen eine Argumentstelle durch die Sorte "basismarke" definiert ist. Auf der Stelle, die dem Prädikatssymbol zugeordnet ist, darf sich entweder genau eine oder überhaupt keine Kopie der Basismarke befinden. Die unterschiedslosen Kopien der Basismarke entsprechen daher dem oben eingeführten Objekt mit metasprachlichem Charakter.

In einem Bedingung/Ereignis-Netz kann dagegen eine atomare aussagenlogische Formel auf eine wesentlich einfachere Weise berücksichtigt werden. Sie wird direkt mit einer Stelle assoziiert, die entweder mit genau einer Kopie der Basismarke markiert sein darf oder aber unmarkiert ist. Die beiden Markierungszustände entsprechen den beiden metasprachlichen Gültigkeitsstadien der zugeordneten aussagenlogischen Formel. Aufgrund dieser einfachen und übersichtlichen Konstruktion erscheint die zuvor skizzierte Repräsentationsweise bei Synthetischen Netzen unnötig kompliziert. Dieser erste Eindruck täuscht jedoch abermals. Denn die vereinfachte Konstruktion aus Bedingung/Ereignis-Netzen läßt sich auf Synthetische Netze nicht übertragen, ohne Beeinträchtigungen der Erfüllungsgrade anderer Beurteilungskriterien hinnehmen zu müssen.

Durch die Umdeutung von aussagenlogischen Formeln in nullstellige prädikatenlogische Formeln wird zunächst erreicht, daß sich in Synthetischen Netzen alle aussagen- und prädikatenlogischen Formeln in *einheitlicher* Weise erfassen lassen. Darüber hinaus erlaubt die zusätzliche Transformation der resultierenden nullstelligen Prädikate in einstellige prädikatenlogische Formeln, daß sich ein zentrales Gestaltungsprinzip Synthetischer Netze auf alle prädikatenlogischen Formeln *einheitlich* anwenden läßt. Es handelt sich um den Ansatz, die semantische Dimension der Extension eines Prädikatssymbols durch das syntaktisch definierte Konstrukt einer Multimenge aus Markenkopien darzustellen¹⁹⁾. Folglich würde die scheinbare Vereinfachung der Repräsentation atomarer aussagenlogischer Formeln in Bedingung/Ereignis-Netzen zu einem doppelten Verlust an Einheitlichkeit in Synthetischen Netzen führen. Dies widerspricht ein zweites Mal der oben präzisierten Auffassung von einer echten Modellierungsvereinfachung.

Über die beiden vorgenannten - aber gescheiterten - Ansätze hinaus läßt sich kein erfolgversprechender Beitrag entdecken, um eine echte Vereinfachung von Stelle/Transition-Netzen, Synthetischen Kernnetzen oder Synthetischen Netzen durchzuführen. Ebenso wenig drängt sich ein alternatives Modellierungskonzept auf, das eine einfachere Modellierung gestattet, als sie mit Petrinetzen durchgeführt werden kann²⁰⁾. Aufgrund des Prinzips vom unzureichenden Grunde wird daher allen drei Netzklassen konzidiert, sie erlaubten eine einfache Modellierung²¹⁾.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Die Forderung nach konzeptioneller Einfachheit oder Sparsamkeit wird in vielfältigen Kontexten erhoben; vgl. z.B. WITTGENSTEIN (1921), S. 236ff. (S. 237: "simplex sigillum veri") u. 259; SCHLICK (1930a), S. 148; RUSSELL, B. (1952), S. 467; CARNAP (1959a), S. 15; POPPER (1965a), S. 241; STEGMÜLLER (1970a), S. 110, 152, 154f., 159f., 167, 176f. u. 373; LITTLE, J. (1970), S. B-470; POPPER (1972a), S. 35; THIEL, C. (1972), S. 165f. u. 173ff.; ESSLER (1975), S. 105f.; RESCHER (1976a), S. 102ff.; STEGMÜLLER (1976b), S. 375; SALMON (1977), S. 43; ZERVOS (1977), S. 16; BUSCH, R. (1977), S. 9; RESCHER (1979), S. 11, 77, 79, 83 u. 97; CHMIELEWICZ (1979), S. 38 u. 285; JACKSON, M.A. (1979), S. 8; PUTNAM, H. (1982a), S. 180 u. 183f.; COOMANN (1983), S. 183; REGGIA (1983), S. 438f.; POPPER (1984a), S. 73f. u. 97ff.; POPPER (1984b), S. 205 u. 378; RESCHER (1985a), S. 97 u. 153; STEGMÜLLER (1986a), S. 260, 268f. u. 299f.; PENG, Y. (1986), S. 140f. u. 144; RESCHER (1987a), S. 44, 49, 52, 57f., 62 u. 184ff., insbesondere S. 187f.; RESCHER (1987b), S. 15; ALBERT, H. (1987), S. 103; BERNDT (1987), S. 106.

Eine besonders prägnante Zusammenfassung erfährt das Einfachheitspostulat im Prinzip von "OCCAM's razor" (mitunter auch: "OCCAM's razor"). Es findet sich in leicht variierenden Formulierungen, aber mit gleichem Inhalt bei WITTGENSTEIN (1921), S. 238; RUSSELL, B. (1975), S. 481 ("Entitäten sollten nicht unnötig vervielfacht werden." und: "Es ist unnützlich, etwas mit mehr zu tun, was auch mit weniger getan werden kann."); STEGMÜLLER (1976b), S. 371 ("entia non sunt multiplicanda sine necessitate"); PUTNAM, H. (1982a), S. 180; POPPER (1984b), S. 305 u. 314; KAY, A. (1984), S. 38 ("Non sunt multiplicanda entia praeter necessitatem"); RESCHER (1985a), S. 97; PENG, Y. (1986), S. 141.

2) Ohne diese Vorbehalte ließe sich eine besonders einfache Modellierung z.B. dadurch erzielen, daß nahezu überhaupt keine Konstruktions- und Analysemittel eingesetzt werden. Die Modellierung fällt dann zwar überaus "sparsam" aus. Zugleich muß aber auch wegen der mangelnden konstruktiven Ausdrucksmittel mit hoffnungslos inadäquaten Repräsentationen von Realproblemen gerechnet werden. Ebenso ist zu befürchten, daß das analytische Potential infolge fehlender Analysemittel überaus dürftig bleibt. Solche Pervertierungen des Sparsamkeitsprinzips werden durch die oben erfolgte Einschränkung verhindert.

3) Vgl. dazu das Subkriterium der Vollständigkeit.

4) Die inhaltliche Festlegung der Unwesentlichkeit erfolgt reziprok zur Demarkation von Wesentlichem.

5) Der Verzicht auf die Repräsentation unwesentlicher Aspekte kann ebenso dadurch ausgedrückt werden, daß eine Einschränkung auf die Darstellung aller wesentlichen oder charakteristischen Facetten erfolgt. Vgl. zu den beiden vorgenannten, inhaltlich äquivalenten Ausdeutungen des Einfachheitspostulats LITTLE, J. (1970), S. B-470; BUSCH, R. (1977), S. 9.

6) Eine ausführliche Diskussion der Probleme, den Einfachheitsbegriff inhaltlich zu präzisieren, findet sich bei POPPER (1984a), S. 97ff. Zur Veranschaulichung der Präzisierungsschwierigkeiten eignen sich bereits die einleitenden Feststellungen POPPER'S: "Noch vor kurzem hat man den Begriff der Einfachheit völlig unkritisch angewendet ... Nicht wenige erkenntnistheoretische Versuche räumten dem Begriff der Einfachheit eine überragende Stellung ein, ohne das Problematische dieses Begriffes überhaupt zu bemerken ...; dennoch wird eine Präzisierung selten versucht." (S. 97). Allerdings folgt der Verf. nicht POPPER'S Präzisierungsvorschlag. Denn sein Ansatz, Einfachheit mit Falsifizierbarkeit gleichzusetzen (S. 100ff.) läßt sich nicht auf die Beurteilung von Modellierungskonzepten übertragen. Vgl. des weiteren zur mangelhaften inhaltlichen Bestimmtheit des Einfachheitsbegriffs SCHLICK (1930a), S. 148.

7) Es wird hier von allen Schwierigkeiten abgesehen, die auftreten können, wenn der Einsatz von Konstruktions- und Analysemitteln zwischen mehreren Modellierungskonzepten verglichen werden soll. Ein unproblematischer Vergleich ist nur so lange möglich, wie sich ein Konzept gegenüber anderen beim Mitteleinsatz als dominant erweist. Solche klaren Dominanzbeziehungen liegen jedoch oftmals nicht vor. Vgl. dazu die Anmerkung zur Modellierung von Nebenbedingungen.

8) Die voranstehende Argumentation kann auch umgekehrt werden, um doch zu einer positiven Beurteilung der Einfachheit eines Modellierungskonzepts zu gelangen. Dann ist es aber erforderlich, die Konzeptbeurteilung auf ein alternatives Modellierungskonzept - das Referenzkonzept - zu beziehen. In diesem Fall kann versucht werden nachzuweisen, daß das beurteilte Modellierungskonzept mit geringeren Konstruktions- und Analysemitteln auskommt als das Referenzkonzept (ohne dabei den Erfüllungsgrad anderer Beurteilungskriterien zu schmälern). Wenn dies gelingt, erweist sich das beurteilte Modellierungskonzept tatsächlich einfacher als das Referenzkonzept.

Die Umkehrung der Argumentationsrichtung ändert jedoch nichts an dem Sachverhalt, daß die Einfachheit eines Modellierungskonzepts nicht "an sich" bestätigt werden kann. Es ist stets ein Vereinfachungsnachweis erforderlich, in dem ein Verstoß gegen das Sparsamkeitsprinzip aufgezeigt wird. Lediglich der Bezugspunkt des Vereinfachungsnachweises kann zwischen dem Konzept, das beurteilt werden soll, und einem alternativen Referenzkonzept wechseln. In beiden Fällen handelt es sich aber um den Vergleich, in welchen Ausmaßen mindestens zwei Konzepte die allgemeine Einfachheitsforderung erfüllen. Die generelle, bezugsfreie Feststellung der Einfachheit eines Modellie-

rungskonzepts ist daher ausgeschlossen. Statt dessen besitzt das Beurteilungskriterium der Einfachheit grundsätzlich eine relationale Qualität. Vgl. zur relationalen Ausdeutung der Einfachheit auch POPPER (1984a), S. 97.

Dem relationalen Charakter des Einfachheitskriteriums entspricht der hier gewählte Ansatz, die relative Vorteilhaftigkeit von drei Netzklassen zu beurteilen. Es wird also strenggenommen nicht die Einfachheit "des" Petrinetz-Konzepts betrachtet, sondern die Einfachheit der drei Netzklassen gegeneinander abgewogen.

9) Andernfalls läßt sich nahezu immer eine "Vereinfachung" dadurch erzielen, daß Einbußen beim Erfüllungsgrad anderer Beurteilungskriterien hingenommen werden. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Modellierungsmächtigkeit. Denn es lassen sich oftmals komplizierte Konstruktionen durch wesentlich einfachere Alternativen ersetzen, wenn eine entsprechend reduzierte Ausdrucksmächtigkeit in Kauf genommen wird. An anderer Stelle wird gezeigt, daß sich aussagenlogische Formeln in Bedingung/Ereignis-Netzen weitaus einfacher als in Synthetischen Netzen repräsentieren lassen. Die dort angesprochene Einbuße an Einheitlichkeit kann nur dadurch vermieden werden, daß auf die Repräsentation ein- oder mehrstelliger prädikatenlogischer Formeln in Synthetischen Netzen verzichtet wird. Auf diese Weise ginge jedoch einer der herausragenden Beiträge verloren, die Synthetische Netze zur Ausdrucksmächtigkeit von Netzmodellen leisten. Modellierungsvereinfachungen, die zu Lasten anderer Beurteilungskriterien zustandekommen, interessieren in dieser Arbeit nicht weiter. Solche "unechten" Vereinfachungen werden daher aus den folgenden Erörterungen grundsätzlich ausgeschlossen.

10) Vgl. GOSTELOW (1971), S. 8; SHAPIRO,R. (1972), S. 3.28; CAVARROC (1974), S. 95; LIEN (1974a), S. 1; HOLT,A. (1975d), S. 162; AGERWALA (1975), S. 218; MOALLA (1976b), S. 117; LIEN (1976b), S. 251; PETERSON,J. (1977), S. 225, 237f. u. 249; ZACHARIADES (1977), S. 1.12; JONES,N. (1977), S. 277; KWAN (1977a), S. 608; GODBERSEN (1978), S. 46; MEMMI (1978c), S. 505; PETRI,C. (1979c), S. 83; SIFAKIS (1979b), S. 93; ELLIS,C.J. (1979), S. 5; OBERQUELLE (1979a), S. A.1; PRIESE (1979), S. 4; WINAND (1980), S. 1251; STARKE (1980), S. 4; MEKLY (1980), S. 422; NOE (1980a), S. 347; OBERQUELLE (1980), S. 505; JOHNSON,R.R. (1982), S. 74; MARTINEZ (1982a), S. 301; SCHESCHONK (1982a), S. 104; GIRAULT (1982a), S. 14; HURA (1982c), S. 438; OLDEROG (1990b); SCHMITZ,P. (1991), S. V; ROSENSTENGEL (1991), S. 2.

11) POPPER (1984a), S. 97f., spricht in ähnlichen Fällen von einem vermeidenswerten "ästhetisch-pragmatischen" Einfachheitsbegriff.

12) Dabei hat sich der Verf. schon - wider sein eigenes Einfachheitsverständnis - auf die zuvor erwähnte Vermengung von Modellierungseinfachheit und -anschaulichkeit eingelassen. Wenn diese beiden Aspekte sauber auseinandergelassen werden, verbleibt wiederum das Problem des Vereinfachungsnachweises: Es mag sein, daß sich Netzgraphiken durch ihre Einfachheit auszeichnen. Dann interessiert aber, gegenüber welcher konzeptionellen Alternative die Netzgraphiken mit geringeren Konstruktions- und Analysemitteln auskommen sollen, ohne andere Modellierungskriterien zu beeinträchtigen. Eine Antwort auf diese entscheidende Frage ist nicht ersichtlich.

13) An früherer Stelle wurde schon hervorgehoben, daß die formalen Konstrukte von Synthetischen Netzen in der Regel unter mangelhafter Anschaulichkeit leiden. Vgl. ebenso BECKER,B. (1991), S. 30. Er weist auf die "geringe Einfachheit" von Netzen hin. Sie resultiert daraus, daß die Transitionen aus einer Netzgraphik durch Vorschriften ("Programme") konkretisiert werden müssen, die das Schaltverhalten der Transitionen spezifizieren.

14) Die Repräsentation von Nebenbedingungen fällt in Synthetischen Kernnetzen und in Erweiterten Synthetischen Netzen gleich aus. Daher braucht zwischen diesen beiden Netzklassen hier nicht unterschieden zu werden.

15) Der Erfüllungsgrad anderer Beurteilungskriterien steigt sogar. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Natürlichkeit der Modellierung. Aber für die Erfüllung des Einfachheitskriteriums ist eine solche *Verbesserung* bei anderen Beurteilungskriterien unbeachtlich. Dies folgt unmittelbar aus der oben erläuterten Festlegung des Einfachheitskriteriums.

16) Es ließe sich ebenso zwischen den Ein- und Ausgangskanten von Stellen differenzieren. Dadurch werden aber keine neuen Kantenarten eingeführt. Denn aufgrund der Bipartitheit von Netzen ist jede Eingangskante (Ausgangskante) einer Transition notwendig zugleich die Ausgangskante (Eingangskante) einer Stelle.

17) Dieses Ergebnis ändert sich auch dann nicht substantiell, wenn die Ein- und Ausgangskanten von Transitionen als Ausprägungen von genau *einer* Kantenart aufgefaßt werden. In diesem Fall tritt die Art der Informationskanten als weitere *zweite* Kantenart hinzu.

Die unterschiedliche Zählweise von Kantenarten ist durchaus zulässig, weil bei allen gerichteten Kanten ein definitorischer Freiheitsgrad besteht: Entweder werden die Kanten "an sich" betrachtet. Dann ist in Stelle/Transition-Netzen nur genau eine Art gerichteter Kanten definiert. Dies entspricht der Flußrelation "F" im Definitionstupel von Stelle/Transition-Netzen. Oder es wird die Verknüpfung der Kanten mit ihren adjazenten Knoten zugrundegelegt. Aus dieser Perspektive lassen sich bei gerichteten Kanten stets die beiden Arten der Ein- und der Ausgangskanten unterscheiden. Diese Einstellung wurde oben eingenommen. Sie spiegelt sich bei Stelle/Transition-Netzen in der Obermenge $(S \times T) \cup (T \times S)$ der Flußrelation "F" wieder. Denn die Obermenge setzt sich aus der Vereinigung zweier verschiedenartiger Mengen potentieller Kanten zusammen.

18) Vgl. dazu auch den Hinweis auf die Probleme, den Einsatz von Konstruktions- und Analysemitteln zu messen, wenn keine klaren Dominanzbeziehungen festgestellt werden können. Zwar spielen Analysemittel bei der Repräsentation von Nebenbedingungen keine Rolle. Aber schon die Betrachtung des Konstruktionsmittels "Netzkante" reicht hier aus, um zu erkennen, daß sich weder Stelle/Transition-Netze noch Synthetische Netze beim Mitteleinsatz für die Modellierung von Nebenbedingungen als dominant erweisen.

19) Dabei wird die aktuelle Prädikatsextension durch die Multimenge jener Markenkopien repräsentiert, die sich unter der aktuellen Netzmarkierung auf jener Stelle befinden, der das Prädikatssymbol zugeordnet ist.

20) Dabei ist die oben eingeführte Vereinfachungsanforderung zu beachten, daß der Erfüllungsgrad keiner anderen Beurteilungskriterien beeinträchtigt werden darf. Darüber hinaus wird eingeräumt, daß die Bezugnahme auf alternative Modellierungskonzepte den thematischen Rahmen der hier vorgelegten Ausarbeitung übersteigt. Denn die Berücksichtigung konzeptioneller Alternativen wurde explizit ausgegrenzt. Daher wird dieser Aspekt nicht weiter vertieft.

21) Vgl. dazu aber auch die eingangs erläuterten Vorbehalte, unter denen eine solche Qualifizierung steht.

9.2.2.3.8 Einheitlichkeit

Die Einheitlichkeit¹⁾ der Modellierung wird mitunter zu den besonderen Vorzügen des Petrinetz-Konzepts gerechnet²⁾. Dieses globale Urteil läßt sich jedoch im allgemeinen nicht aufrechterhalten. Das Einheitlichkeitskriterium bedarf einer differenzierteren Beurteilung.

Die Modellierungseinheitlichkeit wird nur in dem Ausmaß gewahrt, wie die Repräsentation eines Modellierungsobjekts innerhalb einer Netzklasse³⁾ verbleibt. Sobald die Grenzen einer Netzklasse überschritten werden, führen inkompatible Netzdefinitionen zu uneinheitlichen Modellierungen. Darauf wird später eingegangen⁴⁾. Daher wird zunächst vorausgesetzt, daß einer Modellierung nur jeweils eine Netzklasse zugrundeliegt. Dabei wird unterschieden, ob sich die Modellierungseinheitlichkeit entweder auf die Konstruktion oder aber auf die Auswertung von Netzmodellen bezieht.

Die Einheitlichkeit der Modellierung wird bei der Konstruktion eines Netzmodells *prima facie* gewahrt. Denn für die einheitliche Netzkonstruktion sorgt das einheitsstiftende Fundament der jeweils zugrundeliegenden, klassenspezifischen Netzdefinition. Allerdings gilt dieses Urteil nur in einer vorläufigen Annäherung. Bei genauerer Betrachtung trüben drei Einschränkungen das einheitliche Erscheinungsbild.

Erstens erstreckt sich die Einheitlichkeit der Modellkonstruktion nur auf das *Ergebnis* der Konstruktion eines Netzmodells⁵⁾. Der *Prozeß* der Modellkonstruktion unterliegt dagegen keinem einheitlichen Schema. Zwar existieren einige wenige Anregungen, um eine systematische Konstruktion von Netzmodellen zu unterstützen. Sie wurden im Zusammenhang mit der Konstruktivität des Petrinetz-Konzepts erörtert. Aber diese Konstruktionsanregungen bleiben so abstrakt, daß sich eine Vielzahl unterschiedlicher Konstruktionsprozesse mit ihnen vereinbaren läßt. Darüber hinaus schließen sich manche der Vorschläge für eine systematische Modellkonstruktion aus. Daher kann von der Einheitlichkeit des Konstruktionsprozesses keine Rede sein. Dies gilt für jede der hier untersuchten drei Netzklassen.

Zweitens trifft die Unterstellung, die Einheitlichkeit der Konstruktionsergebnisse werde durch die zugrundeliegende formale Netzdefinition sichergestellt, strenggenommen nicht zu. Sie wäre nur dann erfüllt, wenn jede Netzklasse *genau* eine und *eindeutig* festgelegte Netzdefinition aufweist. Dies ist aber für keine der drei Netzklassen der Fall. Zunächst leiden alle drei Netzklassen darunter, daß von ihren formalen Netzdefinitionen das Schalten von aktivierten Transitionen nur unzureichend bestimmt wird. Darauf wurde schon hingewiesen. Es wurde aber auch gezeigt, daß sich dieser Bestimmtheitsmangel ohne größere Schwierigkeiten heilen läßt.

Darüber hinaus existieren für Stelle/Transition-Netze mehrere Definitionsvarianten. Zumeist unterscheiden sich diese Varianten nur geringfügig. Vor allem handelt es sich um unterschiedliche Notationen für Netzkomponenten, die sich ohne Schwierigkeiten wechselseitig ineinander transformieren lassen⁶⁾. Solche Definitionsvarianten wirken sich bei der Konstruktion von Netzmodellen in keiner beachtenswerten Weise aus. Daher erweckt es in der Regel keine Irritationen, wenn von "der" formalen Netzdefinition für die Klasse der Stelle/Transition-Netze gesprochen wird. Allerdings existiert eine gravierende Variation bei der Definition von Stelle/Transition-Netzen. Sie folgt unmittelbar daraus, daß die Schaltregel von Stelle/Transition-Netzen nicht eindeutig bestimmt ist. Dies wurde schon an früherer Stelle dargelegt. Dort wurde gezeigt, daß bei Zulässigkeit von Stellen mit beschränkten Markkapazitäten und 1-Schleifen nicht festliegt, ob sich die Aktivierung einer Transition entweder nach dem Netto- oder aber nach dem Bruttoeffekt ihres Schaltens richten soll. Je nachdem, wie zwischen diesen beiden Varianten entschieden wird, liegen Stelle/Transition-Netze mit unterschiedlich definierten Schaltregeln vor. Zumindest in diesem Fall kann nicht mehr von einem einheitlichkeitsstiftenden Fundament der formalen Netzdefinition gesprochen werden. Denn es existieren zwei deutlich voneinander abweichende

Definitionen für Stelle/Transition-Netze⁷⁾. Sie können nicht ineinander transformiert werden. Statt dessen führen sie zu Netzmodellen mit verschiedenartiger dynamischer Struktur. Folglich liegen auch keine einheitlich konstruierten Netzmodelle auf der Basis von Stelle/Transition-Netzen vor, solange keine eindeutige Präzisierung der jeweils benutzten Schaltregel erfolgt⁸⁾. Sobald dies geschieht, wird zwar die Einheitlichkeit der Modellkonstruktion sichergestellt. Sie gilt dann aber nicht für die Klasse der Stelle/Transition-Netze als Ganzes, sondern nur für die Subklasse der Stelle/Transition-Netze mit präzisierendem Schaltverhalten.

Synthetische Kernnetze unterliegen den vorgenannten Schwierigkeiten nicht. Für sie existiert nur genau eine formale Netzdefinition. Ihre Schaltregel ist eindeutig definiert. Die Erweiterungen des Kernkonzepts Synthetischer Netze wurden nicht vollständig formalisiert. Insofern existiert keine einheitlichkeitsstiftende formale Netzdefinition für Erweiterte Synthetische Netze. Aber die Netzerweiterungen wurden so detailliert erläutert, daß ihre vollständige Formalisierung im Prinzip keine Schwierigkeiten bereitet. Zwar wurden mitunter geringfügige Variationen der erweiterten Netzkonstrukte zugelassen⁹⁾. Doch sie gleichen den zuerst erwähnten, unbeachtlichen Definitionsvarianten von Stelle/Transition-Netzen. Denn sie ziehen keine gravierenden Konsequenzen für die Benutzung von Erweiterten Synthetischen Netzen nach sich. Statt dessen dienen sie nur dazu, die Netzerweiterungen komfortabler anwenden zu können. Daher scheint bei Synthetischen Kernnetzen und Erweiterten Synthetischen Netzen die Einheitlichkeit der Netzkonstruktion¹⁰⁾ gewahrt zu werden.

Dieser Anschein trägt jedoch. Denn die Ausgangslogik von Transitionen, die mehrere Ausgangskanten besitzen, wird in Synthetischen Kernnetzen uneinheitlich behandelt. In deklarativen Netzmodellen wird unterstellt, daß mehrere Ausgangskanten derselben Transition untereinander in adjunktiver Weise verknüpft sind. Operationalen Netzmodellen liegt hingegen eine konjunktive Verknüpfungslogik für die Ausgangskanten einer selben Transition zugrunde. Es wurde schon dargelegt, daß dies zu einer zweideutigen Netzdefinition für Synthetische Kernnetze führt. Dieser Eindeutigkeitsmangel wurde beseitigt, indem zwei Netzsubklassen gebildet wurden: Die eine erstreckte sich auf deklarative, die andere auf operationale Synthetische Kernnetze. Für jede dieser Subklassen ist wegen ihrer eindeutigen Netzdefinition die Einheitlichkeit der Modellkonstruktion wieder sichergestellt¹¹⁾. Im Interesse dieser Einheitlichkeit wurden auch in dieser Arbeit alle Ausführungen zur Auswertung von Synthetischen Kernnetzen von vornherein auf die Subklasse der operationalen Netzmodelle beschränkt. Den Erweiterungen des Kernkonzepts Synthetischer Netze lagen ebenso nur operationale Netzmodelle zugrunde. Allerdings ändert diese Selbstbeschränkung nichts an dem Urteil, daß die Klasse der Synthetischen Kernnetze mehrdeutig definiert ist. Infolgedessen ist auch die Einheitlichkeit der Modellkonstruktion so lange nicht sichergestellt, wie auf diese Netzklasse - und nicht auf eine ihrer beiden eindeutig definierten Netzsubklassen - zurückgegriffen wird.

Ein dritter Verstoß gegen die Einheitlichkeit der Konstruktionsergebnisse betrifft die Visualisierung der graphischen Netzrepräsentationen. Denn die formale Netzdefinition einer Netzklasse garantiert - sofern von den vorgenannten Einschränkungen abgesehen wird - nur die Einheitlichkeit der formalsprachlichen Darstellung eines Netzmodells. Für eine einheitliche graphische Modellvisualisierung müssen daher zusätzliche Vereinbarungen sorgen. Sie wurden in dieser Arbeit als Gestaltungskonventionen für die Netzgraphiken von Synthetischen Netzen explizit eingeführt. Bei Stelle/Transition-Netzen erweist sich dagegen die Visualisierung von graphisch repräsentierten Netzmodellen derzeit noch als uneinheitlich:

- Für Stellen haben sich kreisförmige Graphiksymbole weitgehend durchgesetzt. Elliptische oder kartuschenförmige Graphiksymbole sind nur selten anzutreffen¹²⁾.
- Für Transitionen wurden zunächst mehr oder minder breite, zur Kantenrichtung orthogonale, balkenförmige Graphiksymbole verwendet¹³⁾. In neuerer Zeit überwiegen dagegen bei weitem rechteckige, vor allem quadratische Graphiksymbole¹⁴⁾. Auch eine Normschablone,

die für das Zeichnen graphischer Netzrepräsentationen vertrieben wird¹⁵⁾, läßt beide Darstellungsoptionen zu.

- Eine gerichtete Kante, deren Kantengewicht größer als "Eins" ist, kann auf zwei Weisen dargestellt werden. Entweder wird die Kante durch genau einen Pfeil visualisiert, der mit dem ganzzahligen Kantengewicht beschriftet wird¹⁶⁾. Oder die Kante wird durch ein Bündel aus genau so vielen gleichsinnig gerichteten Pfeilen dargestellt, wie ihr ganzzahliges Kantengewicht angibt.
- Für eine 1-Schleife besteht ebenso eine zweifache Darstellungsmöglichkeit. Entweder wird sie durch zwei gerichtete Pfeile visualisiert, die einen Zyklus bilden¹⁷⁾. Sie entsprechen genau den beiden gerichteten Kanten, die im betroffenen Netz die 1-Schleife konstituieren. Oder die beiden Kanten werden in der Visualisierung der graphischen Netzrepräsentation zu einem "Pfeil" zusammengezogen, der in beide denkmöglichen Richtungen zugleich weist.

Allerdings nimmt die Uneinheitlichkeit der Visualisierung von graphischen Netzrepräsentationen in den letzten Jahren deutlich ab. Dazu tragen vor allem¹⁸⁾ Bemühungen bei, die sich mit der Standardisierung von Stelle/Transition-Netzen beschäftigen. Darauf wird später zurückgekommen. Daneben führt die zunehmende Benutzung von Netzeditoren bei der Konstruktion graphisch repräsentierter Netzmodelle zu einer Vereinheitlichung der Verwendung von Graphiksymbolen¹⁹⁾.

Die Einheitlichkeit der Modellierung wird noch stärker beeinträchtigt, sobald begonnen wird, ein konstruiertes Netzmodell hinsichtlich interessanter Eigenschaften zu untersuchen. Dabei läßt sich zwischen einer terminologischen und einer technischen Uneinheitlichkeit differenzieren. Die terminologische Uneinheitlichkeit beruht darauf, daß zahlreiche Netzeigenschaften in der einschlägigen Literatur verschiedenartig definiert werden. Dies wurde besonders²⁰⁾ deutlich, als die Eigenschaften der Deadlockfreiheit und Lebendigkeit thematisiert wurden. Um zumindest in dieser Arbeit eine einheitliche Begriffsgrundlage zu schaffen, wurden mehrere Deadlock- und Lebendigkeitsarten unterschieden.

Die technische Uneinheitlichkeit bei der Untersuchung interessanter Netzeigenschaften knüpft an der Vielfalt von Auswertungstechniken an, die für diesen Erkenntniszweck zur Verfügung stehen. Die Auswertungstechniken unterscheiden sich durch ihre verschiedenartigen Analysekonzepte. In dieser Arbeit wurden herausgestellt: die Deduktions-, die Invarianten-, die Reduktions-, die Erreichbarkeits- und die Simulationsanalyse. Aufgrund ihrer konzeptionellen Verschiedenartigkeit ist es im Regelfall²¹⁾ nicht möglich, die Auswertungstechniken zu einer einheitlichen Modellanalyse zusammenzufassen²²⁾. Allerdings bietet die Erreichbarkeitsanalyse einen Ausweg. Ihr analytisches Potential reicht bereits aus, um alle dynamischen Netzeigenschaften zu untersuchen, die in dieser Arbeit von Interesse sind. Daher gestattet die Erreichbarkeitsanalyse für jede Netzklasse eine einheitliche Modellauswertung²³⁾. Diese Auswertungshomogenität wird z.B. daran deutlich, daß die Erreichbarkeitsanalyse sowohl konventionelle²⁴⁾ Simulationen umfaßt als auch die Ermittlung optimaler Modellverhaltensweisen zuläßt.

Allerdings unterliegt die Modellierungseinheitlichkeit selbst dann noch einer Einschränkung, wenn die Auswertungstechnik der Erreichbarkeitsanalyse verwendet wird. Denn die Erreichbarkeitsanalyse eignet sich grundsätzlich nur zur Untersuchung *dynamischer* Netzeigenschaften. Die Auswertung *statischer* Netzeigenschaften erfordert dagegen andersartige Analysekonzepte²⁵⁾. Davon betroffen sind vor allem Erkenntnisse über die topologische Netzstruktur. Sie können z.B. die Existenz von 1-Schleifen (Netzreinheit) betreffen²⁶⁾. Ebenso kann ein Interesse daran bestehen zu wissen, ob ein Netz aus der Klasse der Zustandsautomaten- oder der Synchronisationsnetze vorliegt. Folglich existiert keine Auswertungstechnik, mit der sich *alle* Netzeigenschaften auf die gleiche Weise untersuchen lassen. In dieser analytischen Inhomogenität braucht allerdings keine gravierende Schwäche des Petrinetz-Konzepts gesehen zu werden. Vielmehr läßt sie sich ebenso als ein Ausdruck für die Fülle verschiedenartiger Modelleigenschaften betrachten, die sich mit der Hilfe von Netzmodellen erfassen lassen.

Abschließend wird ein Blick auf die Standardisierung²⁷⁾ des Petrinetz-Konzepts geworfen. Sie wird hier als ein Subkriterium der Einheitlichkeit aufgefaßt. Denn Konzeptstandards führen im allgemeinen²⁸⁾ zu einer Vereinheitlichung der Konzeptanwendung. Ob ein Modellierungsträger die Standardisierung eines Modellierungskonzepts überhaupt wünscht, bleibt hier unbeachtet²⁹⁾. Es interessiert nur, ob für die drei Netzklassen Standards existieren, die eine Vereinheitlichung der Modellkonstruktion und Modellauswertung unterstützen³⁰⁾.

Synthetische Kernnetze und Erweiterte Synthetische Netze wurden in dieser Arbeit erstmals vorgelegt. Daher kommt für sie eine verbindliche Standardisierung derzeit überhaupt nicht in Betracht. Für Niedere Netze, zu denen auch die Stelle/Transition-Netze gehören, wurden dagegen schon Standardisierungsanregungen³¹⁾ vorgelegt. Allerdings beziehen sie sich ausschließlich auf zwei Aspekte:

- die formale Netzdefinition einschließlich der Schaltregeldefinition;
- die Art der Visualisierung der graphischen Netzrepräsentation durch genormte Graphiksymbole³²⁾.

Daher erstreckt sich die Standardisierung von Stelle/Transition-Netzen ausschließlich auf die Resultate der Konstruktion von Netzmodellen und auf deren graphische Visualisierung. Standards für die Vorgehensweise während der Modellkonstruktion³³⁾ oder für die Art der Modellauswertung³⁴⁾ existieren dagegen nicht³⁵⁾. Darüber hinaus werden die Standardisierungen von Netzdefinitionen und -visualisierungen von Modellierungsträgern, die Stelle/Transition-Netze anwenden, nicht streng eingehalten³⁶⁾. Aufgrund dieser Einschränkungen wird das Standardisierungsmaß von Stelle/Transition-Netzen insgesamt nur als "mittelmäßig" eingestuft.

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Vgl. zur Forderung nach Einheitlichkeit, die des öfteren auch als Uniformität angesprochen wird, MAYR, H. (1977), S. 255 u. 257; RESCHER (1979), S. 11, 77, 79 u. 83; STEINKE (1980), S. 65; RESCHER (1985a), S. 97; ALBERT, H. (1987), S. 103 u. 105; RESCHER (1987a), S. 44, 52, 57f., 62, 184ff. u. 195; ESTER (1989), S. 49 u. 75. Teilaspekte der Einheitlichkeit von Modellierungen werden auch an anderer Stelle angesprochen. So beziehen sich die Anmerkungen von NOE (1975a), S. 3, und NOE (1977), S. 2, auf die Einheitlichkeit der Notation. MOLLOY (1982), S. 914, klagt dagegen über mangelnde Einheitlichkeit bei der Analyse von Modelleigenschaften. NOE (1975a), S. 3f.; HOLT, A. (1976), S. 139, und NOE (1977), S. 2, gehen auf die Einheitlichkeit der Objektrepräsentation ein, wenn ein Modellierungsobjekt auf mehreren Abstraktions- oder Detaillierungsebenen dargestellt wird.
- 2) Vgl. zur Einheitlichkeit der Modellierung durch Petrinetze BEST, E. (1975a), S. 186 (Einheitlichkeit der Repräsentation von zeitabhängigen Verhaltensweisen und zeitunabhängigen Strukturzusammenhängen eines Modellierungsobjekts); PETRI, C. (1979c), S. 82; STARKE (1980), S. 0f.; BRETSCHNEIDER (1980c), S. 41 (Einheitlichkeit von Modellgestaltung und -verifizierung); IGEL (1986b), S. 1; KÖNIG, R. (1988a), S. 126 (Repräsentation von bedingungs- und zeitabhängigen Verhaltensaspekten in einem [einheitlichen] Modell); SILVA, M. (1990b), o.S. (gleiche Familie von Modellierungsinstrumenten für die Spezifizierung, Gestaltung und Implementierung von Netzmodellen). Indirekt klingt die Einheitlichkeit von Netzmodellen auch an bei: PAKAS-SKEWES (1979), S. VII u. 1; HOLT, A. (1979), S. 61f.; PERL (1980), S. 11.1; MEKLY (1980), S. 422; GIRAULT (1982a), S. 14; JOHNSON, R.R. (1982), S. 74.
- 3) Dieses Urteil bedarf bei Synthetischen Netzen einer Einschränkung der betroffenen Netzklassen auf modellspezifische Subklassen. Dies wird in Kürze näher erläutert.
- 4) Vgl. die Ausführungen zur Adaptivität und - insbesondere - zur Vollständigkeit.
- 5) Mit der Einheitlichkeit der Konstruktionsergebnisse wird keineswegs der Gedanke verknüpft, daß für dasselbe Modellierungsobjekt stets dasselbe Netzmodell konstruiert werden müsse. Es wird also keine Eindeutigkeit der Modellierungsergebnisse gefordert. Vielmehr wurde bereits gezeigt, daß für die Repräsentation von Objekteigenschaften verschiedenartige Netzkonstruktionen bereitstehen. Wenn solche Freiheitsgrade ausgeschöpft werden, lassen sich für dasselbe Modellierungsobjekt unterschiedliche Netzmodelle konstruieren. Folglich sind für dasselbe Modellierungsobjekt durchaus verschiedene Konstruktionsergebnisse zulässig. Aber diese Konstruktionsergebnisse besitzen eine *gleichartige* Erscheinungsweise, weil sie gemeinsam dieselbe formale Netzdefinition erfüllen. Insofern konstituiert die formale Netzdefinition die Einheitlichkeit aller definitionsgerechten Netzmodelle. Unter der Einheitlichkeit der Konstruktionsergebnisse wird also nicht ihre Identität, sondern nur ihre Gleichartigkeit verstanden.
- 6) Dazu gehören z.B. die beiden Varianten der Gewichtsfunktion, die an früherer Stelle behandelt wurden: Entweder wird die Gewichtsfunktion W^* verwendet, die sich in ihrem Definitionsbereich auf die Menge aller Netzkanten - also auf die Flußrelation - eines Netzes bezieht. Oder es wird die erweiterte Gewichtsfunktion W benutzt, die in ihrem Definitionsbereich auf alle potentiellen Kanten eines Netzes Bezug nimmt. Es bereitet keinen Unterschied, welche der beiden Gewichtsfunktionen einem Netzmodell zugrundeliegt, solange alle anderen Netzkomponenten auf die jeweils ausgewählte Gewichtsfunktion abgestimmt sind.
- 7) Spätestens jetzt wirkt sich das frühere Insistieren aus, daß die Schaltregel keine "Zugabe", sondern ein konstitutiver Bestandteil der formalen Netzdefinition ist.
- 8) In dieser Arbeit erfolgte die Präzisierung zugunsten der ausschließlichen Berücksichtigung von Nettoeffekten. Allerdings ist diese Festlegung nicht repräsentativ für "die" Definition von Stelle/Transition-Netzen. Eine eindeutigkeitsstiftende Präzisierung geschieht ebenso in den Standardisierungsvorschlägen für Stelle/Transition-Netze, die weiter unten vorgestellt werden.
- 9) Dazu gehören z.B. die Varianten bei der Notation von Schaltprioritäten.
- 10) Gemeint sind - wie bereits eingangs erläutert - ausschließlich die Ergebnisse der Netzkonstruktion, also die fertig vorliegenden Netzmodelle.
- 11) Jede Subklasse kann ihrerseits als eine eigenständige Netzklasse betrachtet werden. Sie wird durch ihre eindeutige Netzdefinition hinsichtlich der involvierten Modellkategorie entweder als eine deklarativ oder als eine operational definierte Netzklasse spezifiziert. Wenn derart spezifizierte Netzklassen zugrundegelegt werden, trifft das eingangs gefällte Urteil weiterhin zu, daß jede Netzklasse aufgrund ihrer einheitsstiftenden Netzdefinition die Einheitlichkeit der Modellkonstruktion garantiert.
- 12) Elliptische Graphiksymbole finden sich z.B. in einer Normschablone für das Zeichnen graphischer Netzrepräsentationen; vgl. OBERQUELLE (1982b), S. 25. Kartuschenförmige Graphiksymbole wurden in dieser Arbeit für Stellen benutzt, die mit erläuternden Stelleninschriften versehen wurden. Allerdings handelt es sich dabei nicht um Stelle/Transition-, sondern um Kanal/Instanz-Netze.

13) Vgl. GENRICH (1980b), S. 520.

14) Vgl. GENRICH (1980b), S. 520; BEST, E. (1985e), S. 2. Für den Übergang zu rechteckigen Graphiksymbolen sprechen drei Argumente. Erstens findet die Dualität zwischen Stellen und Transitionen in der geometrischen Spannung zwischen Kreisen und Rechtecken eine anschauliche visuelle Entsprechung. Zweitens lassen sich rechteckige Graphiksymbole weniger leicht mit Netzkanten verwechseln als ihre balkenförmigen Pendanten; vgl. OBERQUELLE (1981b), S. 4.2. Drittens eignen sich rechteckige Graphiksymbole hervorragend, um bei Höheren Netzen - wie z.B. Prädikat/Transition-Netzen und Synthetischen Netzen - in ihrem Innern diejenigen Formeln aufzunehmen, mit denen die Schaltvoraussetzungen oder -wirkungen von Transitionen spezifiziert werden können. Bei balkenförmigen Graphiksymbolen fehlt dagegen ein entsprechender Platz für die Formelniederschrift im Innern des Graphiksymbols.

15) Vgl. OBERQUELLE (1982b), S. 25.

16) Diese Darstellungsweise wurde in der hier vorgelegten Ausarbeitung bevorzugt.

17) Diese Darstellungsweise wurde in der hier vorgelegten Ausarbeitung bevorzugt.

18) Daneben wurden Empfehlungen erarbeitet, auf welche Weise die Visualisierungen von umfangreichen, graphisch repräsentierten Netzmodellen aus einfachen Graphiksymbolen systematisch aufgebaut werden sollen, um schließlich eine wohlstrukturierte Dokumentation der Netzgraphiken zu erhalten. Dies wurde schon als Beitrag zur Dokumentationsfreundlichkeit des Petrinetz-Konzepts angesprochen. Darüber hinaus hat schon GENRICH (1980b), S. 523, einige rudimentäre Gedanken niedergelegt, die sich mit einer systematischen Visualisierung von graphischen Netzrepräsentationen befassen.

19) Eine entsprechende Erwartungshaltung wurde schon von OBERQUELLE (1981b), S. 6.1, ausgedrückt. Das heute verfügbare Angebot von Netzeditoren zeigt, daß diese Vereinheitlichungshoffnung - zumindest in bezug auf Stelle/Transition-Netze - weitgehend erfüllt worden ist.

20) Daneben werden z.B. auch Beschränktheit und Sicherheit von Netzen uneinheitlich aufgefaßt. Gleiches gilt für die Promptheit von Netzen.

21) Lediglich die Erreichbarkeits- und die Simulationsanalyse lassen sich miteinander kombinieren. Denn die schrittweise Konstruktion eines Erreichbarkeitsgraphen kann durch die Simulation des Schaltverhaltens eines Netzmodells erfolgen. Eine omnivalente Simulationsanalyse bringt dann einen vollständigen Erreichbarkeitsgraphen hervor. Auf dieser engen konzeptionellen Verwandtschaft beruhen auch die Konstruktion und Auswertung von Optimierungsnetzen. Dort wurden durch die *simulative* Auswertung eines Optimierungsnetzes, das aus dem *Erreichbarkeitsgraphen* eines zugrundeliegenden Netzmodells abgeleitet wurde, optimale Schaltprozesse und optimale Schaltwerte ermittelt.

22) Auf die Heterogenität unterschiedlicher Analysekonzepte geht auch MOLLOY (1982), S. 914, ein. Dort klingt die Problematik an, daß die Anwendung heterogener Analysekonzepte Veränderungen der Objektmodellierung erzwingen kann. Es ist aber fraglich, ob die Kohärenz von Analyseergebnissen, die sich auf verschiedene Modellvarianten beziehen, gewährleistet ist. Dafür wären Transformationskonzepte erforderlich, die es gestatten, die Resultate aus der Auswertung eines Objektmodells auf eine andere Modellvariante zu übertragen. Solche Transformationsansätze sind für die heterogenen Auswertungstechniken des Petrinetz-Konzepts nicht bekannt.

Ein instruktives Beispiel für die Kohärenzproblematik heterogener Analysekonzepte liefert die Konsistenzanalyse von Netzmodellen, die mit der Hilfe Synthetischer Netze konstruiert worden sind. Wenn das Analysekonzept des Netztheorems von MURATA und ZHANG angewandt werden soll, um einen strengen Nachweis prädikatenlogischer Widerspruchsfreiheit zu versuchen, muß ein deklaratives Netzmodell vorausgesetzt werden. Das Analysekonzept, das sich auf den schwachen Nachweis der Einhaltung aller Integritätsbedingungen stützt, setzt dagegen operationale Netzmodelle voraus. Eine Transformationsmöglichkeit zwischen den beiden Modellkategorien existiert im allgemeinen Fall nicht. Einerseits sind die obligatorischen oder faktischen Transitionen, die zur Modellierung von Integritätsbedingungen in operationalen Netzmodellen benutzt werden, in den deklarativen Netzmodellen unzulässig, auf die das Netztheorem von MURATA und ZHANG angewandt werden kann. Andererseits läßt sich das Netztheorem von MURATA und ZHANG in einem operationalen Netzmodell schon dann nicht mehr gebrauchen, wenn das Netzmodell mindestens eine Transition mit mehreren Ausgangskanten besitzt. Denn ihre konjunktive Verknüpfungslogik im operationalen Netzmodell widerspricht der adjunktiven Verknüpfung von Ausgangskanten einer selben Transition in jedem deklarativen Netzmodell. Wegen dieser mehrfachen Unvereinbarkeiten ist es ausgeschlossen, die beiden Analysekonzepte des Netztheorems und der Integritätsbedingungen auf dasselbe Netzmodell anzuwenden.

23) Von der Anwendung einer Erreichbarkeitsanalyse wird im folgenden ausgegangen, solange keine ausdrücklich abweichenden Festlegungen erfolgen.

24) Mit konventionellen Simulationen sind hier die mono- oder polyvalenten Simulationsvarianten gemeint.

25) Diese alternativen Analysekonzepte stellen keine bemerkenswerten analytischen Anforderungen. Sie können vielmehr der konventionellen Graphentheorie entnommen werden. Oder die interessierenden statischen Netzeigenschaften lassen sich durch unmittelbare Anschauung der graphischen Netzrepräsentation erkennen. Letztes trifft auf die drei nachfolgend genannten Beispiele zu. Denn die Existenz von 1-Schleifen kann ebenso unmittelbar festgestellt werden wie der Sachverhalt, daß alle transitionsartigen Knoten eines Zustandsautomatennetzes oder alle stellenartigen Knoten eines Synchronisationsnetzes höchstens eine Eingangs- und höchstens eine Ausgangskante besitzen. Aus der Perspektive der Einheitlichkeit spielt die konzeptionelle Einfachheit der Auswertungstechniken für statische Netzeigenschaften aber keine Rolle. Entscheidend ist vielmehr, daß diese Auswertungstechniken von grundsätzlich anderer Art sind als die Erreichbarkeitsanalyse. Folglich ist es nicht möglich, die Einheitlichkeit der Modellauswertung für statische und dynamische Netzeigenschaften zugleich sicherzustellen.

26) Die Bedeutung von 1-Schleifen für das Schaltverhalten und die Interpretation von Netzen wurde schon mehrfach erörtert.

27) Vgl. zur allgemeinen Forderung nach oder Empfehlung von Standardisierung RAUBOLD (1972), S. 207; NOE (1975a), S. 5; SCHNEIDER, H.-J. (1978), S. 35 (in bezug auf normative Modellierungskonzepte und -sprachen); BERGER, K. (1979), Sp. 1353ff. (als Beitrag zum Rationalprinzip und zu rationaler Betriebsführung); MELLEROWICZ (1981a), S. 445ff. u. 450ff.; KERN, W. (1990a), S. 118f.; mittelbar klingt der Standardisierungswunsch ebenso an bei JORDAN (1978), S. 21; JACKSON, M.A. (1979), S. 13 u. 27.

In den vorgenannten Quellen wird vornehmlich aus produktionswirtschaftlicher (vor allem BERGER und MELLEROWICZ) und aus informationstechnischer (JORDAN und JACKSON) Sicht zugunsten einer weitreichenden Standardisierung argumentiert. Im Rahmen der Petrinetz-Konzepts werden zwar Standardisierungsanregungen vorgelegt (Näheres dazu in Kürze). Aber die zugrundeliegende Standardisierungsabsicht wird nicht motiviert. Doch vermittelt sich in zahlreichen informellen, nicht dokumentierten Gesprächen mit Anwendern des Petrinetz-Konzepts der Eindruck, daß auf der Anwenderseite tatsächlich ein generelles Bedürfnis nach stärkerer Standardisierung besteht. Treibendes Motiv ist der Wunsch nach einem konstanten Modellierungsfundament. Es soll den Anwendern des Petrinetz-Konzepts zu einer zeitüberbrückenden Sicherheit für ihr erworbenes Know how und für ihre erarbeiteten Netzmodelle verhelfen. Das schließt auch den Wunsch nach Vertrautheit mit wohlbekanntem, durch Standards gesicherten Konstruktions- und Auswertungstechniken ein. Ebenso inbegriffen ist das Bedürfnis, die Kommunikation über Netzmodelle dadurch zu vereinfachen, daß auf das gemeinsam geteilte Fundament einer standardisierten Netzterminologie und einer vereinheitlichten Netzdarstellungsweise zurückgegriffen werden kann. Diesem vorherrschenden Interesse der Anwenderseite, die Standardisierung des Petrinetz-Konzepts voranzutreiben, steht allerdings ein oftmals entgegengerichtetes Bestreben auf der Forscherseite gegenüber. Sie zielen eher auf ein Offenhalten des Petrinetz-Konzepts durch Vermeiden aller "vorzeitigen" Standardisierungen ab.

28) Strenggenommen muß dies aber nicht der Fall sein. Zwei Gründe können bewirken, daß ein Konzept trotz seiner Standardisierung dennoch uneinheitlich angewendet wird. Erstens ist es möglich, daß der Konzeptstandard selbst uneinheitlich definiert ist. Dieser Mangel bleibt jedoch in der Regel eine reine Denkmöglichkeit ohne praktische Relevanz. Zweitens kann es sein, daß ein Konzeptstandard seine normative Kraft nicht real zu entfalten vermag. Dann existiert der Konzeptstandard zwar, aber er wird von Konzeptanwendern nicht beachtet. Vgl. dazu den Hinweis, daß vorhandene Standards für Stelle/Transition-Netze nicht generell befolgt werden.

29) Es lassen sich durchaus wohlfundierte Argumente anführen, die vor einer Standardisierung warnen. Sie laufen gemeinsam darauf hinaus, daß jeder Standard durch seinen verbindlichen Charakter zu einer Verfestigung führt. Ein standardisiertes Modellierungskonzept beschränkt daher die Gestaltungsfreiheit der Konzeptanwender (vgl. die nachstehende Anmerkung). Denn alle konzeptionellen Möglichkeiten, die außerhalb der Standards liegen, werden ausgegrenzt. Dabei wird unterstellt, daß sich die Konzeptanwender an die Konzeptstandards tatsächlich halten. Darüber hinaus werden potentielle zukünftige Fortentwicklungen des standardisierten Modellierungskonzepts tendenziell behindert. Denn das Einüben in den korrekten Gebrauch verbindlicher Standards prägt die Denkmuster der Konzeptanwender im allgemeinen so stark, daß ihre kognitive Bereitschaft zum aktiven Betreiben oder passiven Übernehmen konzeptioneller Neuerungen erlahmt. Daher betont vor allem das Lager derjenigen, die sich der Erforschung des Petrinetz-Konzepts widmen, ein möglichst langes Offenhalten aller konzeptionellen Optionen. Insbesondere solle eine "vorzeitige" Einengung des Erkenntnisfortschritts durch das Korsett von Standardisierungen unterbleiben. Auf der Forscherseite herrscht allerdings häufig die Einstellung vor, jede Standardisierung als "verfrüht" zu diskreditieren. Oder die Standardisierungen werden in eine ferne Zukunft verschoben, in der das Petrinetz-Konzept inhaltlich "ausgereift" sei. Beide Formulierungen laufen darauf hinaus, daß bei den meisten Forschern des Petrinetz-Konzepts zur Zeit kein ernsthaftes Interesse an Standardisierungsbemühungen besteht.

Aus den vorgenannten Gründen sieht der Verf. in der Forderung nach Standardisierung keineswegs ein Beurteilungskriterium, für das unbedingt ein hoher Erfüllungsgrad zu wünschen ist. Umgekehrt räumt er aber ebenso ein, daß auch plausible Argumente zugunsten einer Standardisierung von Netzklassen vorgetragen werden können. Daher läßt der Verf. bewußt offen, mit welcher Höhen- und Artenpräferenz das Standardisierungskriterium untersucht werden kann. Diese Präferenzwahl bleibt dem Konzeptanwender überlassen.

Eine besonders lebhaft debattierte über die Vor- und Nachteile von Standardisierungsvorschlägen für Petrinetze ereignete sich während des Vierten Europäischen Workshops über Anwendungen und Theorie der Petrinetze, der im September 1983 in Toulouse stattfand. Die Standardisierungsstreit wurde aber mit offenem Ausgang vertagt. Leider fehlt auch eine Dokumentation der Debattenbeiträge in der einschlägigen Netzliteratur.

30) Darüber hinaus existieren Bemühungen, die vielfach variierenden Anschriften der Komponenten von Netzmodellen einem vereinheitlichenden Beschriftungsstandard zu unterwerfen. Vgl. OBERQUELLE (1981a), S. 5ff.; OBERQUELLE (1981b), S. 5.2ff. u. 5.12ff. Dieser Standardisierungsbeitrag wird hier aber nicht weiter beleuchtet, weil er für die beurteilten drei Netzklassen keine Rolle spielt. Ihre Netzanschriften sind jeweils einheitlich festgelegt. Die Einführung von Beschriftungsstandards erlangt dagegen Bedeutung, wenn mit Kanal/Instanz-Netzen gearbeitet wird. Denn sie können aufgrund der Freizügigkeit ihrer Netzdefinition im Prinzip auf jede beliebige Weise beschriftet werden. Der Verf. hält aber gerade diese Beschriftungsfreizügigkeit für so hilfreich bei der Gestaltung anschaulicher Kanal/Instanz-Netze, daß er von entsprechenden Beschriftungsstandards von vornherein abgesehen hat. Darüber hinaus kann daran gedacht werden, Standardisierungen von Netzanschriften in netzklassenübergreifender Weise einzusetzen. Dadurch läßt sich der uneinheitliche Gesamteindruck, den das Petrinetz-Konzept wegen der Vielzahl und Verschiedenartigkeit seiner Netzklassen als Ganzes hinterläßt, ein wenig reduzieren. Aber auch darin sieht der Verf. keinen unbedingt begrüßenswerten Schritt. Denn die Mannigfaltigkeit der Netzklassen wurde u.a. auch deswegen geschaffen, um eine Anpassung an unterschiedlichste Modellierungsbedürfnisse zu ermöglichen. Daher ginge durch eine netzklassenüberspannende Standardisierung ein Teil der hohen Adaptivität des Petrinetz-Konzepts verloren. Vgl. dazu die Ausführungen zum Anpassungspotential von Netzmodellen, das eröffnet wird, sobald ein Übergang zwischen unterschiedlichen Netzklassen zugelassen wird.

31) Vgl. GENRICH (1977), S. 37ff.; GENRICH (1980b), S. 519ff. (S. 519: "A Dictionary for some Basic Notions of Net Theory"), insbesondere S. 528ff. zu Stelle/Transition-Netzen; HACKMANN (1980a), S. 9; BEST,E. (1985e), S. 1ff. ("S. 1: Notations and Terminology on Petri Net Theory"), insbesondere S. 10ff. zu Stelle/Transition-Netzen. Die Standardisierungsanregungen beziehen sich in den vorgenannten Quellen nicht nur auf Stelle/Transition-Netze. Vielmehr erstrecken sie sich auch auf andere Niedere Netze, wie z.B. Bedingung/Ereignis-Netze und Geschehnisnetze. Vgl. dazu die voranstehende Anmerkung. Die Standardisierungsvorschläge werden hier aber nur in bezug auf Stelle/Transition-Netze diskutiert.

32) Neben den Quellen, die in der voranstehenden Anmerkung zur Standardisierung von Stelle/Transition-Netzen bereits angeführt wurden, finden sich weitere Vorschläge für genormte Graphiksymbole bei: OBERQUELLE (1981b), S. 4.2; OBERQUELLE (1982b), S. 25 (Vertrieb einer Normschablone für das Zeichnen von Netzen).

33) Vgl. die Erläuterungen zur Konstruktivität des Petrinetz-Konzepts. Dort wurde dargelegt, daß für die systematische Konstruktion von Netzmodellen ohnehin nur wenige Ansätze zur Verfügung stehen. Die meisten davon beziehen sich auf die Verwendung von Synthetischen Netzen. Allen gemeinsam ist, daß keiner dieser Systematisierungsbeiträge in irgendeiner Weise standardisiert ist.

34) Die Auswertung von Netzmodellen ist aufgrund der Vielfalt angebotener Auswertungskonzepte uneinheitlich. A fortiori ist sie auch nicht standardisiert. Dieses Standardisierungsdefizit gilt auch innerhalb einzelner Auswertungskonzepte. Sie lassen sich jeweils in vielfachen Varianten verwirklichen. Als pars pro toto wird auf die Varianten der Simulationsanalyse verwiesen, die in Kapitel 5.2.3.6 erörtert wurden. Die mangelhafte Standardisierung der Modellauswertung trifft auf Stelle/Transition-Netze in besonderem Maße zu. Auf Synthetische Netze wirkt sie sich schwächer aus, da ihre Auswertung von vornherein auf das Auswertungskonzept der Erreichbarkeitsanalyse eingeschränkt wurde. Aber auch für dieses Auswertungskonzept liegt kein verbindlicher Standard vor. Zur Verdeutlichung lassen sich die nebenläufige Konstruktion von Erreichbarkeitsgraphen und die optimierende Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen heranziehen, die in dieser Arbeit neu entwickelt wurden. Sie laufen jeder Vermutung zuwider, es existiere ein einheitliches, standardisiertes Konzept der Erreichbarkeitsanalyse.

35) Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß in einem Standardisierungsmangel keineswegs ein Nachteil gesehen werden muß. Vielmehr läßt sich ebenso die Meinung vertreten, daß in der fehlenden Standardisierung der Konstruktion und Auswertung von Netzmodellen der Vorzug von Modellierungsfreiheit und -vielfalt begründet liegt. Vgl. dazu die frühere Argumentation, in der das Fehlen eines Modularisierungsrasters für Netzmodelle positiv gewertet wurde. Vgl. ebenso die Ausführungen zur Adaptivität von Netzmodellen.

36) Sonst käme es nicht zu den Abweichungen bei der formalen Definition von Stelle/Transition-Netzen, die in einer früheren Anmerkung angesprochen wurden. Gleiches gilt hinsichtlich der uneinheitlichen Visualisierung von graphischen Netzrepräsentationen.

9.2.2.3.9 Vollständigkeit

Die Vollständigkeit eines Modellierungskonzepts wurde bereits an früherer Stelle angesprochen. Dabei interessierte jedoch nur die Beurteilung der *Modellierungsfähigkeit*. Sie erfolgte anhand eines Katalogs spezieller Aspekte, die für Modellierungsobjekte aus dem Bereich der Koordination komplexer Produktionssysteme eine größere Rolle spielen¹⁾. Dagegen wird nunmehr aus dem Blickwinkel der *Modellierungsgüte* untersucht, in welchem Ausmaß sich verschiedene Modellierungszwecke und -phasen bei der Objektmodellierung berücksichtigen lassen²⁾. Zunächst wird auf den Gesichtspunkt der Modellierungsphasen eingegangen. Aus dieser Perspektive werden unterschieden³⁾:

- die Problemwahrnehmung durch mentale Modellkonstruktion,
- die Problembeschreibung durch natürlichsprachliche Modellkonstruktion,
- die Problemformalisierung und Problemoperationalisierung durch formale Modellkonstruktion,
- die Validierung und Verifizierung von Modellen,
- die formale Problemlösung durch das Auswerten von formalen Modellen sowie
- die praktische Problemlösung im Vollzug der Lösungsumsetzung.

Die Phase der Problemwahrnehmung wird von keiner Netzklasse unmittelbar unterstützt. Allerdings leisten alle Netzklassen einen mittelbaren Beitrag zur Konstruktion von mentalen Modellen. Er erstreckt sich auf die Möglichkeit, Netzmodelle in graphischer Weise zu repräsentieren und entsprechend zu visualisieren⁴⁾. Auf die kognitive Adäquanz von graphisch visualisierten Netzdarstellungen wurde schon ausführlicher eingegangen. Daher können Netzskizzen benutzt werden, um den Prozeß mentaler Modellkonstruktionen als Veranschauligungsmittel zu begleiten. Dies trifft strenggenommen aber nur auf Kanal/Instanz-Netze zu. Ihre weitreichende Gestaltungsfreiheit kommt der Offenheit von Problemwahrnehmungen zugute. Sie lassen sich ebenso in der Phase der natürlichsprachlichen Problembeschreibung einsetzen. Denn ihre Komponenten können mit beliebigen natürlichsprachlichen Anschriften versehen werden. Stelle/Transition-Netze und Synthetische Netze eignen sich dagegen nicht, um mentale oder natürlichsprachliche Modelle zu konstruieren. Aufgrund ihrer formalen Netzdefinitionen können sie nur als formale Modelle eingesetzt werden.

Stelle/Transition-Netze und Synthetische Netze unterstützen die Konstruktion formaler Netzmodelle in dem Ausmaß, wie es in einem früheren Kapitel aus dem Blickwinkel der Konstruktivität aufgezeigt wurde. Spezielle Unterstützungsleistungen für die beiden Phasen der Problemformalisierung und -operationalisierung lassen Stelle/Transition-Netze nicht erkennen. Synthetische Netze tragen jedoch schon zur Problemformalisierung bei, indem sie sich auf eine Problembeschreibung durch prädikatenlogische Formeln stützen. Auch die Problemoperationalisierung wird berücksichtigt. Zu diesem Zweck wurden systematische Vorgehensweisen präsentiert, die es ermöglichen, prädikatenlogische Formelsysteme in deklarative oder operationale Netzmodelle zu transformieren.

Zur Phase der Modellvalidierung trägt keine Netzklasse direkt bei. Das wurde bereits dargelegt. Lediglich die Anschaulichkeit von graphisch visualisierten Netzmodellen läßt sich als eine indirekte Validierungshilfe betrachten. Dies trifft auf die drei Netzklassen ohne Unterschied zu. Die Phase der Modellverifizierung wird dagegen durch Netzmodelle aufgrund ihres formalen Charakters unmittelbar unterstützt. Auch darauf wurde schon eingegangen. Dabei nimmt die Verifizierbarkeit von Erweiterten Synthetischen Netzen über Synthetische Kernnetze bis hin zu Stelle/Transition-Netzen ab.

Die Phase der formalen Problemlösung wird von allen drei Netzklassen abgedeckt. Zu diesem Zweck läßt sich auf die vielfältigen Auswertungsmöglichkeiten für Netzmodelle zurückgreifen. In welchem Ausmaß die Netzklassen zur problemlösenden Modellauswertung beitragen, wurde bereits in einem früheren Kapitel aus der Perspektive der Analysierbarkeit ausführlicher behandelt. Die Phase der praktischen Problemlösung wird dagegen nicht unmittelbar unterstützt. Allenfalls kann ein weiteres Mal auf die graphische Visualisierung von Netzmodellen zurückgegriffen werden. Sie läßt sich dann als Kommunikationshilfe einsetzen. Denn es bietet sich an, bei der praktischen Umsetzung von Problemlösungen, die zuvor durch formale Modellauswertungen ermittelt wurden, die Anschaulichkeit graphisch visualisierter Netzmodelle zu benutzen, um Dritten gegenüber die Richtigkeit der Problemlösungen einsichtig zu machen. In dieser Hinsicht eignet sich vor allem die Visualisierung von Markenflüssen, um die Lösungsrichtigkeit anhand erwünschter Netzverhaltensweisen zu demonstrieren.

Damit ist die Beurteilung der Modellierungsvollständigkeit aus dem Blickwinkel von Modellierungsphasen abgeschlossen. Als weitere Dimension der Vollständigkeit eines Modellierungskonzepts wurden schon oben die Modellierungszwecke genannt, die ein Modellierungsträger bei der Konzeptanwendung verfolgen kann. Aus dieser zweckbezogenen Perspektive lassen sich deskriptive, analytische und synthetische Modellierungsaufgaben unterscheiden⁵⁾. Die deskriptiven Aufgaben können weiterhin hinsichtlich derjenigen Aspekte differenziert werden, die früher als Determinanten der speziellen Modellierungsfähigkeiten vorgestellt wurden. Bei den analytischen Modellierungsaufgaben bietet es sich an, auf den Eigenschaftskatalog zurückzugreifen, der bei der Beurteilung des analytischen Potentials von Netzmodellen zugrundelag. Die synthetische Modellierungsaufgabe läßt sich nach Maßgabe jener Gesichtspunkte verfeinern, die im Zusammenhang mit der Konstruktivität des Petrinetz-Konzepts entfaltet wurden. Auf die Erfüllung der vorgenannten Modellierungszwecke braucht hier im einzelnen nicht näher eingegangen zu werden. Sie wurde schon in den voranstehenden Kapiteln ausführlicher gewürdigt. Hier interessiert nur die übergreifende Fragestellung, in welchem Ausmaß die drei betrachteten Netzklassen die Gesamtheit aller Modellierungszwecke abdecken.

Für Stelle/Transition-Netze wurden deutliche Schwächen bei der Erfüllung deskriptiver und konstruktiver Aufgaben festgestellt. Dagegen erwiesen sie sich als recht leistungsfähig bei der Bewältigung von analytischen Aufgaben. Umgekehrt ließen Erweiterte Synthetische Netze besondere Stärken bei deskriptiven Aufgaben erkennen. Synthetische Kernnetze nahmen in dieser Hinsicht eine mittlere Position zwischen Stelle/Transition-Netzen und Erweiterten Synthetischen Netzen ein. Konstruktive und analytische Aufgaben wurden von Synthetischen Kernnetzen und Erweiterten Synthetischen Netzen in ähnlicher Weise erfüllt. Dabei übertrafen sie die konkurrierenden Stelle/Transition-Netze in konstruktiver Hinsicht deutlich. Dagegen blieben sie bei analytischen Aufgaben gegenüber Stelle/Transition-Netzen zurück.

Die voranstehenden Erkenntnisse lassen nur eine zurückhaltende Beurteilung der Vollständigkeit zu. Keine der drei untersuchten Netzklassen kann in allen Modellierungsphasen eingesetzt werden. Ebenso wenig erfüllt keine von ihnen alle Modellierungszwecke vollkommen. Darüber hinaus ist es noch nicht einmal möglich, eine der drei Netzklassen gegenüber den anderen beiden als dominant auszuzeichnen. Denn bei den Modellierungszwecken erwies sich keine von ihnen eindeutig überlegen. Daher wird allen drei Netzklassen aus der Perspektive der Vollständigkeit jeweils nur eine mittlere Modellierungsgüte zuerkannt.

Ein anderes Bild ergibt sich dagegen, wenn die Differenzierung zwischen den Netzklassen aufgegeben wird. Dann überdeckt das Petrinetz-Konzept als Ganzes alle Modellierungsphasen⁶⁾ und alle Modellierungszwecke⁷⁾. Insofern läßt sich das Petrinetz-Konzept als ein vollständiges Modellierungskonzept begreifen⁸⁾. Allerdings geht dabei die Einheitlichkeit der Modellierung verloren. Zwar bleibt die Modellierungseinheitlichkeit gewahrt, solange sie sich ausschließlich auf eine Netzklasse mit eindeutiger Netzdefinition stützt⁹⁾. Aber es kann erforderlich sein, beim Übergang zwischen unterschiedlichen Modellierungsphasen oder bei der Erfüllung verschiedener Modellierungszwecke auf verschiedene Netzklassen zurückzugreifen¹⁰⁾. Beispielsweise läßt

sich die Modellierungsphase, in der eine natürlichsprachliche Problembeschreibung erfolgt, nur durch Kanal/Instanz-Netze unterstützen. Die Phase der formalsprachlichen Modellauswertung setzt dagegen die Anwendung von entsprechend formalisierten Netzklassen voraus. Dazu gehören z.B. die hier betrachteten Stelle/Transition-Netze und die beiden Varianten von Synthetischen Netzen. Aus der Perspektive unterschiedlicher Modellierungszwecke liegen ähnliche Verhältnisse vor. So kann die Erfüllung deskriptiver Modellierungsaufgaben auf umfassendste Weise nur von Erweiterten Synthetischen Netzen geleistet werden. Wenn dagegen Netz-morphismen eingesetzt werden sollen, um Netzmodelle mit garantierten Modelleigenschaften zu konstruieren, dann muß auf Stelle/Transition-Netze zurückgegriffen werden.

Die voranstehenden Erörterungen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Das Petrinetz-Konzept als Ganzes überdeckt die Modellierungsphasen und -zwecke zwar vollständig, jedoch uneinheitlich. Die drei betrachteten Netzklassen erweisen sich dagegen jeweils als einheitlich, aber unvollständig. Daher können Vollständigkeit und Einheitlichkeit der Modellierung im Rahmen des Petrinetz-Konzepts niemals zugleich verwirklicht werden.

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Dies gilt auch für die Vollständigkeit, die als Subkriterium der Realitätsadäquanz angeführt wurde. Denn auch sie verweist - wie bereits dargelegt wurde - inhaltlich auf den Katalog spezieller Modellierungsfähigkeiten.
- 2) Einzelne Aspekte der Zwecke und Phasen von Modellierungen wurden schon in den voranstehenden Ausführungen beleuchtet, die sich mit der Modellierungsfähigkeit und -güte des Petrinetz-Konzepts befaßten. Daher läßt es sich nicht vermeiden, daß die anschließende Beurteilung der Modellierungsvollständigkeit mit den früheren Erläuterungen mehrfache partielle Überschneidungen aufweist. Dies liegt in dem genuin holistischen Charakter des Vollständigkeitskriteriums begründet.
- 3) Vgl. dazu die Erläuterungen anläßlich der modelltheoretischen Rahmenlegung. Dort wurde auch aufgezeigt, daß die aufgelisteten Modellierungsphasen keineswegs linear aufeinander folgen müssen. Dies gilt vor allem für die Phasen der Modellvalidierung und -verifizierung, die einen ausgeprägten Rückkopplungscharakter besitzen.
- 4) Darüber hinaus kommt die kausale Ausrichtung von Netzmodellen dem Denken in Kausalzusammenhängen entgegen. Es spielt bei der Konzeptualisierung von Problemen oftmals eine bedeutsame Rolle.
- 5) Dabei werden deskriptive Aufgaben mit der Beschreibung von Problemen durch Modelle gleichgesetzt. Als synthetische Aufgabe wird die Konstruktion von problemrepräsentierenden Modellen verstanden. Unter analytischen Aufgaben werden alle Varianten der Auswertung von Modellen subsumiert. Die Modellauswertungen umschließen insbesondere auch das Ermitteln von Lösungen für modellierte Problemstellungen.
- 6) Die Überdeckung mehrerer Modellierungsphasen wird des öfteren als besondere Stärke des Petrinetz-Konzepts hervorgehoben. Vgl. MOALLA (1976b), S. 117; HAN (1979), S. 270; PAKAS-SKEWES (1979), S. VII; PERL (1980), S. 11.1; HACKMANN (1981), S. 372; EBERT, J. (1981), S. 327 (ansatzweise); JOHNSON, R.R. (1982), S. 74; HACKMANN (1982), S. 85; RAZOUK (1985c), S. 2 u. 5.
Allerdings lassen die vorgenannten Quellen oftmals offen, ob sie sich entweder auf nur eine Netzklasse oder aber auf das Petrinetz-Konzept als ganzes beziehen. Darüber hinaus verfolgen die Autoren Phaseneinteilungen für Modellierungsprozesse, die oftmals verschiedenartig sind und unterschiedlich weit reichen. Beispielsweise betrachtet RAZOUK (1985c) nur die beiden Phasen der Modellverifizierung und der Modelllösung. Dabei legt er die Lösungsphase in dem speziellen Sinn aus, daß Netzmodelle ausschließlich ausgewertet werden, um die Leistungsfähigkeit der modellierten Objekte zu beurteilen. Es wird darauf verzichtet, solche Eigenarten der o.a. Quellen weiter zu vertiefen.
- 7) Die allgemeine Eignung des Petrinetz-Konzepts für die Erfüllung deskriptiver, konstruktiver und analytischer Modellierungszwecke wurde schon früher belegt. Vgl. dazu die Anmerkung, die sich mit der allgemeinen Modellierungsfähigkeit oder (deskriptiven) Ausdrucksmächtigkeit des Petrinetz-Konzept befaßte. Vgl. ebenso die Anmerkungen zur Konstruktivität und zur Analysierbarkeit von Petrinetzen.
- 8) Vgl. dazu die Quellen, die schon in einer früheren Anmerkung zur Vollständigkeit der Modellierung durch Petrinetze angeführt wurden. Diese Quellen folgen allerdings nicht der hier vorgelegten Differenzierung, die als Dimensionen der Modellierungsvollständigkeit die Modellierungsobjekte, die Modellierungsphasen und die Modellierungszwecke unterscheidet.
- 9) Bei Synthetischen Netzen wird wegen der Voraussetzung einer eindeutigen Netzdefinition nicht auf die Netzklassen der Synthetischen Kernnetze oder der Erweiterten Synthetischen Netze Bezug genommen, sondern auf ihre entweder deklarativ oder aber operational definierten Subklassen.
- 10) Damit wird abermals dem pauschalen Urteil widersprochen, Petrinetze führten generell zu einer einheitlichen Modellierung. Vgl. dazu die einleitenden Ausführungen zum Kriterium der Einheitlichkeit.

9.2.2.3.10 Adaptivität

Unter der Adaptivität¹⁾ eines Modellierungskonzepts wird hier die Möglichkeit verstanden, ein Modell so zu verändern, daß es an unterschiedliche Modellierungsbedürfnisse angepaßt wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob sich die Bedürfnisse eines Modellierungsträgers im Zeitablauf unvorhergesehen wandeln oder ob der Modellierungsträger von vornherein eine variable Problemrepräsentation wünscht. Darüber hinaus werden die Anlässe, die zu einer Bedürfnisverschiebung führen, keinen Einschränkungen unterworfen²⁾.

Bei der Beurteilung der Adaptivität des Petrinetz-Konzepts³⁾ können zwei verschiedenartige Positionen eingenommen werden. Entweder wird die Adaptivität von Netzmodellen auf jeweils eine Netzklasse beschränkt. Dies entspricht dem hier verfolgten generellen Ansatz, die Beurteilungskriterien auf die Klassen der Stelle/Transition-Netze, der Synthetischen Kernnetze und der Erweiterten Synthetischen Netze jeweils separat anzuwenden. Oder es werden die Anpassungsmöglichkeiten von Netzmodellen beurteilt, die auch einen Übergang zwischen unterschiedlichen Netzklassen umgreifen. Erst die zweite Beurteilungsposition gestattet, die Adaptivität des Petrinetz-Konzepts voll zu würdigen. Daher erfolgt in dieser speziellen Hinsicht eine partielle Ausweitung des generellen, auf einzelne Netzklassen bezogenen Beurteilungsansatzes⁴⁾.

Solange die Modifizierungen eines Netzmodells die Grenzen seiner Netzklasse nicht überschreiten dürfen, stehen im wesentlichen⁵⁾ nur drei Möglichkeiten für Modellanpassungen offen. Die bedeutsamste Anpassungsoption erstreckt sich auf das nachträgliche Verfeinern oder Vergrößern von Modellkomponenten in bereits fertiggestellten Netzmodellen. Daher fällt die Beurteilung der Adaptivität von Netzklassen mit der Beurteilung ihrer hierarchischen Verfeinerungs- und Vergrößerungsmöglichkeiten zusammen. Diese Optionen wurden schon ausführlicher beleuchtet, als die Konstruktivität des Petrinetz-Konzepts beurteilt wurde. Sie erlauben, ein Netzmodell an unterschiedliche Konkretisierungs-⁶⁾ oder Abstrahierungsbedürfnisse eines Modellierungsträgers anzupassen⁷⁾. Insbesondere ist es aufgrund der charakteristischen Lokalität von Netzmodellen möglich, solche Modellanpassungen auf eng begrenzte Modellausschnitte zu fokussieren⁸⁾. Unerwünschte "Fernwirkungen" auf andere Modellbereiche brauchen dabei nicht befürchtet zu werden⁹⁾. Dieser lokale Verfeinerungs- oder Vergrößerungsaspekt wurde schon früher als "Zoom"-Effekt angesprochen.

Wenn ein Netzmodell durch Verfeinern oder Vergrößern auf verschiedenen Konkretisierungs- bzw. Abstrahierungsniveaus dargestellt wird, erfolgt zugleich ein Übergang zwischen unterschiedlich komplexen Modellierungsstufen. Denn die Komplexität eines Netzmodells fällt im allgemeinen um so größer (geringer) aus, je konkreter (abstrakter) die Repräsentation des Modellierungsobjekts gestaltet wird¹⁰⁾. Daher trifft die mitunter geäußerte Ansicht, Petrinetze zeichneten sich generell durch eine "mittlere"¹¹⁾ Modellkomplexität aus¹²⁾, strenggenommen nicht zu. Vielmehr gestatten Netzvergrößerungen und -verfeinerungen, die Komplexität von Netzmodellen an das aktuelle Komplexitätsbedürfnis eines Modellierungsträgers anzupassen. Deshalb ist nicht die mittlere, sondern die bedürfnisgerecht anpaßbare Modellkomplexität für das Petrinetz-Konzept wesentlich.

Daneben läßt sich ein Netzmodell immer durch horizontale Netzerweiterungen¹³⁾ oder Netzverkleinerungen anpassen. Dies entspricht dem Berücksichtigen neuer oder dem nachträglichen Außerachtlassen alter Modellierungsbedürfnisse. Diese zweite Anpassungsmöglichkeit spielt jedoch in der Modellierungspraxis nur selten eine Rolle. Denn ein Wandel von Modellierungsbedürfnissen wirkt sich zumeist auf mehrere Modellkomponenten aus. Das einfache Vergrößern oder Verkleinern eines - ansonsten unveränderten - Modells reicht dazu meistens nicht aus. Für die wenigen Fälle, in denen auf eine dieser beiden Anpassungsoptionen zurückgegriffen werden kann, eignen sich alle drei Netzklassen in gleicher Weise. Zu den seltenen Ausnahmen gehören solche Modellierungsprozesse, in denen zunächst unabhängig voneinander einzelne Netzmodelle

entwickelt wurden, die eng begrenzte Modellierungsaufgaben als Insellösungen erfüllen. Danach kann sich das Modellierungsbedürfnis zugunsten einer integrierten Behandlung des gesamten Aufgabenkomplexes verschoben haben. In diesem Fall bietet sich der Ansatz der horizontalen Netzerweiterung an, um die vereinzelt Netzmodelle zu einer Ganzheit zusammenzuführen¹⁴⁾. Dabei werden die vereinzelt Netzmodelle wechselseitig als Erweiterungen von jeweils anderen vereinzelt Netzmodellen behandelt. Auf diese Weise entsteht ein zusammenhängendes, modular aufgebautes Gesamtmodell. Diese Modellintegration läßt sich aber nur dann vollziehen, wenn die zunächst unabhängig erstellten Netzmodelle so konstruiert wurden, daß sie später über Synchronisationsstellen zu einem Gesamtmodell vereinigt werden können. Dies ist im Regelfall kaum zu erwarten¹⁵⁾.

Darüber hinaus ist es mitunter möglich, Anpassungen an besonders einfach¹⁶⁾ gelagerte Bedürfnisverschiebungen durch parametrische Modellformulierungen¹⁷⁾ vorzubereiten. Dabei werden Modellkonstrukte, die im Regelfall aus konstanten Ausdrücken bestehen, zunächst durch Variablen - die "Modellparameter" - ersetzt. Diese Variablen werden spätestens dann, wenn das betroffene Netzmodell auf eine konkrete Modellierungsaufgabe angewendet wird, durch Konstanten aus ihren Definitionsbereichen substituiert¹⁸⁾. Art und Umfang der Definitionsbereiche der Variablen bestimmen das Ausmaß, in dem parametrische Modellanpassungen¹⁹⁾ an variierende Modellierungsaufgaben zulässig sind. Netzmodelle, die sich auf Synthetische Kernnetze oder Erweiterte Synthetische Netze stützen, bieten mehrere Ansatzpunkte für eine parametrische Modellierung²⁰⁾. Dazu gehören z.B. die Schaltwerte von Transitionen bei der Erfassung von Formalzielwirkungen oder die Konkretisierung des allgemeinen Übergangsschemas für Transitionen durch transaktionsspezifische Schaltprozeduren. Ebenso bietet sich die Faktenmenge der Ausgangsmarkierung an, um Markenanzahlen auf einzelnen Stellen oder die Attributausprägungen einzelner Markenkopien durch Variablen für Anpassungen an den konkreten Einzelfall offenzuhalten. Dabei gestatten Attributmarken sogar, Definitionsbereiche mit *qualitativ* definierten Attributausprägungen vorzusehen. Dies reicht über die allgemein übliche Vorstellung, die Parametrisierung von Modellen erstreckt sich auf *quantitative* Freiheitsgrade, deutlich hinaus. Dagegen bleiben Stelle/Transition-Netze auf zwei der vorgenannten Parametrisierungsoptionen beschränkt²¹⁾. Sie gestatten einerseits, die Schaltwerte von Transitionen durch Variablen auszudrücken. Gleiches gilt für die Anzahlen von Kopien der Basismarke, die sich unter der Ausgangsmarkierung auf den Stellen eines Netzmodells befinden²²⁾.

Die Adaptivität von Netzmodellen nimmt beträchtlich zu, wenn die Schranken der klassenspezifischen Netzdefinitionen fallen. Ein Beispiel wurde bereits anlässlich der schrittweisen Verfeinerung von Netzmodellen erörtert. Es betraf die Vorgehensweise, zunächst mit weitgehend informellen, natürlichsprachlich beschrifteten Kanal/Instanz-Netzen zu beginnen. Sie werden zunehmend mit formalen Ausdrucksmitteln angereichert, indem natürlichsprachliche durch formalsprachliche Netzanschriften ersetzt werden. Schließlich wird auf eine vollständig formalisierte Netzklasse übergegangen. Auf diese Weise läßt sich zuerst das Modellierungsbedürfnis befriedigen, einen groben Überblick über das zu modellierende Objekt zu gewinnen. Dazu eignen sich Kanal/Instanz-Netze hervorragend. Mit zunehmendem Verständnis des Modellierungsträgers für Aufbau und Verhalten des Modellierungsobjekts kann sich der Bedürfnisschwerpunkt zu präziseren Struktur- und Verhaltensbeschreibungen verschieben. Dieser Bedürfnisverlagerung wird zunächst noch innerhalb der Klasse von Kanal/Instanz-Netzen entsprochen, indem der Formalisierungsgrad der Netzanschriften erhöht wird. Am Ende erfolgt dann aber der Übergang zu einer Netzklasse mit vollständig formalisierter Netzdefinition.

Nachdem die formalsprachliche Präzisierung der Objektdarstellung abgeschlossen ist, läßt sich eine weitere Veränderung der Interessenlage des Modellierungsträgers vorstellen. Er wird vermutlich nach Erkenntnissen über "interessante" Eigenschaften des modellierten Objekts streben. Zu diesem Zweck kann auf ein vollständig formalisiertes Netzmodell übergegangen werden. Darauf lassen sich die Auswertungstechniken anwenden, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden²³⁾. Wenn sich dabei überraschende Auswertungsergebnisse einstellen, mag der Modellierungs-

träger ein Bedürfnis verspüren, einzelne Modellaspekte verfeinert darzustellen und danach detaillierter auszuwerten²⁴). Dabei kann er aber zumeist auf die schon oben angesprochene Modellanpassung durch vertikale Modellverfeinerung zurückgreifen. Sie erfordert keinen Wechsel der Netzklasse. In Ausnahmefällen ist es aber auch möglich, daß sich ein größeres Detaillierungsniveau nur durch einen Übergang zu einer ausdrucksmächtigeren Netzklasse erzielen läßt²⁵).

Schließlich mag der Fall eintreten, daß der Modellierungsträger über die Ergebnisse seiner Modellauswertungen mit Dritten kommunizieren möchte. Dabei kann es sich als hilfreich erweisen, auf die formale Strenge der zuvor eingesetzten Netzmodelle zu verzichten und verstärkt auf die Anschaulichkeit von graphisch visualisierten Netzen zu setzen. Insbesondere die Visualisierung von Markenflüssen trägt oftmals dazu bei, die Kommunikation über Ergebnisse der Objektmodellierung zu erleichtern. Dabei geht es nicht mehr um den Nachweis der Korrektheit von Modellierungsergebnissen, sondern um ihre überzeugende Präsentation. Für solche Präsentationszwecke kann auf einfache Stelle/Transition-Netze oder abermals Kanal/Instanz-Netze zurückgegriffen werden.

Die voranstehende Skizze von Anpassungen an variierende Modellierungsbedürfnisse besitzt zwar nur exemplarischen Charakter. Aber sie verdeutlicht hinreichend, daß gerade der wechselnde Gebrauch unterschiedlicher Netzklassen dazu beitragen kann, die netzgestützten Repräsentationen eines Modellierungsobjekts an verschiedene Interessenlagen anzupassen²⁶). Dabei werden gezielt die Stärken der einzelnen Netzklassen eingesetzt, um den variierenden Bedürfnissen eines Modellierungsträgers gerecht zu werden²⁷). Die bedürfnisgerechte Auswahl einer Netzklasse²⁸) gestattet es, demjenigen Ausmaß an Modellierungsfähigkeit und -güte nahezukommen²⁹), das ein Anwender des Petrinetz-Konzepts für die Erfüllung seiner aktuellen Modellierungsaufgabe wünscht³⁰).

Allerdings hängen mehrere von denjenigen Kriterien, mit deren Hilfe die Modellierungsfähigkeit und -güte eines Modellierungskonzepts in dieser Arbeit untersucht werden³¹), in tendenziell gegenläufiger Weise zusammen³²). Dies wurde schon oben anhand der Gegenläufigkeit zwischen Formalisierung und Anschaulichkeit von Netzmodellen beispielhaft aufgezeigt³³). Eine ähnlich gegenläufige Beziehung besteht zwischen der Abstraktheit und der Kompliziertheit von Netzmodellen, die sich mit unterschiedlichen Netzklassen konstruieren lassen³⁴): Je höher das Abstraktionsniveau einer Netzklasse angesiedelt ist, mit desto geringerer Komplexität läßt sich eine vorgegebene Modellierungsaufgabe erfüllen. Z.B. erlauben Kanal/Instanz-Netze, die von zahlreichen Problemeterminanten abstrahieren, eine relativ unkomplizierte Problemrepräsentation³⁵). Dagegen gestatten Synthetische Netze die konkrete Modellierung vielfältiger Details. Dafür fallen Synthetische Netze aber auch recht kompliziert aus.

Aufgrund solcher tendenziell gegenläufigen Kriterienzusammenhänge ist es oftmals nicht möglich, durch die Auswahl von nur einer Netzklasse allen Bedürfnissen eines Modellierungsträgers zugleich nahezukommen. Eine derart dominante Netzklasse existiert für die meisten Aufgaben der betrieblichen Modellierungspraxis nicht. Dies gilt zumindest für die hier interessierende Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen. Daher läßt sich die hohe Adaptivität des Petrinetz-Konzepts des öfteren nur dann ausschöpfen, wenn für die Erfüllung derselben Modellierungsaufgabe *mehrere* unterschiedliche Netzklassen eingesetzt werden. In diesem Fall ist es möglich, während der Bearbeitung einer Modellierungsaufgabe für jedes *einzelne* Modellierungsbedürfnis die jeweils adäquate Netzklasse heranzuziehen³⁶). Der bedürfnisabhängige Einsatz der Netzklassen richtet sich danach, welches Modellierungsbedürfnis im Verlauf der Aufgabenerfüllung aktuell im Vordergrund steht. Es wurde schon oben beispielhaft veranschaulicht, wie sich die Bedürfnisse eines Modellierungsträgers während der Erfüllung einer Modellierungsaufgabe verschieben können.

Da die Modellierungsbedürfnisse bei der Erfüllung derselben Modellierungsaufgabe schwanken können, ist die Auswahl von bedürfnisadäquaten Netzklassen stets mit der Gefahr von heterogenen Modellierungen verbunden. Solche Modellierungen vereinen in sich unter-

schiedliche Netzklassen. Diese Netzklassen erweisen sich aufgrund ihrer verschiedenartigen Netzdefinitionen im allgemeinen als partiell inkompatibel³⁷⁾. Beispielsweise erfolgt immer ein Modellierungsbruch, wenn von Kanal/Instanz-Netzen mit informalen Netzbeschriftungen zu vollständig formalisierten Stelle/Transition-Netzen oder Synthetischen Netzen übergegangen wird. Diese Modellierungsheterogenität muß in Kauf genommen werden, wenn die netzklassen-übergreifende Adaptivität des Petrinetz-Konzepts voll ausgeschöpft werden soll.

Abschließend wird die Adaptivität des Petrinetz-Konzepts aus einer speziellen Perspektive gewürdigt. Sie beschäftigt sich mit der Frage, in welchem Ausmaß die voranstehend erläuterten Anpassungspotentiale genutzt werden können, um ein Netzmodell auf die Komplexität seines Modellierungsobjekts³⁸⁾ abzustimmen. Der enge inhaltliche Zusammenhang zwischen der Adaptivität von Netzmodellen und der Anpassung von Modellierungskomplexität wurde zuvor schon mehrfach gestreift. Dies geschah besonders deutlich, als die bedürfnisgerechte Komplexitätsanpassung durch Netzvergrößerungen und -verfeinerungen herausgestellt wurde³⁹⁾. Aber auch die Anpassung an unterschiedliche Modellierungsbedürfnisse, die durch den Übergang zwischen verschiedenen Netzklassen ermöglicht wird, kann eine Variation der Modellierungskomplexität bedeuten⁴⁰⁾. Insgesamt steht eine reiche Palette von Optionen bereit, um die Komplexität von Netzmodellen an die erwünschte Modellierungskomplexität anzupassen⁴¹⁾. Dieses komplexitätsbezogene Anpassungsvermögen wird nun systematisch zusammengefaßt und - soweit erforderlich - ergänzt. Zunächst wird zwischen quantitativen und qualitativen Strategien für die Anpassung der Komplexität von Netzmodellen unterschieden. Diese beiden Strategiehauptformen lassen sich wiederum in mehrere Substrategien ausdifferenzieren.

Bei quantitativen Komplexitätsanpassungen bleiben die Arten der verfügbaren Netzkonstrukte unverändert. Aber die Anzahlen, in denen die einzelnen Konstruktarten innerhalb eines Netzmodells vorkommen, werden variiert. Dadurch kann der Umfang eines Netzmodells auf die vorliegenden Modellierungsbedürfnisse abgestimmt werden. Besondere Substrategien zur Variation der quantitativen Modellkomplexität sind:

- ❑ die horizontale Segmentierung eines Netzmodells in Netzmodule zur Umfangsreduzierung der entstehenden Netzmodule;
- ❑ die horizontale Integration von Netzmodulen zu umfassenderen Teilnetzen zwecks Umfangsausweitung;
- ❑ das vertikale Vergrößern eines Netzmodells zu einer abstrakteren Modellversion mit geringerem Modellumfang;
- ❑ das vertikale Verfeinern eines Netzmodells zu einer konkreteren Modellversion mit größerem Modellumfang.

Die Substrategien lassen sich auch miteinander kombinieren. Beispielsweise ist es möglich, zunächst die horizontale Segmentierungsstrategie einzusetzen, um Netzmodule mit beschränkten Modulumfangen zu erhalten. Dabei wird jedes Netzmodul so entworfen, daß es mit seinem Umnetz nur über Stellen verknüpft ist, die sich das Netzmodul mit dem Umnetz als gemeinsame Synchronisationsstellen teilt. Dann können anschließend einzelne - oder auch alle - Netzmodule zu stellenartigen Makroknoten abstrahiert werden. Dadurch wird die vertikale Vergrößerungsstrategie benutzt. Auf einer höheren Modellierungsebene liegt dann ein Netzmodell mit drastisch reduziertem Gesamtumfang vor⁴²⁾. Sein Gesamtumfang ist gegenüber dem Modellumfang auf tieferen Darstellungsebenen in dem Ausmaß gesunken, in dem Netzmodule mit mehreren Knoten und Kanten jeweils durch nur noch einen Makroknoten ersetzt worden sind.

Qualitative Komplexitätsanpassungen beruhen im Gegensatz zu ihren quantitativen Pendanten darauf, daß die Arten der verfügbaren Netzkonstrukte variiert werden. Dabei lassen sich sechs Substrategien unterscheiden:

- ❑ **Konstruktcompilierung:** Ein neuartiges Netzkonstrukt wird eingeführt, indem eine *endliche* Gruppe von mehreren gleichartigen Netzkonstrukten zu einem einzigen Netzkonstrukt verdichtet wird⁴³). Die neue Konstruktart besitzt eine größere "innere" Komplexität als die zugrundeliegenden gleichartigen Netzkonstrukte.
- ❑ **Konstruktdecompilierung:** Ein bisher definiertes Netzkonstrukt wird eliminiert, indem es in mehrere, aber höchstens *endlich* viele gleichartige andere Netzkonstrukte zerlegt wird⁴⁴). Die "innere" Komplexität der Zerlegungsergebnisse fällt kleiner aus als die des untergegangenen Netzkonstrukts.
- ❑ **Konstruktverallgemeinerung:** Ein neuartiges Netzkonstrukt wird eingeführt, das sich nur auf eine *unendliche* Gruppe von gleichartigen Netzkonstrukten zurückführen läßt⁴⁵). Die "innere" Komplexität der neuen Konstruktart fällt größer aus als diejenige der zugrundeliegenden gleichartigen Netzkonstrukte.
- ❑ **Konstruktreduzierung:** Eine Konstruktart, die sich nur auf eine *unendliche* Gruppe von gleichartigen Netzkonstrukten zurückführen ließ, wird durch eine ähnliche Konstruktart ersetzt, die nunmehr in mehrere, aber höchstens endlich viele gleichartige andere Netzkonstrukte zerlegt werden kann⁴⁶). Die resultierende Konstruktart besitzt eine geringere "innere" Komplexität als die substituierte Konstruktart.
- ❑ **Konstruktinnovation:** Ein neuartiges Netzkonstrukt wird etabliert, das sich weder in endlicher noch in unendlicher Weise auf eine Gruppe von bereits definierten, gleichartigen Netzkonstrukten zurückführen läßt⁴⁷). Dabei wird die "äußere" Komplexität aller verfügbaren Konstruktarten - kurz: die Artenvielfalt - erhöht.
- ❑ **Konstruktdestruktion:** Eine bisher definierte Konstruktart wird zerlegungs- und ersatzlos gestrichen⁴⁸). Dadurch sinkt die "äußere" Komplexität aller verfügbaren Konstruktarten; die Artenvielfalt nimmt ab.

Quantitative und qualitative Komplexitätsanpassungen können auch miteinander kombiniert auftreten. Dies liegt z.B. bei einer Konstruktdecompilierung unmittelbar auf der Hand: Ein Netzkonstrukt mit höherer "innerer" Komplexität wird in mehrere gleichartige Netzkonstrukte mit niedrigerer "innerer" Komplexität zerlegt. Dadurch steigt die Anzahl der Netzkonstrukte im betroffenen Netzmodell insgesamt an. Zugleich nimmt der qualitative Aspekt der "inneren" Konstruktkomplexität bei den verfügbaren Konstruktarten - *ceteris paribus* - ab.

Eine besondere Art der qualitativen Komplexitätsanpassung beruht darauf, daß lediglich die "Offensichtlichkeit" oder "Bewußtheit" von Netzkomplexität beeinflußt wird⁴⁹). Bei ihr wird die Komplexität eines Petrinetzes strenggenommen nicht verringert oder vergrößert. Vielmehr wird die Netzkomplexität nur zwischen verschiedenartigen Netzkonstrukten verschoben. Auf der einen Seite stehen alle Netzkonstrukte, welche die topologische Netzstruktur konstituieren. Es handelt sich um die Stellen und Transitionen als Netzknoten sowie um die Elemente der Flußrelation als Netzkanten. Die Anzahl der Netzknoten und die Dichte ihrer Verknüpfung durch Netzkanten bestimmen im wesentlichen die Komplexität der Netztopologie, die von einem menschlichen Betrachter bewußt wahrgenommen wird. Die Gegenseite bilden alle Netzkonstrukte, die als Anschriften von Netzknoten und -kanten ausgedrückt sind. Dazu gehören z.B. die Markenkapazitäten der Stellen und die Gewichte der Kanten. Hinzu kommen Formeln, die als Transitionsanschriften Schaltvoraussetzungen oder -wirkungen spezifizieren können. Als bewegliche Stellenanschriften ist auch an die Kopien von Marken zu denken. Seitens der menschlichen Kognition werden solche Anschriften von Netzkomponenten im allgemeinen als einfache, unkomplizierte Konstrukte perzipiert. Daher läßt sich die *wahrgenommene* Komplexität eines Netzes dadurch verringern, daß Netzanschriften eingeführt werden, die mit einer Reduzierung des Umfangs oder der Verknüpfungsdichte der topologischen Netzstruktur einhergehen⁵⁰). Auf diese Weise wird die *immanente* Netzkomplexität zwar nicht verändert. Jedoch werden bewußt wahrgenommene Komplexitätsbeiträge der Netztopologie abgebaut und in Netzanschriften trans-

formiert. Die verlagerten Komplexitätsbeiträge sind in den Netzanschriften weiterhin latent vorhanden. Sie werden aber dort von einem menschlichen Betrachter nicht als solche wahrgenommen⁵¹⁾.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. zur Forderung nach Adaptivität, die des öfteren als Flexibilität thematisiert wird, LITTLE, J. (1970), S. B-470; BUSCH, R. (1977), S. 9; MEYER ZU SELHAUSEN (1980b), S. 134f.; OELLERS (1981), S. 99, 102ff. u. 140; PRESSMAR (1982), S. 339 u. 343; SCHRÖDER, H. (1983), S. 80f.; HUBER, G.P. (1983), S. 575; BAILEY (1983), S. 543; DIRUF (1983), S. 240, und DIRUF (1984), S. 126 (als flexible Reaktionsmöglichkeit des Modellplaners); ESTER (1989), S. 12, 49, 61f., 75 u. 127f.; BEKHI (1989), S. 245; STAUDINGER (1990), S. 174ff.; SHACKEL (1991b), S. 25.

Zur Adaptivität von Modellierungskonzepten werden hier auch ihre Änderungs- oder Modifizierungsfreundlichkeit sowie ihre Ausbaufähigkeit gerechnet. Vgl. zum Wunsch nach Änderungs- oder Modifizierungsfreundlichkeit SCHUMACHER (1978), S. 18; JORDAN (1978), S. 11; CZERANOWSKY (1980), S. 54. Vgl. zum Postulat der Ausbaufähigkeit JORDAN (1978), S. 11; AYACHE (1979a), S. 1050;

Das Kriterium der Adaptivität klingt ebenso bei NOE (1975a), S. 5f., an. Er fordert von einem Modellierungskonzept, es solle eine individuelle Schwerpunktsetzung zulassen, bei der Modellierung eines Systems entweder mehr dessen Struktur oder aber mehr dessen Verhalten in den Vordergrund zu rücken. Dabei scheint NOE unter der Systemstruktur nur die statische Struktur zu meinen. Die dynamische Struktur eines Systems wäre demnach dem Systemverhalten zuzurechnen.

2) Im wesentlichen kommen als Verschiebungsanlässe in Betracht:

- Das zugrundeliegende Realproblem verändert sich. Der Modellierungsträger möchte sich an diese Modifizierungen realer Problemeterminanten anpassen.
- Der Modellierungsträger ändert seine Konzeptualisierung des - "an sich" unveränderten - Realproblems. Von der Problematik, die Invarianz des Realproblems unabhängig von einer Problemkonzeptualisierung feststellen zu wollen, wird dabei abgesehen.
- Die Erkenntniszwecke, die der Modellierungsträger mit der Konstruktion und Auswertung eines Modells verfolgt, variieren.

Die vorgenannten drei Kategorien von Verschiebungsanlässen können auch miteinander kombiniert auftreten.

3) Die Adaptivität des Petrinetz-Konzepts wird generell als hoch eingeschätzt. Vgl. dazu - mit wechselnden Bezugspunkten - HERZOG, O. (1973), S. 4 (im Sinne der Modifikationsfreundlichkeit); CAVARROC (1974), S. 95 (als Flexibilität); WINAND (1980), S. 1251f. (als Ausbaufähigkeit), 1252 (als Flexibilität) u. 1253 (als Korrigierbarkeit); MEKLY (1980), S. 422 (als Modifikationsfreundlichkeit); HACKMANN (1982), S. 83 (hinsichtlich der Darstellungsflexibilität); SCHMITZ, P. (1991), S. V; ROSENSTENGEL (1991), S. 2 u. 100 (in bezug auf die Modellierungsflexibilität); BECKER, B. (1991), S. 30 (Flexibilität).

Allerdings existieren auch vereinzelte Stimmen, die auf Mängel der Adaptivität von Netzmodellen aufmerksam machen. So beklagt BARZILAI (1978a), S. 1, daß die Schaltregel von Netzmodellen starr definiert sei. Sie erlaube es nicht, sich an zeitlich variierende Input/Output-Relationen von aktiven Modellkomponenten anzupassen. MEKLY (1980), S. 423, vermißt für die Modifizierung von Netzstrukturen ein einfaches algebraisches Fundament. Dem erstgenannten Einwand schließt sich der Verf. weitgehend an. Auch er sieht keinen ausgereiften Ansatz, um in Netzmodellen die zeitliche Variabilität von Schaltregeln auszudrücken. Allenfalls ließe sich auf die Anregung parametrischer Modellformulierungen zurückgreifen. Mit ihrer Hilfe ist es in Synthetischen Netzen möglich, bei der Konkretisierung des allgemeinen Übergangsschemas für Transitionen durch transaktionsspezifische Schaltprozeduren solche Variablen einzubauen, deren Wertzuweisungen in zeitabhängiger Weise variiert werden. Eine derart zeitdependente Parametrisierung der Schaltprozeduren von Transitionen liegt jedoch bislang noch nicht in systematisch ausgearbeiteter Form vor. Darüber hinaus besteht die Option, zeitlich variable Schaltregeln dadurch zu verwirklichen, daß im Zeitablauf eine entsprechende Veränderung von Schaltstrategien erfolgt. Die Variation von Schaltstrategien läßt sich zwar durchaus vorstellen. Aber auch sie ist bisher noch nicht systematisch untersucht worden. Dem zweiten Vorbehalt aus MEKLY (1980) vermag der Verf. jedoch nicht zu folgen. Dies scheitert schon daran, daß unklar bleibt, was eine einfache algebraische Fundierung von Netzmodifizierungen genau bedeuten soll.

4) Allerdings kann diese erweiterte Beurteilungsposition in dem später vorgestellten Stärken/Schwächen-Profil nicht berücksichtigt werden. Denn in diesem Profil sind lediglich die drei o.a. Netzklassen als Beurteilungsobjekte definiert.

5) Daneben lassen sich weitere, aber weniger bedeutsame Beiträge des Petrinetz-Konzepts zu adaptiven Modellierungen anführen. Zunächst wird auf NOE's Kriterium der Adaptivität Bezug genommen, das kurz zuvor erwähnt wurde. Dort wurde gefordert, den Schwerpunkt von Modellierungen entweder auf (statische) Struktur- oder aber Verhaltensaspekte legen zu können. Aus dieser Perspektive konzentrierten sich die Subkriterien der speziellen Modellierungsfähigkeit, die in Kapitel 9.2.1.2 erörtert wurden, auf den Pol des Systemverhaltens. Denn es interessierte vorrangig, die Koordinierung von *Prozessen* zu modellieren. Dabei zeigte sich, daß das Petrinetz-Konzept der Anforderung von NOE, Schwerpunkte setzen zu können, gerecht wird. Allerdings wurde dies aufgrund der Thematik der hier vorgelegten Arbeit nur für den Schwerpunkt des Systemverhaltens nachgewiesen. Die Antipode - die bevorzugte Modellierung der Systemstruktur - spielte dagegen keine besondere Rolle. Ob das Petrinetz-Konzept auch in dieser Hinsicht eine Schwerpunktlegung unterstützt, wäre in einer anderen Untersuchung näher zu überprüfen.

Allerdings besteht eine begründete Vermutung, daß eine Fokussierung auf statische Systemstrukturen ebenso möglich ist. Zwar spricht der erste Anschein dagegen. Denn aufgrund der charakteristischen Dualität des Petrinetz-Konzepts müssen Netze stets aus passiven und aktiven Komponenten - den Stellen bzw. Transitionen - aufgebaut werden. Die Einbeziehung von *aktiven* Komponenten scheint der Modellierung von *statischen* Strukturen zuwiderzulaufen. Dies muß jedoch keineswegs der Fall sein. So wurde in dieser Arbeit mehrfach gezeigt, daß sich statische Begriffszusammenhänge in vorzüglicher Weise mit Petrinetzen repräsentieren lassen. Dabei wurden Transitionen benutzt, um die Existenz begrifflicher Ableitungsbeziehungen auszudrücken. Der "aktive" Charakter der Transitionen verschob sich von Ereignissen und deren Wirkungen auf die Konstituierung von Begriffsverknüpfungen. Der Verknüpfungsaspekt läßt sich auf die Repräsentation beliebiger statischer Systemstrukturen verallgemeinern. Dabei wird ein System in einer ersten groben Annäherung als eine Gesamtheit von verknüpften Elementen betrachtet. Die statische Systemstruktur fällt dann mit dem Verknüpfungsmuster der Elemente zusammen. Aufgrund des Vorhergesagten liegt es nahe, dieses Muster durch ein Allgemeines Netz zu repräsentieren. Die Stellen des Netzes entsprechen den Systemelementen. Jede Transition stellt zusammen mit ihren adjazenten Kanten und den inzidenten Stellen eine Verknüpfungsbeziehung dar. Daher wird die Gesamtheit aller Verknüpfungsbeziehungen - und somit das Verknüpfungsmuster - durch den topologischen Zusammenhang der stellen- und transitionsartigen Knoten des Allgemeinen Netzes wiedergegeben. Folglich läßt sich auch die statische Struktur eines Systems mit der Hilfe eines Netzmodells repräsentieren. Die voranstehenden Überlegungen verdeutlichen, daß sich das Petrinetz-Konzept für beide Schwerpunktsetzungen eignet: Es läßt einerseits die bevorzugte Modellierung von Systemverhaltensweisen zu. Andererseits ermöglicht es ebenso eine Fokussierung auf die statische Systemstruktur. In diese Richtung weist auch die Bemerkung von BEST, E. (1975a), S. 186, Petrinetze gestatteten, sowohl die zeitabhängigen Verhaltensweisen als auch die zeitunabhängigen Strukturzusammenhängen eines Modellierungsobjekts zu repräsentieren.

Ein weiterer Beleg für die Qualität des Petrinetz-Konzepts, das gleiche Modellierungsobjekt aus den Perspektiven unterschiedlicher Standpunkte zu repräsentieren, findet sich bei REISIG (1983a), S. 310f. Dort wird ein Softwaresystem einerseits aus dem Blickwinkel von Verarbeitungseinheiten und Verarbeitungsaufgaben modelliert. Andererseits wird das gleiche Softwaresystem vom Standpunkt seines "Operators" aus modelliert. Allerdings bleiben die Modellierungen auf einfache Kanal/Instanz-Netze beschränkt. Des weiteren spricht DITTRICH, G. (1989b), S. 4, die Möglichkeit an, mit Petrinetzen "verschiedene Sichten auf ein System" zu modellieren. Wie dies im einzelnen geschehen soll, läßt er jedoch offen.

Darüber hinaus trägt zur Anpassungsfähigkeit von Netzmodellen bei, daß sich ihre Netzkonstrukte durch verschiedene materiale Bedeutungszuweisungen interpretieren lassen. Vgl. dazu die Ausführungen zur Interpretierbarkeit. In dieser Hinsicht besteht z.B. die Option, Netzkonstrukte einmal auf der konkreten Ebene von realen Objekten und Aktivitäten zu interpretieren. Ein anderes Mal lassen sich dieselben Netzkonstrukte auf der abstrakten Ebene von Informationen über interessante Aspekte des modellierten Realitätsausschnitts auslegen. Auf diese Weise ist es möglich, Bedürfnissen eines Modellierungsträgers nach einem konkreteren bzw. abstrakteren Modellierungsniveau entgegenzukommen. Ebenso kann der Freiheitsgrad bei der Beschriftung von Kanal/Instanz-Netzen benutzt werden, um ein Netzmodell entweder an den Wunsch nach vornehmlich natürlichsprachlichen oder aber an die Vorliebe für überwiegend formalsprachliche Komponentenanschriften anzupassen. Damit lassen sich Modellierungsbedürfnisse nach besonders großer Anschaulichkeit bzw. Präzision befriedigen. Allerdings besteht diese Anpassungsoption nicht für die hier beurteilten drei Netzklassen, sondern nur innerhalb der Klasse aller Kanal/Instanz-Netze.

Ein weitreichendes, allerdings nur in rudimentären Ansätzen entfaltetes Konzept für die systematische Anpassung von Netzmodellen hat GERNERT (1982), S. 151f., skizziert. Er schlägt vor, zunächst ein Netzmodell für den erwarteten Normalfall der Modellanwendung zu konstruieren. Hinzu treten soll eine Sammlung von Bedingungen und von Modifizierungsregeln. Die Bedingungen spezifizieren jeweils Sonderfälle der Modellanwendung. Die Modifizierungsregeln legen in Abhängigkeit von den Bedingungen fest, wie das ursprüngliche Netzmodell an die besonderen Modellierungsbedingungen strukturell angepaßt werden kann. Dabei beschreiben die Regeln, auf welche Weise die Knoten- und Kantenmengen des Netzmodells zu modifizieren sind. Dieser interessante konzeptionelle Ansatz wurde allerdings bisher nicht ausgebaut. Insbesondere wurde nicht geklärt, wie aus den Beschreibungen der Sonderfälle von Modellanwendungen die erforderlichen strukturellen Netzveränderungen systematisch abgeleitet werden können.

Eine Adaption von Netzmodellen läßt sich auch in der Weise vorstellen, daß die früher erörterte Mehrdeutigkeit der Netzanwendung ausgenutzt wird. Dort wurde aufgezeigt, daß ein Modellierungsträger innerhalb derselben Netzklasse diejenige Schaltstrategie auswählen kann, die seinen Modellierungsbedürfnissen am besten gerecht wird. Darüber hinaus vermag er bei Netzmodellen, die auf Synthetischen Kernnetzen beruhen, für mehrere Ausgangskanten derselben Transition entweder eine ad- oder aber eine konjunktive Verknüpfungslogik festzulegen. Es mag als ein Beitrag zur Adaptivität angesehen werden, die vorgenannten Optionen in unterschiedlicher Weise auszunutzen, wenn sich die Modellierungsbedürfnisse ändern. Beispielsweise kann von einem deklarativen Netzmodell mit adjunktiv verknüpften Ausgangskanten zu einem operationalen Netzmodell mit konjunktiv verknüpften Ausgangskanten übergewechselt werden, wenn sich das Modellierungsbedürfnis von prädikatenlogischen Konsistenzbeweisen fortbewegt hin zu einer ausdrucksmächtigeren Modellierung mit Schaltprioritäten und variablen Kantengewichten. Bei der Veränderung der verfolgten Schaltstrategie oder der Verknüpfungslogik von Transitionen handelt es sich aber um gravierende Eingriffe in die dynamische Struktur eines Netzmodells. Es erfolgt ein Struktur-

bruch. Er kann dazu führen, daß sich das Netzmodell nach der Strukturveränderung mit dem Netzmodell vor der Strukturveränderung nicht mehr vergleichen läßt. Aufgrund dieser Gefahr wird in der Variation von Schaltstrategien oder von Verknüpfungslogiken kein Beitrag gesehen, der die Adaptivität von Netzmodellen wesentlich unterstützt. Des weiteren kann an die modellimmanente Anpassung von Netzmodellen im Rahmen von Selbstmodifizierenden Netzen gedacht werden. Dieser Aspekt klingt bei GERNERT (1982), S. 151, an. Allerdings können sich in Selbstmodifizierenden Netzen gravierende strukturelle Veränderungen der Netztopologie abspielen. Sie unterliegen daher ähnlichen Strukturbrüchen wie die zuvor kritisierte Ausnutzung von Modellierungsmehrdeutigkeiten. Darüber hinaus lassen Selbstmodifizierende Netze nur Veränderungen ihrer knotenverknüpfenden Flußrelation zu. Modellanpassungen, die eine Variation der Knotenmenge erfordern würden, bleiben dagegen von vornherein ausgeschlossen. Deshalb eignen sich Selbstmodifizierende Netze nur für ein eng begrenztes Anpassungsspektrum. An früherer Stelle wurde auf weitere Schwächen von Selbstmodifizierenden Netzen hingewiesen. Infolgedessen wird auf ihre Beiträge zur Adaptivität des Petrinetz-Konzepts nicht weiter eingegangen.

Schließlich könnten polyhierarchische Netzmodelle als ein Beitrag zur Adaptivität von Netzmodellen gesehen werden. Darauf wurde bereits im Zusammenhang mit hierarchischen Modellverfeinerungen eingegangen. Die dort angesprochene Ausrichtung der Verfeinerungshierarchien an unterschiedlichen Modellierungszwecken gestattet es, ein Netzmodell an mehrere Modellierungsbedürfnisse anzupassen. Allerdings geschieht diese Anpassung nicht durch eine *Veränderung* des betroffenen Netzmodells. Vielmehr wird die Anpassung innerhalb *desselben* Netzmodells durch eine Polyhierarchie realisiert. Aufgrund des fehlenden Beitrags zu Modellmodifizierungen wird hier davon Abstand genommen, polyhierarchische Netzmodelle als adaptiven Aspekt des Petrinetz-Konzepts näher zu thematisieren.

6) Dies schließt variierende Detaillierungsbedürfnisse mit ein, da zunehmende Detaillierung im Regelfall mit anwachsender Konkretisierung verbunden ist.

7) Vgl. WINAND (1980), S. 1252f.

8) Vgl. CAVARROC (1974), S. 95; WINAND (1980), S. 1252.

9) Vgl. CAVARROC (1974), S. 95.

10) Zunehmende Konkretisierung der Objektrepräsentation durch Netzverfeinerung bedeutet, daß die Anzahl der atomaren Netzkomponenten ansteigt. Umgekehrt folgt aus einer anwachsenden Abstrahierung durch Netzvergrößerung, daß die Anzahl der atomaren Netzkomponenten reduziert wird. Folglich trifft die o.a. Zu- bzw. Abnahme der Modellkomplexität zumindest dann zu, wenn die Komplexität eines Netzmodells anhand der Anzahl atomarer Modellkomponenten gemessen wird.

11) Von den vielfältigen Schwierigkeiten, eine "mittlere" Modellkomplexion auf einer operationalen Komplexionskala zu lokalisieren, wird hier abgesehen. Darauf gehen auch die Quellen aus der nachstehenden Anmerkung nicht ein. Es handelt sich allenfalls um eine stark vergrößernde, metaphorisch gemeinte Anspielung auf unterschiedliche Komplexionsausmaße. Die tatsächlichen Schwierigkeiten, die Komplexion von Modellen messen - oder gar "optimieren" - zu wollen, klangen schon kurz an. Vgl. vor allem die dort angeführten Quellen zur Vertiefung der meßtechnischen Probleme.

12) Vgl. MURATA,TA. (1979a), S. 807; MURATA,TA. (1980a), S. 525; SUZUKI,I. (1980a), S. 620; FINKEL (1987b), S. 501 (mittelbar als "good compromise").

Auf den Aspekt der mittleren Netzkomplexität wurde schon eingegangen, als die abstrakte Simulation von Programmablaufplänen durch Petrinetze erwähnt wurde. Die dort vorgetragene Argumentation, die sich auf die Repräsentation von Programmablaufstrukturen bezog, läßt sich auf die Modellierung beliebiger Objekte verallgemeinern. Die These mittlerer Netzkomplexität lautet dann: Einerseits reicht die Komplexität von Netzmodellen aus, um komplexe Modellierungsobjekte adäquat zu repräsentieren. Andererseits bleibt die Komplexität noch so niedrig, daß die Netzmodelle verständlich ausfallen und mit praktisch akzeptablem Aufwand ausgewertet werden können.

13) Vergrößerungen von Netzmodellen erfüllen die Adaptivitätsvariante der "Ausbaufähigkeit" auf eine intuitiv naheliegende Weise. Die Forderung nach Ausbaufähigkeit wurde in einer früheren Anmerkung bereits angesprochen. Vgl. zur Ausbaufähigkeit von Netzmodellen auch WINAND (1980), S. 1251f.

14) Vgl. WINAND (1980), S. 1252.

15) Die unbeabsichtigte, also zufällige Konstruktion einzelner Netzmodelle mit geeigneten Synchronisationsstellen erscheint höchst unwahrscheinlich. Sie kann allenfalls dadurch begünstigt werden, daß von vornherein Konstruktionsregeln beachtet werden, die eine spätere Auszeichnung von Synchronisationsstellen erleichtern. Solche Konstruktionsregeln wurden jedoch für Netzmodelle bislang noch nicht systematisch erforscht.

16) Die besondere Einfachheit resultiert aus dem Umstand, daß sich nur solche Bedürfnisverschiebungen berücksichtigen lassen, die durch unterschiedliche Wertzuweisungen zu Variablen abgedeckt werden können. Die Beschränktheit parametrischer Modellanpassungen unterstreicht auch STAUDINGER (1990), S. 176.

17) Vgl. DINKELBACH (1969), S. 29f. u. 90ff.; MÜLLER-MERBACH (1973), S. 153ff.; DINKELBACH (1976), Sp. 3533ff.; GEOFFRION (1980), S. 29f.; WENDT (1989), S. 240ff.; ELLINGER (1990a), S. 137ff.; STAUDINGER (1990), S. 176 (für ein industriell eingesetztes Lineares Optimierungsmodell).

Die Forderung nach Parametrisierung wird darüber hinaus auch oftmals bei der Modellierung von Realitätsbereichen durch Software-Programme erhoben; vgl. SCHRÖDER, H. (1983), S. 81; HORVATH (1983), S. 92f.

18) Damit unterscheiden sich die Variablen aus parametrischen Modellformulierungen deutlich von denjenigen Variablen, die schon in gewöhnlichen Netzmodellen enthalten sind. Zu den letztgenannten Variablen gehören vor allem die Variablen in Kantengewichten, die durch unterschiedliche Markenkopien gebunden werden können. Alle Variablen aus gewöhnlichen Netzmodellen zeichnen sich dadurch aus, daß sie nach der Konstruktion eines einzelfallspezifischen Netzmodells vorliegen. Sie werden erst während einer Auswertung des Netzmodells durch Konstanten gebunden. Die Variablen aus einer parametrischen Modellformulierung werden dagegen schon während der Anwendung auf eine konkrete Modellierungsaufgabe durch Konstanten ersetzt. Daher sind die letztgenannten Variablen bereits am Ende einer einzelfallspezifischen Modellkonstruktion vollständig durch Konstanten substituiert.

19) Eine Modellanpassung wird hier als parametrisch bezeichnet, wenn sie dadurch erfolgt, daß die Variablen ("Parameter") einer parametrischen Modellformulierung durch zulässige Konstanten aus ihren Definitionsbereichen ersetzt werden.

20) Eine weitere Möglichkeit deutet WENDT (1989), S. 244, Bild 140, an. Allerdings bezieht er sich auf ein Kanal/Instanz-Netz (i.w.S.). Darüber hinaus bleibt seine Skizze so unbestimmt, daß sie hier nicht weiter behandelt wird.

21) Diese Einschränkung bezieht sich aber nur auf die vorgenannten Parametrisierungsbeispiele für Synthetische Netze. Darüber hinaus besitzen Stelle/Transition-Netze und Synthetische Netze weitere gemeinsame, hier nicht vollständig aufgezählte Ansatzpunkte für parametrische Modellformulierungen. Dazu gehören z.B. variable Markenkapazitäten der Stellen.

22) Diese Anpassungsoption klingt bei WINAND (1980), S. 1252 als "alternatives Marken-Setzen" an.

23) Die Auswertungstechniken wurden zwar nur auf Synthetische Netze bezogen. Sie können aber im Prinzip auch auf andere Netzklassen angewandt werden, sofern die Netzklassen auf vollständig formalisierten Netzdefinitionen beruhen.

24) Diese Möglichkeit wird bei WINAND (1980), S. 1252, als iterative Modellierung angesprochen. Zugleich wird die Eignung des Petrinetz-Konzepts für solche iterativen Modellierungen hervorgehoben.

25) Dies ist z.B. dann der Fall, wenn zunächst nur die Existenz beweglicher Objekte modelliert wurde. Dafür reichen Stelle/Transition-Netze aus. Sollen dagegen auch die Eigenschaften dieser Objekte berücksichtigt werden, muß zu Höheren Netzen, wie z.B. Synthetischen Netzen, übergegangen werden.

26) Aufgrund dieser Anpassungsfähigkeit ist der Behauptung von MÜLLER-SILVA (1984a), S. 43f., zu widersprechen, Petrinetze erlaubten lediglich "harte" Modellierungen. Sie könnten nur diejenigen Aspekte eines Realproblems erfassen, welche die "Modellsprache" (S. 44) und die "mathematische Theorie" (S. 44) von Petrinetzen erfüllen würden. Zwar stimmt MÜLLER-SILVA's Einlassung insofern, als sich nur solche Problemaspekte modellieren lassen, die von den Ausdrucksmitteln des Petrinetz-Konzepts abgedeckt werden. Aber die Präsupposition, es existierte genau eine Modellsprache "des" Petrinetz-Konzepts, führt in die Irre. Denn das Petrinetz-Konzept zeichnet sich gerade durch die Vielfalt seiner Netzklassen aus, die sich an vielfältige Modellierungsbedürfnisse anzupassen vermögen. Dazu können auch Bedürfnisse gehören, unterschiedlichsten Aspekten von Realproblemen gerecht zu werden. Beispielsweise wird auf die Klassen der Stochastischen Netze und der Zeitnetze verwiesen, die auf die Repräsentation von stochastischen bzw. temporalen Problemaspekten spezialisiert sind. Hinzu kommt noch die Möglichkeit, innerhalb derselben Netzklasse die materialen Bedeutungen von Netzkonstrukten auf verschiedene Weise zu interpretieren. Vgl. dazu die Ausführungen zur Interpretierbarkeit von Netzmodellen. In dieser Hinsicht erweist sich die Klasse der Kanal/Instanz-Netze als besonders flexibel. Denn durch ihre frei gestaltbaren Anschriften können die Netzkomponenten nahezu beliebig interpretiert werden. Sowohl die Anwendbarkeit verschiedenartiger Netzklassen als auch die Interpretierbarkeit von Netzmodellen erlauben eine "weiche" Modellierung, die sich an Eigenarten der konkret bearbeiteten Realprobleme "plastisch" anpassen läßt. Damit genügt das Petrinetz-Konzept - im Gegensatz zur Ansicht MÜLLER-SILVA's - durchaus den Ansprüchen, die von Vertretern einer "weichen Systemmodellierung" erhoben werden. Vgl. zu ausführlicheren Darlegungen des Konzepts weicher Systemmodellierung CHECKLAND (1981), S. 125ff.; MÜLLER-SILVA (1984a), S. 43f.; CHECKLAND (1985), S. 8ff.; CHECKLAND (1987), S. 117ff.

27) Ein weiteres Beispiel für die Eignung von Netzmodellen, an die Bedürfnisse von Modellierungsträgern angepaßt zu werden, läßt sich hinsichtlich der Repräsentation von Schaltprozessen anführen. Dafür kommen vier Repräsentationsformen in Betracht, die sich erheblich voneinander unterscheiden:

- Die abstrakteste Repräsentation leistet das Konzept der formalen Netzsprachen. Dort werden Schaltprozesse als Zeichenfolgen einer Formalsprache ausgedrückt. Dabei werden zumeist nur die Schaltakte von Transitionen erfaßt. Die intermittierenden Netzmarkierungen werden in der Regel nicht als sprachliche Zeichen berücksichtigt.
- Prozeßspezifische Erreichbarkeitsmengen von Netzmodellen bleiben ähnlich abstrakt. Sie verhalten sich zu formalen Netzsprachen komplementär. Denn in prozeßspezifischen Erreichbarkeitsmengen werden nur die Netzmarkierungen berücksichtigt, die sich von der Ausgangsmarkierung aus durch das Ausführen der zugrundegelegten Schaltprozesse erreichen lassen. Die dabei erfolgenden Schaltakte von Transitionen bleiben hingegen unberücksichtigt.
- Prozeßspezifische Erreichbarkeitsgraphen erlauben eine integrierte Repräsentation der Schaltakte und der Markierungen, die bei der Ausführung eines Schaltprozesses stattfinden bzw. durchlaufen werden. Zugleich führen sie aufgrund der Anschaulichkeit von visualisierten Graphen zu einer weniger abstrakt anmutenden Prozeßrepräsentation.
- Die konkreteste Repräsentationsform von Schaltprozessen stellen Geschehnisnetze dar. Sie gehen als "Prozeßnetze" aus der prozeßspezifischen Abwicklung eines Netzmodells ("Systemnetzes") hervor. In ihnen werden Transitionen, die bei der Prozeßausführung im Netzmodell geschaltet werden, unmittelbar wieder als Transitionen wiedergegeben.

Allerdings übersteigt die Adaptivität der Prozeßrepräsentation nur in geringem Umfang die Grenzen einer Netzklasse. Sie betrifft nur den zuletzt angeführten Aspekt der Geschehnisnetze. Dagegen verdeutlicht dieses Beispiel, wie sich verschiedenartige Formalismen im Rahmen des Petrinetz-Konzepts wechselseitig austauschen lassen, um den Bedürfnissen von Konzeptanwendern entgegenzukommen.

28) Eine Andeutung des bedürfnisgerechten Einsatzes unterschiedlicher Netzklassen findet sich bei PETRI, C. (1980a), S. 6.

29) Es steht nur eine endliche Anzahl von Netzklassen zur Verfügung. Die Ausmaße, in denen sie die verschiedenen Kriterien von Modellierungsfähigkeit und -güte erfüllen, unterscheiden sich jeweils um endliche, diskrete Beträge. Daher besteht geringe Aussicht, daß eine Netzklasse die Bedürfnisse eines Modellierungsträgers exakt trifft. Dies kann allenfalls zufällig geschehen. Darüber hinaus lassen sich Kriterien, die sich zueinander tendenziell gegenläufig verhalten, niemals zugleich in hohem Ausmaß erfüllen. Darauf wird in Kürze näher eingegangen.

30) Der Verf. schließt sich nicht der Ansicht an, das Petrinetz-Konzept leiste generell einen "praktikablen" Kompromiß zwischen Modellierungsfähigkeit und -güte. Vgl. zu dieser Auffassung VALETTE (1982c), S. 3. Denn das Petrinetz-Konzept erfüllt "an sich" die Kriterien von Modellierungsfähigkeit und -güte in keinem bestimmten Ausmaß. A fortiori bietet es auch keinen "gelungenen" Kompromiß zwischen diesen Modellierungsaspekten an. Vielmehr zeichnet sich das Petrinetz-Konzept dadurch aus, daß es die vorgenannten Kriterien durch sein Angebot verschiedener Netzklassen in unterschiedlichem, an Abhängigkeit von den Benutzerinteressen variablem Ausmaß zu erfüllen vermag. Dies entspricht den Ausführungen, die oben gegen das Argument einer "mittleren" Modellkomplexität vorgetragen wurden. Allerdings ging es dort um die Komplexitätsvariation von Netzmodellen innerhalb einer Netzklasse. Dagegen interessiert hier der Wechsel zwischen verschiedenen Netzklassen.

31) Die Kriterien sind mit denjenigen Beurteilungskriterien identisch, die hier der Erarbeitung eines Stärken/Schwächen-Profiles für das Petrinetz-Konzept zugrundeliegen.

32) Neben den nachfolgend ausgeführten Gegenläufigkeiten existieren weitere Konflikte zwischen Beurteilungskriterien. Die tendenziell gegenläufige Erfüllung von Beurteilungskriterien erstreckt sich z.B. auch auf:

- Intelligibilität (Verständlichkeit) und Präzision (Formalisierung); vgl. AYACHE (1979a), S. 1050;
- Transparenz (Anschaulichkeit) und Komplexität (Ausdrucksmächtigkeit); vgl. PRESSMAR (1982), S. 338;
- Vollständigkeit und Einheitlichkeit;
- Vollständigkeit und Einfachheit; vgl. LITTLE, J. (1970), S. B-470; BUSCH, R. (1977), S. 9;
- Einheitlichkeit, die im Sinne einer netzklassenübergreifenden Standardisierung verstanden wird, und Adaptivität.

33) Auf diese gegenläufige Tendenz hat auch GENRICH (1983a) nachdrücklich hingewiesen: Der Modellierungsträger müsse sich bei Netzbeschriftungen zwischen zwei entgegengesetzten Optionen entscheiden. Entweder er bevorzuge intelligible, kommunikationsfreundliche und ästhetisch gestaltbare Beschriftungen durch natürlichsprachliche Texte. (Die Textgestaltung kann auch durch graphische Hilfsmittel unterstützt werden, wie z.B. durch die "Kartuschen", die in dieser Arbeit verwendet wurden.) Oder er präferiere formalsprachliche Netzanschriften, die durch formale - insbesondere automatisch ausführbare - Auswertungstechniken bearbeitet werden können.

34) Vgl. GENRICH (1978b), S. 84; OBERQUELLE (1979a), S. A.1.

35) Die geringe Komplexität von Kanal/Instanz-Netzen beruht nicht ausschließlich auf Abstraktion. Hinzu kommt eine Technik der "Komplexitätsverbergung". Instrument dieser Technik sind die natürlichsprachlichen Anschriften von Netzkomponenten. Sie wirken auf den menschlichen Betrachter relativ einfach. Dazu tragen vor allem die Vertrautheit natürlicher Sprache und ihre Verankerung im Alltagswissen des Betrachters bei. Tatsächlich kann aber in einer natürlichsprachlichen Netzanschrift ein hochkomplexer Sachverhalt ausgedrückt werden. Dies wird deutlich,

wenn später versucht wird, natürlichsprachliche Netzanschriften in formalsprachliche Netzkonstrukte umzusetzen. Oftmals sind dann aufwendige Konstruktionen notwendig, um der immanenten Komplexität einer natürlichsprachlichen Formulierung gerecht zu werden. So kann die Transformation natürlichsprachlicher Anschriften in formalsprachliche Konstrukte die Komplexität natürlicher Sprache offenbaren. Diese Komplexität war zuvor schon latent vorhanden, wurde aber aufgrund der Vertrautheit mit natürlichen Sprachzusammenhängen nicht bewußt wahrgenommen.

Aus der speziellen Perspektive von natürlichsprachlichen Netzanschriften ergibt sich eine differenziertere Behandlung der "geringeren" Komplexität von Kanal/Instanz-Netzen: Ein Kanal/Instanz-Netz, das reichlich mit natürlichsprachlichen Anschriften versehen ist, besitzt eine geringe äußerlich wahrgenommene Komplexität. Wird jedoch die latente Komplexität seiner natürlichsprachlichen Anschriften hinzugenommen, so kann dasselbe Kanal/Instanz-Netz durchaus eine beachtliche immanente Komplexität aufweisen. Folglich ist es möglich, in Kanal/Instanz-Netzen die Komplexität eines Modellierungsobjekts natürlichsprachlich partiell zu verdecken - aber dennoch zu bewahren. Auf diese Weise erfolgt eine Komplexitätsbewältigung, die nicht die rohe Methode der Komplexitätsreduzierung befolgt. Vielmehr wird Komplexität bewältigt, indem sie in eine natürlichsprachliche Repräsentationsform eingebunden wird, die der menschlichen Kognition vertraut ist. In Anlehnung an HORKHEIMER und ADORNO kann von einer "Bewältigung durch Mimesis" gesprochen werden, die an die Stelle der sonst vorherrschenden "Bewältigung durch Reduktion" tritt. Vgl. zur Vorstellung der mimetischen Realitätsannäherung HORKHEIMER (1969), S. 64.

36) Dabei wird vorausgesetzt, daß der Modellierungsträger bereit ist, in jeder Phase der Erfüllung einer Modellierungsaufgabe sein Modellierungsbedürfnis auf *genau ein* Kriterium der Modellierungsfähigkeit oder -güte zu fokussieren, an dessen Erfüllung er besonders interessiert ist. Andernfalls könnte der Fall eintreten, daß der Modellierungsträger innerhalb derselben Phase sein Interesse an der möglichst guten Erfüllung von mindestens zwei Kriterien artikuliert, die sich tendenziell gegenläufig verhalten. Dann existiert aber grundsätzlich keine Netzklasse, die sich bedürfnisgerecht auswählen läßt. In dieser Einschränkung liegt allerdings keine Schwäche des Petrinetz-Konzepts. Vielmehr handelt es sich um die Ausgrenzung von in sich widersprüchlichen Modellierungsbedürfnissen.

37) Es könnte zwar der Einwand erhoben werden, daß sich ausdrucksmächtigere Netzklassen auf weniger ausdrucksmächtige Netzklassen durch Entfaltungen, Netzmorphismen und ähnliche Operationen zurückführen lassen. Dies gelingt jedoch keineswegs immer. Insbesondere scheiden diese Reduktionsmöglichkeiten zumeist in jenen allgemeinen Fällen aus, in denen das *gesamte*, von keinen Einschränkungen behinderte Ausdruckspotential der ausdrucksmächtigeren Netzklassen zugelassen wird. Vgl. dazu die Erläuterungen zu den Schwierigkeiten, für alle Netzklassen eine gemeinsam zugrundeliegende Klasse von "Urnetzen" zu identifizieren. Vgl. auch den Hinweis auf die Schwierigkeiten, Prädikat/Transition-Netze durch Entfaltung auf Stelle/Transition-Netze zu reduzieren, wenn für die "Individuen" unendliche Definitionsbereiche zugelassen werden.

38) Für die hier interessierende Beurteilung der Modellierungsgüte des Petrinetz-Konzepts ist es nicht notwendig, einen operationalen Maßstab für die Komplexität von Modellierungsobjekten einzuführen. Gleiches gilt für die Komplexität der objektrepräsentierenden Netze. Statt dessen wird die Komplexität des Modellierungsobjekts auf einen groben, intuitiv verstandenen Komplexitätsbegriff bezogen. Darüber hinaus wurde an anderer Stelle angedeutet, wie sich der Komplexitätsbegriff operational präzisieren läßt. Die dort angeführten Komplexitätsaspekte fließen in die nachfolgende, intuitive Verwendung des Komplexitätsbegriffs ein.

Darüber hinaus ist zu beachten, daß die Komplexität des Modellierungsobjekts zwar als fest vorgegebene Größe behandelt wird, an die ein objektrepräsentierendes Netzmodell angepaßt werden soll. Diese Anpassung bezieht sich jedoch nur auf diejenige Modellierungsphase, in der aus einer natürlichsprachlichen Beschreibung oder einer formalsprachlichen Spezifizierung des Modellierungsobjekts ein Netzmodell konstruiert wird. Die Objektbeschreibung oder -spezifizierung liegen dann schon vor. Sie konstituieren die "fest vorgegebene" Komplexität des Modellierungsobjekts. Sobald jedoch auch die früheren Modellierungsphasen einbezogen werden, zeigt sich, daß die Objektkomplexität ebenso nur ein Produkt aktiver Modellierungstätigkeit ist. Daher steht die Objektkomplexität keineswegs "objektiv" fest. Vielmehr handelt es sich um das Resultat der Konzeptualisierungsleistung eines Modellierungsträgers. Auch die Bereitschaft des Modellierungsträgers, unterschiedliche Ausmaße von Modellkomplexität zu akzeptieren, kann sich auf die Komplexion seiner Objekt-konzeptualisierung auswirken. Vgl. dazu die Ausführungen von MEYER ZU SELHAUSEN (1980b), S. 134f., zu verschiedenen Graden der Komplexitätsakzeptanz. Von dieser subjektiven Bedingtheit der Komplexität eines Modellierungsobjekts wird hier abstrahiert. Dies ist zulässig, weil nur noch die Phase der Konstruktion eines angepaßten Netzmodells interessiert. Die komplexitätsschaffende oder -reduzierende Konzeptualisierungsphase ist dann schon abgeschlossen.

39) Vgl. die Anmerkungen zum "Zoom"-Effekt von Netzverfeinerungen und -vergrößerungen. Sein Beitrag zur Komplexitätsanpassung klingt bei IGEL (1986b), S. 1, an: "Sukzessives Verfeinern erlaubt das Arbeiten mit *überschaubaren* Teilsystemen." (kursive Hervorhebung durch den Verf.).

40) Dies ist immer dann der Fall, wenn von Netzklassen mit einfacheren Netzkonstrukten zu Netzklassen mit komplexeren Netzkonstrukten übergewechselt wird (vice versa). Das trifft z.B. auf den Wechsel zwischen Stelle/Transition-Netzen und Synthetischen Kernnetzen zu. Beispielsweise ist die Schaltregel von Synthetischen Kernnetzen erheblich komplexer als die von Stelle/Transition-Netzen. Dies leuchtet aufgrund eines intuitiven Komplexitätsver-

ständnisses unmittelbar ein. Daher wird darauf verzichtet, präzise darzulegen, wie sich die "Einfachheit" oder "Komplexität" von Netzkonstrukten konkretisieren lassen.

41) Damit wird einer Anregung von MEYER ZU SELHAUSEN (1980b), S. 134, entsprochen: "Da grundsätzlich von der Modellkomplexität und der Aufnahmebereitschaft für Modellkomplexität von der Seite der Entscheidungsträger, Benutzer und sonstigen Betroffenen die Akzeptanz eines Modells abhängt, wird empfohlen, das Maß der Modellkomplexität ... so zu wählen, daß es die Aufnahmebereitschaft des jeweiligen Entscheidungsträgers für Modellkomplexität nicht überfordert."

42) Daher leistet die kombinierte Segmentierung und Abstrahierung von Netzmodellen einen bemerkenswerten Beitrag zur Komplexitätsbewältigung durch Modellreduktion.

43) Eine Konstruktcompilierung erfolgt z.B., wenn mehrere Eingangskanten derselben Transition mit dem Kantengewicht "Eins" zu genau einer Eingangskante mit einem entsprechend vervielfachten Kantengewicht zusammengefaßt werden.

44) Eine Konstruktdecompilierung tritt z.B. ein, wenn die Eingangskante einer Transition, die ein Kantengewicht größer als "Eins" besitzt, in entsprechend viele einheitsgewichtete Eingangskanten aufgespalten wird.

45) Eine Konstruktverallgemeinerung liegt z.B. vor, wenn von den Stellen eines Bedingung/Ereignis-Netzes, die jeweils die Markenkapazität "Eins" besitzen, zu einer Stelle aus einem Stelle/Transition-Netz mit unbeschränkter Markenkapazität übergegangen wird.

46) Eine Konstruktreduzierung geschieht z.B., wenn von der Stelle eines Stelle/Transition-Netzes mit unbeschränkter Markenkapazität auf eine Stelle mit beschränkter Markenkapazität übergegangen wird.

47) Eine Konstruktinnovation stellt z.B. die Einführung von Inhibitorkanten dar.

48) Eine Konstruktdestruktion besteht z.B. im nachträglichen Verzicht auf Inhibitorkanten.

49) Die nachfolgenden Ausführungen beruhen auf einer Idee von VALK (1981b), S. 148.

50) Ebenso ist eine umgekehrt verlaufende Anpassung perzipierter Netzkomplexität möglich. Dann werden Netzanschriften in Konstrukte der Netztopologie transformiert. Dadurch steigt die bewußt wahrgenommene Komplexität eines Netzes an.

51) Als verdeutlichendes Beispiel wird ein Netz betrachtet, in dem ausschließlich einheitsgewichtete Kanten zugelassen sind. Die Kantengewichte "Eins" werden nicht explizit notiert, sondern werden in der Schaltregel für die Transitionen implizit verwendet. Das Netz enthält mindestens eine Transition, die mehrere Eingangskanten besitzt. Diese einheitsgewichteten Eingangskanten werden mittels Konstruktcompilierung zu genau einer Eingangskante zusammengefaßt. Die Eingangskante wird mit einem entsprechenden Kantengewicht, das größer als "Eins" ist, beschriftet. Durch die Verringerung der Kantenzahl hat die offensichtliche Komplexität der Netztopologie abgenommen. Der Komplexitätsbeitrag der multiplen Eingangskanten ist aber nicht untergegangen. Statt dessen ist er in das Kantengewicht der einen neu eingeführten, explizit gewichteten Eingangskante eingeflossen. Die Kantenschrift, die das Gewicht der Eingangskante ausdrückt, wird aber von einem menschlichen Betrachter nicht als "komplex" wahrgenommen. Daher ist die perzipierte Komplexität des betrachteten Netzes insgesamt gesunken. Die immanente Netzkomplexität bleibt jedoch unverändert. Denn der Komplexitätsbeitrag der multiplen Eingangskanten wurde lediglich in der "einfachen" Anschrift eines Kantengewichts verborgen. Er ist weiterhin latent vorhanden.

Dieses Beispiel zeigt, daß die Komplexitätsanpassung durch Netzbeschriftung keine zusätzliche Anpassungsstrategie darstellt, die unabhängig von den oben aufgelisteten sechs qualitativen Anpassungsformen ist. Vielmehr wurde auf die erste Anpassungsvariante der Konstruktcompilierung zurückgegriffen. Daher handelt es sich bei der Beschriftungsstrategie "nur" um eine besondere Perspektive, in die sich die sechs qualitativen Anpassungsformen einbetten lassen. Ein weiteres Beispiel für die Beschriftungsstrategie wurde schon im Zusammenhang mit der Komplexitätsbewältigung durch Kanal/Instanz-Netze erörtert.

9.2.2.3.11 Integrationsqualität

Die Integrationsqualität¹⁾ eines Modellierungskonzepts betrifft das Ausmaß, in dem das Konzept gestattet, die Leistungspotentiale anderer Konzepte in Modellierungen einzubeziehen²⁾. Auf solche Integrationsmöglichkeiten wurde in dieser Arbeit schon mehrfach en passant eingegangen. Dabei wurde des öfteren auf die konzeptionellen Schnittstellen hingewiesen, in denen das Petri-Netz-Konzept mit anderen Konzepten zusammenzuwirken vermag³⁾. Darüber hinaus bieten sich die meisten⁴⁾ der logischen und mathematischen Konzepte als Integrationskandidaten an, die bereits als formale Fundamente des Petri-Netz-Konzepts angeführt wurden. Die nachfolgende Auflistung faßt die wesentlichen⁵⁾ konzeptionellen Fremdleistungen zusammen, die sich in die Konstruktion und Auswertung von Netzmodellen einbinden lassen⁶⁾:

- ❑ Aussagen- und Prädikatenlogik: strenge Nachweise der logischen Widerspruchsfreiheit;
- ❑ Prädikatenlogik: Ausdrucksmächtigkeit und Erkenntnis der prädikatenlogischen Semi-Entscheidbarkeit;
- ❑ Modallogik: Nachweise notwendiger und verbotener Netzverhaltensweisen;
- ❑ dynamische und temporale Logiken: Terminierungsnachweise für endliches Netzverhalten;
- ❑ nonmonotone Logiken: Modellanpassungen an Formeln, deren Gültigkeit sich im Zeitablauf verändern kann;
- ❑ Graphentheorie: Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen zur Überprüfung dynamischer Netzeigenschaften, wie z.B. Deadlocks, Lebendigkeit oder Optimalität;
- ❑ sortierte Algebra: Ausdrucksmächtigkeit;
- ❑ Künstliche Intelligenz⁷⁾: heuristische Lösungssuche in Problemgraphen oder abstrakten Zustandsräumen für die Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen, verteiltes Problemlösen, Wissensrepräsentation durch Produktionsregeln, logische Programmierung, begründungsverwaltende Systeme für Anpassungsplanungen;
- ❑ allgemeine⁸⁾ Informatik: nebenläufige Automatenarchitekturen zur Ausführung von effizienten "parallelen" Algorithmen, z.B. für die Konstruktion von Erreichbarkeitsgraphen (Blackboards, Agenden und Dämonen)⁹⁾, transaktionsorientierte Informationsverarbeitung, objektorientierte Systemgestaltung.

Die voranstehende Übersicht belegt eine bemerkenswert hohe Integrationsqualität des Petri-Netz-Konzepts¹⁰⁾. Sie kommt vor allem den Synthetischen Kernnetzen und den Erweiterten Synthetischen Netzen zu. Bei Stelle/Transition-Netzen scheiden dagegen wegen ihrer zu geringen Ausdrucksmächtigkeit einige Integrationsaspekte von vornherein aus. Dies betrifft einerseits die sortierte Algebra. Andererseits gilt das Gleiche für Prädikaten- und Modallogik sowie dynamische und temporale Logiken. Die übrigen Fremdleistungen anderer Konzepte lassen sich zwar im Prinzip in Stelle/Transition-Netze einbinden. Aber wiederum führt die geringe Ausdrucksmächtigkeit dieser Netzklasse dazu, daß sich auch die übrigen Integrationsaspekte nur in bescheidenem Ausmaß integrieren lassen. Lediglich die Beiträge von Graphentheorie und KI-Forschung zur Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen können in ähnlichem Ausmaß aufgenommen werden, wie es für Synthetische Netze der Fall ist. Dies liegt an dem Sachverhalt, daß Erreichbarkeitsgraphen auf alle Netzklassen angewendet werden können, die eine wohldefinierte Netz-dynamik besitzen.

Die Integrationsqualität des Petri-Netz-Konzepts läßt sich anhand der Verknüpfung zweier Eigenschaften verdeutlichen, die in *dieser* Form bei Koordinierungskonzepten selten angetroffen wird¹¹⁾. Einerseits beruht das Petri-Netz-Konzept auf einem anspruchsvollen logisch-mathematischen Fundament. Infolgedessen lassen sich Petri-Netze mit einer breiten Palette formaler, wohl-

fundierter Gestaltungs- und Untersuchungsmittel¹²⁾ verknüpfen¹³⁾. Hierin stimmt das Petrinetz-Konzept mit dem ebenfalls wohlfundierten Modellierungskonzept der OR-Programme tendenziell überein¹⁴⁾. Zugleich hebt sich das Petrinetz-Konzept dadurch von anderen Konzepten - wie z.B. Simulationssprachen und Netzplantechnik - positiv ab. Letztgenannte umfassen zwar Rechentechniken zur Gewinnung von Koordinierungsinformationen. Doch sie fußen nicht auf tieferen mathematischen oder gar logischen Fundamenten¹⁵⁾. Andererseits ermöglichen Petrinetze graphische Repräsentationen, die dem visuellen Auffassungsvermögen des Menschen entgegenkommen. In dieser Hinsicht ähneln Petrinetz-Konzept und Netzplantechnik einander. Dagegen weist das Petrinetz-Konzept über analytische Optimierungskalküle hinaus, für die solche graphischen Darstellungsmodi in keinem nennenswerten Ausmaß erarbeitet wurden¹⁶⁾. Das visuelle Auffassungsvermögen ist jedoch bei betrieblichen Akteuren, die in der Regel mathematisch nicht besonders geschult sind, zumeist wesentlich besser ausgeprägt als die Fähigkeit, mathematische Repräsentationsformalismen zu verstehen¹⁷⁾. Daher bieten sich für die betriebliche Praxis Koordinierungskonzepte an, die den Vorzug einer leistungsfähigen logisch-mathematischen Basis mit den Angenehmlichkeiten einer anschaulichen, verständnis- und kommunikationsfördernden Darstellungsweise verknüpfen. Genau dies wird vom Petrinetz-Konzept ermöglicht. Ein erster Ansatz, der in diese Richtung weist, wurde in dieser Arbeit entfaltet.

Die Integrationsqualität des Petrinetz-Konzepts kann auch dadurch unterstrichen werden, daß auf die frühere Beurteilung seiner allgemeinen Modellierungsfähigkeit zurückgegriffen wird¹⁸⁾. Dort wurde gezeigt, daß sich mit der Hilfe des Petrinetz-Konzepts mehrere andere Modellierungskonzepte wiedergeben lassen. Dies betraf einerseits die allgemeine Modellierungsfähigkeit von TURING-Automaten. Andererseits wurde gezeigt, daß sich mit Petrinetzen sowohl Netzpläne als auch OR-Programme - im dort definierten abstrakten Sinne - simulieren lassen¹⁹⁾. Diese Alternativkonzepte erweisen sich innerhalb ihrer speziellen Anwendungskontexte jeweils als recht leistungsfähig²⁰⁾. Aber sie besitzen nur partikuläre Relevanz, weil es nicht möglich ist, sie auf andere Modellierungskontexte zu übertragen²¹⁾. Dagegen stellt das Petrinetz-Konzept ein wesentlich umfassenderes Modellierungskonzept dar, das die Anwendungskontexte der spezialisierten Alternativkonzepte überdeckt. Daher kann das Petrinetz-Konzept als ein einheitliches Referenzkonzept benutzt werden, in das sich die alternativen Modellierungsansätze einbetten lassen²²⁾.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Die Integrationsqualität wird im allgemeinen nicht als Beurteilungskriterium für Konzepte berücksichtigt. Sie wird hier dennoch thematisiert, da sie für das Petrinetz-Konzept größere Bedeutung erlangt. Lediglich im speziellen Kontext von Softwarepaketen findet die Integrationsqualität als Beurteilungskriterium größere Beachtung; vgl. z.B. FRANK, J. (1976), S. 49ff.; SCHRÖDER, H. (1983), S. 80f.; BAILEY (1983), S. 543. Des öfteren wird auch von der Kompatibilität zwischen Softwarepaketen gesprochen; vgl. FRANK, J. (1976), S. 47; OELLERS (1981), S. 104. Vgl. auch LAUER (1979), S. 151, zur Kompatibilitätsanforderung an Notationen für Nebenläufigkeit. Dabei werden Integrationsqualität und Kompatibilität entweder synonym verwandt. Oder die Integrationsqualität wird ausschließlich auf die Verträglichkeit zwischen zeitgleich eingesetzten Softwarepaketen bezogen ("laterale Kompatibilität"). Die Kompatibilität wird dann für zeitlich aufeinander folgende Softwarepakete reserviert (Aufwärts- oder Abwärtskompatibilität). In dieser Arbeit wird nur von Integrationsqualität gesprochen, und zwar unabhängig von der zeitlichen Einsatzrelation zwischen den betrachteten Konzepten.

Die Anlehnung an Beurteilungskriterien für Softwarepakete mag hier auf den ersten Blick befremden, weil ihre Integrationsqualität (und Kompatibilität) oftmals nur anhand von informationstechnischen Verträglichkeitsaspekten beleuchtet wird. Von dieser praktisch häufigen Verengung wird hier aber abgesehen. Statt dessen interessiert an dieser Stelle, daß jedes Softwarepakete aus der Modellierung eines Realitätsausschnitts hervorgegangen ist. Daher berührt die Integrationsqualität von Software - *neben* den rein informationstechnischen Aspekten - auch die Frage, in welchem Ausmaß sich ihre konzeptionellen Modellierungsgrundlagen miteinander vereinbaren lassen.

2) Es ist durchaus möglich, die Integrationsqualität eines Modellierungskonzepts auch auf andere Weise festzulegen. Beispielsweise kann die schwache Anforderung, andere Konzepte sollten sich *einbeziehen* lassen, durch das stärkere Postulat ersetzt werden, weitere Konzepte sollten *aktiv unterstützt* werden. Vgl. zu dieser Verstärkung HACKMANN (1982), S. 2.

Darüber hinaus läßt sich untersuchen, ob Aspekte, die zuvor separat behandelt wurden, als spezielle Ausformungen eines einheitlich zugrundeliegenden Modellierungsansatzes zusammengeführt - "integriert" - werden können. Aus dieser Perspektive der einheitsstiftenden Integrationsqualität weist das Petrinetz-Konzept zwei herausragende Qualitäten auf. Einerseits erlaubt es, sowohl sequentielle als auch nicht-sequentielle ("parallel") Prozesse auf das umfassende Konzept der nebenläufigen Prozesse zurückzuführen. Andererseits können simulative und analytische Modellauswertungen auf eine gemeinsame Auswertungstechnik zurückgeführt werden: die Erreichbarkeitsanalyse von Netzmodellen. Aufgrund dieses Integrationsvermögens hat das Petrinetz-Konzept zunehmend als ein Referenzkonzept für die Modellierung komplexer Systeme Beachtung gefunden. Dabei steht die Absicht im Vordergrund, die Terminologie und das weitreichende theoretische Erkenntnispotential des Petrinetz-Konzepts als eine Referenzbasis auszuzeichnen, an der andere Modellierungskonzepte für nebenläufige Prozesse und Systeme gemessen werden. Vgl. BAER, J. (1977), S. 395; ELLIS, C.J. (1979), S. 9; HACKMANN (1981), S. 372. Dieser Referenzcharakter des Petrinetz-Konzepts wird dadurch unterstrichen, daß es schon herangezogen wurde, um die Axiomatisierung *anderer*, von Petrinetzen unabhängiger Modellierungskonzepte zu unterstützen. So sind Bedingung/ Ereignis-Netze z.B. benutzt worden, um die axiomatische Basis eines algebraisch ausgerichteten Konzepts zu verdeutlichen, das der Modellierung von Systemen mit nebenläufigen Prozessen dient. Vgl. dazu WINKOWSKI (1982), S. 323 (Bedingung/Ereignis-Netze) i.V.m. S. 316ff. (axiomatische Basis).

Mitunter wird auch hervorgehoben, daß sich zahlreiche andere Modellierungskonzepte mit den Ausdrucksmitteln des Petrinetz-Konzepts wiedergeben lassen; vgl. HACKMANN (1981), S. 372; HACKMANN (1982), S. 21f. Eine besonders reichhaltige Aufstellung findet sich bei HACKMANN (1982), S. 21. Sie umfaßt Zustandsgraphen, Entscheidungstabellen, Netzpläne, Instanzenetze, SADT-Diagramme, NASSI-SHNEIDERMAN-Diagramme und JACKSON-Diagramme. Vgl. dazu auch die Erläuterung zur abstrakten Simulationsrelation. Dort wurde ausgeführt, daß sich Petrinetze zur Wiedergabe von Programmablaufplänen eignen. Des weiteren können Netzpläne durch Petrinetze repräsentiert werden. Auch darauf wurde schon eingegangen. Darüber hinaus lassen sich auch COSY-Programme (path expressions) als Petrinetze reformulieren. Ebenso können Vektor-Additions-Systeme (vector addition systems) und Vektor-Ersatz-Systeme (vector replacement systems) als Stelle/Transition-Netze ausgedrückt werden; vgl. BUDINAS (1989), S. 1393 (in bezug auf Vektor-Ersatz-Systeme).

Die Rückführung verschiedenartiger Modellierungsansätze auf Petrinetze unterstreicht nochmals die Eignung des Petrinetz-Konzepts, als ein Referenzkonzept ausgezeichnet zu werden. Sein einheitsstiftendes Fundament kann benutzt werden, um die verschiedenartigen Modellierungskonzepte untereinander anhand eines einheitlichen Standards zu vergleichen. Ebenso wird ein Erkenntnistransfer zwischen diesen Modellierungskonzepten unterstützt. Denn Einsichten, die anhand der Modellierungen eines Konzepts gewonnen wurden, lassen sich ohne Schwierigkeiten auf ein anderes Modellierungskonzept übertragen, indem die Konstrukte aus beiden Modellierungskonzepten auf die gemeinsam geteilten Ausdrucksmittel von Petrinetzen reduziert werden. Aus diesem Blickwinkel erweist sich das Petrinetz-Konzept nicht nur als ein Referenzkonzept, sondern ebenso als eine erkenntnisvermittelnde Schnittstelle zwischen Modellierungskonzepten. Ebenso läßt sich an eine methodische Vereinheitlichung von Modellierungskonzepten denken; vgl. HACKMANN (1982), S. 86. Dabei kann von der Vorstellung ausgegangen werden, die Methoden der betrachteten Konzepte in eine umfassende Methodensammlung für das Petrinetz-Konzept einzubetten. Auf diese Weise lassen sich Reibungsverluste, die andernfalls beim Übergang zwischen verschiedenen Modellierungs-

konzepten drohen, vermeiden; vgl. HACKMANN (1982), S. 22. Allerdings steht diesem Ansinnen das Argument entgegen, daß eine solche Methodenvereinheitlichung ebenso bedeuten kann, auf die methodischen Spezialisierungsvorteile der einzelnen Modellierungskonzepte verzichten zu müssen. Darüber hinaus ist der programmatische Anspruch von HACKMANN, eine Methodenvereinheitlichung verschiedenartiger Modellierungskonzepte auf der Basis des Petrinetz-Konzepts durchzuführen, bislang nicht eingelöst worden. Dennoch bleibt er aus der Perspektive der Integrationsqualität des Petrinetz-Konzepts ein interessanter Ansatz.

3) Der konzeptionelle Schnittstellencharakter liegt auch den Erläuterungen aus der voranstehenden Anmerkung zugrunde, in denen die einheitsstiftende Integrationsqualität des Petrinetz-Konzepts angesprochen wurde.

4) Ausgenommen werden jene Konzepte, die zwar zum formalen Fundament des Petrinetz-Konzepts gehören, jedoch keine unmittelbare Einbindungschancen in die Konstruktion oder Auswertung von Netzmodellen erkennen lassen. Dazu zählt vor allem die Kategorientheorie. Sie ist derart abstrakt formuliert, daß ihr unmittelbarer Modellierungsbeitrag nicht auszumachen ist. Ebenso wenig steuern Mengen- und Relationentheorie unmittelbare Modellierungsleistungen bei. Gleiches gilt für die Topologie, die Automatentheorie und die Theorie formaler Sprachen. Darüber hinaus wird im folgenden die Integration der PRESBURGER-Arithmetik nicht explizit aufgeführt. Zwar wird diese einfache Arithmetikvariante stets herangezogen, um Anzahlen von Markenkopien auf Stellen vor und nach dem Schalten von Transitionen zu ermitteln. Aber diese Integration arithmetischer Berechnungen stellt einen derart trivialen Sachverhalt dar, daß der Verf. darauf verzichtet, sie als besondere Integrationsleistung des Petrinetz-Konzepts herauszustellen. Darüber hinaus ließe sich bestreiten, daß überhaupt von einer Integration der PRESBURGER-Arithmetik gesprochen werden darf. Denn die Berechnungen der von Anzahlen von Markenkopien gehört notwendig zu jedem Netzmodell mit einer wohldefinierten Dynamik. Daher könnte der Standpunkt vertreten werden, das arithmetische Berechnungsvermögen stelle von vornherein einen Netzbestandteil dar. Folglich bestehe keine Möglichkeit, ihn noch nachträglich zu integrieren. Der Verf. verzichtet darauf, sich mit diesem Einwand näher auseinanderzusetzen, weil er die PRESBURGER-Arithmetik ohnehin nicht in den Katalog der Integrationskandidaten aufnimmt.

Ebenso unbeachtet bleiben die lineare Algebra und die Theorie der stochastischen MARKOV-Systeme. Zwar spielt die lineare Algebra für die Ermittlung von Netzinvarianten eine herausragende Rolle. Gleiches gilt für die MARKOV-Theorie als mathematisches Fundament der Auswertung von Stochastischen Petrinetzen. Aber in dieser Arbeit wurde weder der Invariantenanalyse von Netzmodellen noch der Klasse Stochastischer Netze größere Beachtung geschenkt.

5) Weitere konzeptionelle Fremdleistungen stellen das Berechnungsvermögen von PRESBURGER-Arithmetik und linearer Algebra sowie die Auswertungstheorie für stochastische MARKOV-Systeme dar. Aber es wurde schon kurz zuvor erwähnt, daß diese Aspekte hier nicht als wesentliche Beiträge zur Integrationsqualität des Petrinetz-Konzepts gewürdigt werden.

6) Die Vielfalt dieser Einbindungsmöglichkeiten läßt einen bemerkenswerten Beitrag zur kohärentistischen Erkenntnisposition erkennen. Aus dieser Perspektive verhalten sich Petrinetze als ein Kohärenzvermittelndes Medium: Mit ihrer Hilfe werden die eingebundenen Fremdleistungen anderer Konzepte mit den Eigenleistungen des Petrinetz-Konzepts zu einem kohärenten Ganzen integriert.

7) Vgl. allgemein zur Einbindung von Resultaten der KI-Forschung in das Konzept der Petrinetze PASSINO (1988a), S. 626ff.; SILVA, M. (1990b); VON MARTIAL (1991a), S. 313ff., insbesondere S. 322f.

8) Das Attribut "allgemein" dient hier nur Abgrenzung gegenüber der KI-Forschung als spezieller Teildisziplin der Informatik.

9) Vgl. den Hinweis auf die Möglichkeit, nonlineare Arbeitspläne als Datenflußautomaten zu interpretieren.

10) Die Integrationsqualität des Petrinetz-Konzepts wird selten als solche hervorgehoben. Zu den wenigen Ausnahmen zählt THOME, R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 5. Darüber hinaus wird Integrationsqualität des öfteren auf indirekte Weise gewürdigt.

Z.B. hat ROSENSTENGEL (1983) einen interessanten Ansatz skizziert, OR-Programme mit Petrinetzen zu kombinieren. Er geht von dem Problem aus, daß OR-Programme für die Modellierung von Produktionssystemen oftmals unhandlich groß werden. Dies liegt in der extremen Koeffizienten- und Variablenanzahl begründet, die für die Beschreibung realer Produktionssysteme zumeist erforderlich sind. Für die Bearbeitung einzelner Realprobleme werden jedoch häufig nur eng begrenzte Ausschnitte aus dem Gesamtmodell eines Produktionssystems benötigt. Dies trifft z.B. bei den hier interessierenden Prozeßkoordinierungen auf die Einplanung eines Eilauftrags zu, dessen Abwicklung nur einige wenige Bearbeitungsstationen in Anspruch nimmt. Zusätzlich wird eine geringe Auslastung des Produktionssystems unterstellt. Daher lassen sich Fernwirkungen verdrängter Produktionsaufträge, die auf andere Bearbeitungsstationen übergreifen können, vernachlässigen. Unter diesen Voraussetzungen ist es möglich, die Abwicklung des Eilauftrags innerhalb eines kleinen Teilmodells des gesamten Produktionssystems einzuplanen. Um solche Planungssituationen effizient zu handhaben, kann ein Petrinetz herangezogen werden. Mit seiner Hilfe lassen sich für unterschiedliche Planungssituationen diejenigen Koeffizienten und Variablen eines OR-Programms fest-

legen, die für die Lösung der situationsspezifischen Realprobleme erforderlich sind. Wenn eine der antizipierten Planungssituationen tatsächlich eintritt, wird anhand dieser Festlegungen ein kompaktes, situations- und problemgerecht reduziertes OR-Programm generiert. Es enthält nur noch jenen Ausschnitt aus dem früheren umfassenden OR-Programm für das gesamte Produktionssystem, der für die Bearbeitung des vorliegenden Realproblems benötigt wird. Auf diese Weise erhält das zugrundeliegende Petrinetz die Qualität eines Modellgenerators. Es erzeugt situations- und problemspezifische Modelle von Produktionssystemausschnitten auf der Basis von OR-Programmen. Allerdings ist diese Integrationsidee ROSENSTENGEL's bis heute nicht konkretisiert worden. Eine konzeptionelle Parallele wurde jedoch schon vor längerer Zeit auf dem Gebiet der Simulationsmodelle verwirklicht. Es handelt sich um einen Generator für situations- und problemspezifische Ablaufplanungsmodelle, die durch Modellsimulation ausgewertet werden sollen. Er wurde im Rahmen des Projekts SIRE (für: Generatorsystem zur Simulation von Reihenfolgeproblemen) entwickelt; vgl. ELLINGER (1977b), S. 422ff.; ELLINGER (1978c), S. 18ff.; ELLINGER (1978d), S. 43ff.; ELLINGER (1979), S. 35ff.

Eine andere Facette der Integrationsqualität von Petrinetzen erstreckt sich auf die Daten- und Kontrollstrukturen Automatischer Informationsverarbeitungssysteme. Sie spielt im Rahmen der Informatik eine beachtenswerte Rolle. Aufgrund der produktionswirtschaftlichen Thematik dieser Ausarbeitung wird sie aber hier nur am Rande erwähnt. Das Petrinetz-Konzept gestattet, die Daten- und Kontrollstrukturen von Automatischen Informationsverarbeitungssystemen in einem homogenen Systemmodell zu repräsentieren. Dabei lassen sich vor allem die Schaltvorschriften von Transitionen benutzen, um die Kontrollstruktur eines Systems wiederzugeben. Daneben fließt in die Modellierung der Systemkontrolle auch der topologische, von den Stellen vermittelte Zusammenhang zwischen den Transitionen ein. Die Datenstruktur wird dagegen durch Attributmarken und ihre Attributausprägungen erfaßt. Dabei spielt vor allem die Attributstruktur der Marken eine herausragende Rolle. Diese Integration von Daten- und Kontrollstrukturen in einem gemeinsamen Netzmodell ist insofern beachtenswert, als bei der Modellierung Automatischer Informationsverarbeitungssysteme im allgemeinen unterschiedliche Konzepte angewandt werden, um einerseits die Daten- und andererseits die Kontrollstrukturen zu repräsentieren. Dadurch entstehen oftmals Schwierigkeiten bei der Aufgabe, die verschiedenartigen Teilmodelle aufeinander abzustimmen; vgl. NOE (1975a), S. 4. Diese Schnittstellenproblematik entfällt bei der Verwendung von Petrinetzen.

Allerdings ist zu beachten, daß die integrierte Modellierung von Daten- und Kontrollstrukturen erst dann gelingt, wenn strukturierte Attributmarken zur Verfügung stehen. Daher kommt dieser Aspekt der Integrationsqualität erst den Synthetischen Kernnetzen und den Erweiterten Synthetischen Netzen zu. Stelle/Transition-Netze eignen sich dagegen nur für die Modellierung von Kontrollstrukturen. Denn eine unstrukturierte Basismarke, die für Stelle/Transition-Netze definiert ist, reicht für die Repräsentation von Datenstrukturen nicht aus. Dieser Mangel könnte manche Autoren, die vermutlich Petrinetze mit Stelle/Transition-Netzen gleichsetzen, zu der Ansicht veranlaßt haben, Petrinetze eignen sich weder für die Modellierung von Datenstrukturen noch für die datenabhängige Prozeßkoordination. Vgl. dazu die Einlassungen bei BERNSTEIN (1973), S. 53; SYMONS (1980b), S. 29; GENRICH (1982b), S. 1. Etwas vorsichtiger äußert sich MAYER, U. (1981), S. 3, der auf die Notwendigkeit hinweist, das Petrinetz-Konzept hinsichtlich der Modellierung von Datenstrukturen zu erweitern. Die vorgenannten Quellen übersehen aber, daß für Höhere Netze - wie z.B. Synthetische Netze - keine Schwierigkeiten bestehen, die zuvor erwähnten, datenbezogenen Modellierungs- und Koordinierungsaufgaben zu erfüllen. Dazu reichen ihre Attributmarken und die entsprechend erweiterten Schaltregeln vollkommen aus. Zwei Beispiele lassen sich zur Verdeutlichung anführen. Erstens wird auf die Möglichkeit hingewiesen, daß sich Werkstücke, die zu einem Produktionsauftrag gehören, selbständig durch ein Produktionssystem hindurchsteuern. Dabei stellen die Kopien der Werkstückmarke alle Informationen (Daten) zur Verfügung, die für die Koordinierung des Werkstückflusses erforderlich sind. Jede Werkstückmarkenkopie läßt sich dabei als ein Datentupel auffassen, das beeinflusst, auf welche Weise der Werkstückfluß koordiniert wird. Es handelt sich daher um eine typische datenabhängige Prozeßkoordination. Zweitens können mit Petrinetzen Datenflußautomaten modelliert werden.

Zur Integrationsqualität des Petrinetz-Konzepts trägt auch bei, daß es die meisten derjenigen Formalismen, die im Bereich der KI-Forschung für die Wissensrepräsentation bevorzugt werden, abzudecken vermag. Dies wird von FIDELAK (1988b), S. 8, in bezug auf "Produktionssysteme, Aussagen- und Prädikatenlogik, und objektorientierte Programmierung" besonders gewürdigt (Zeichensetzung entsprechend dem Original). Die Wiedergabe von Produktionsregel- und von prädikatenlogischen Formelsystemen wurde in dieser Arbeit ausführlich behandelt. Hinzu kommt noch die Möglichkeit, semantische Netzwerke durch Petrinetze zu repräsentieren. Eine einfache Variante wurde in der Gestalt von terminologischen Netzen mehrfach verwendet. "Objekte", die im Zentrum der objektorientierten Programmierung stehen, werden zwar nicht unmittelbar durch entsprechende Netzkonstrukte abgedeckt. Aber der konzeptionelle Ansatz der objektorientierten Programmierung, in ihren "Objekten" Datenstrukturen und datenverarbeitende Operationen miteinander zu kombinieren, läßt sich auch in das Petrinetz-Konzept aufnehmen. Dies wird besonders deutlich, wenn Petrinetze - wie die hier eingeführten Synthetische Netze - über dem Fundament algebraischer Signaturen errichtet werden. Vgl. dazu den Hinweis auf die konzeptionelle Verwandtschaft mit abstrakten Datentypen. In ihnen liegt eine konsequent verwirklichte Kombination aus Datenstrukturen und datenverarbeitenden Operationen vor.

11) Vgl. zum folgenden auch die präzise Unterscheidung von ELMAGHRABY (1977), S. 494: "Graphical techniques have always been utilized ... to represent systems or abstract notions. We wish to draw a sharp distinction between

graphical representations which are solely 'visual aids' and graphical representations that entail exact mathematical relationships among components and for which algebras exist for analysis and synthesis." Am Rande wird darauf hingewiesen, daß die geforderte *algebraische* Basis, die ELMAGHRABY vermutlich mit einfachen arithmetischen Rechenvorschriften verwechselt, durch Petrinetze tatsächlich eingelöst werden kann. Dies wurde anhand der Synthetischen Netzen in dieser Arbeit ausführlich belegt.

12) Hierzu gehören z.B. die Fakten als logisch basiertes Gestaltungsmittel sowie Erreichbarkeits- und Invariantenanalysen als mathematische Untersuchungsinstrumente.

13) Solche Verknüpfungen werden mitunter genutzt, um andere Modellierungskonzepte mit Hilfe des Petrinetz-Konzepts analytisch anzureichern. Dabei werden zunächst Modellentwürfe, die in der Sprache eines Fremdkonzepts formuliert wurden, in äquivalente Netzmodelle übersetzt. Danach wird die breite Palette netzgestützter Analyseinstrumente eingesetzt, um die Netzmodelle präzise zu untersuchen. Diese Vorgehensweise schildert z.B. PINCI (1990b): Entwürfe für Informationssysteme, die als SADT-Diagramme vorliegen, werden auf der ersten Stufe automatisch in äquivalente Gefärbte Netze übersetzt. Auf der zweiten Stufe werden die Netzmodelle der modellierten Informationssysteme - wiederum automatengestützt - mit formalen Analyseinstrumenten untersucht. Auf diese Weise gelingt es, das SADT-Konzept, das weitgehend auf die Funktion eines graphischen Beschreibungskonzepts beschränkt ist, um bemerkenswerte analytische Fähigkeiten zu erweitern. Grundlage solcher Konzeptbereicherungen ist die Möglichkeit, Modellentwürfe anderer Modellierungskonzepte in äquivalente Netzmodelle zu transformieren.

14) Doch ist auf den feinen Unterschied hinzuweisen, daß den Optimierungskalkülen als einseitig mathematisch ausgerichteten Konzepten eine entsprechend ausgereifte logische Fundierung fehlt. Dies äußert sich in den erheblichen Schwierigkeiten, in solchen Modellen logische Sachverhalte kompakt abzubilden.

15) Allenfalls kann der Auswertung von STEOR-Netzplänen ein tieferes mathematisches Fundament zuerkannt werden. Es handelt sich um die Theorie der Auswertung von MARKOV-Systemen. Dies trifft jedoch einerseits nur auf eine aus einem breiten Spektrum von Netzplanarten zu. Andererseits wirkt die Auswertungstheorie der MARKOV-Systeme bescheiden angesichts der weitreichenden logisch-mathematischen Grundlagen des Petrinetz-Konzepts, die an früherer Stelle angesprochen wurden. Bemerkenswert dabei ist, daß auch die MARKOV-Systeme von den mathematischen Fundamenten des Petrinetz-Konzepts umschlossen werden. Dagegen wird z.B. die "algebraische Basis" von Petrinetzen, die in Anlehnung an ELMAGHRABY in einer früheren Anmerkung erwähnt wurde, seitens der Netzplantechnik in keiner Weise erschlossen.

16) Dieser Mangel von analytischen Optimierungskalkülen klingt auch an bei WHITEHOUSE (1973), S. 9. Simulationssprachen spielen hinsichtlich ihrer graphischen Visualisierungsoptionen eine ambivalente Rolle. Einerseits existieren zahlreiche Simulationssprachen, die genau so wie analytische Optimierungskalküle keine graphische Unterstützung zulassen. Andererseits wurden aber ebenso Simulationssprachen entwickelt, die über eine graphische Animationskomponente verfügen. Dazu gehört z.B. die Simulationssprache SIMAN. Ebenso existieren Simulationssprachen, die unmittelbar mit einer Netzplantechnik verknüpft sind. Dies trifft z.B. auf die Simulationssprache GERTS zu, die bereits als Fortentwicklung von GERT-Netzplänen erwähnt wurde. Solche netzplanbasierten Simulationssprachen besitzen von vornherein die graphische Anschaulichkeit ihrer zugrundeliegenden Netzplantechnik.

17) Vgl. TAYLOR, B. (1982), S. 846 u. 853, in bezug auf visualisierte Graphen, die jedoch nicht zum Petrinetz-Konzept gehören.

18) Die nachfolgende Argumentation findet sich in ähnlicher Weise bei SCHUMACHER (1978), S. 1f.

19) Darüber hinaus wurde die gleiche Simulationsfähigkeit in bezug auf Programmablaufpläne skizziert.

20) Vgl. dazu die exemplarischen Hinweise auf Spezialisierungsvorteile der Netzplantechnik.

21) Beispielsweise erscheint es abwegig, mit Programmablaufplänen Projekte modellieren zu wollen, die gewöhnlich mit Hilfe der Netzplantechnik repräsentiert werden. So scheidet die Modellierung nebenläufiger Vorgangsausführungen, die in Netzplänen überhaupt keine Schwierigkeiten bereitet, in konventionellen Programmablaufplänen aus. Dies liegt an der einseitigen Spezialisierung dieser Programmablaufpläne auf sequentielle Programmausführungen. Vgl. dazu auch ZUSE, K. (1982), S. 33. Ebenso wenig läßt sich vorstellen, kombinatorische Optimierungsprobleme mit Netzplänen zu modellieren, obgleich diese Repräsentationsaufgabe mit OR-Programmen gut erfüllt werden kann.

22) Diese Referenzqualität des Petrinetz-Konzepts wurde schon ausführlicher gewürdigt.

9.2.2.3.12 Fruchtbarkeit

Unter der Fruchtbarkeit¹⁾ eines Modellierungskonzepts werden alle neuartigen Beiträge zusammengefaßt, die es zur Erfüllung einer vorgegebenen Modellierungsaufgabe leistet²⁾. Die Neuartigkeit der Beiträge wird dabei nicht im Sinne eines absoluten Novums verstanden. Vielmehr wird die Neuartigkeit in Relation zu den Beiträgen jener Konzepte beurteilt, die bislang bei der Bearbeitung derselben Modellierungsaufgabe die größte Beachtung genießen³⁾. Im Rahmen dieser Arbeit interessierte die Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen. Als alternative Modellierungskonzepte wurden für diese Domäne die Netzplantechnik und der Programmansatz des Operations Research exemplarisch herausgestellt⁴⁾. Die abschließenden Anmerkungen zur Fruchtbarkeit des Petrinetz-Konzepts beziehen sich ausschließlich auf diesen produktionswirtschaftlichen Hintergrund⁵⁾.

Die befruchtenden Impulse des Petrinetz-Konzepts beruhen zu einem Großteil auf seiner bemerkenswerten Integrationsqualität. Denn die meisten Leistungen anderer Konzepte, deren Einbindung in das Petrinetz-Konzept kurz zuvor herausgestellt wurde, erweisen sich gegenüber konventionellen Modellierungen von Prozeßkoordinierungen als neuartig. Darüber hinaus hat aber auch die Auseinandersetzung mit Eigenarten des Petrinetz-Konzepts zu neuartigen Einsichten geführt⁶⁾.

Auf die Neuerungen, die das Petrinetz-Konzept für die Konstruktion und Auswertung von Koordinierungsmodellen anbietet, wurde im Verlauf dieser Arbeit schon mehrfach ausführlich eingegangen⁷⁾. Daher reicht es aus, in der nachfolgenden Übersicht⁸⁾ die wichtigsten⁹⁾ Befruchtungsaspekte stichwortartig in Erinnerung zu rufen¹⁰⁾:

- Für die Repräsentation interessanter Koordinierungsaspekte werden neuartige Ausdrucksmittel erschlossen. Sie schöpfen den Formulierungsreichtum einer arithmetisch und algebraisch angereicherten, sortierten Prädikatenlogik 1. Stufe aus. Die neuen Ausdrucksqualitäten erstrecken sich insbesondere auf:
 - ☞ prädikatenlogische Formeln, die mit der Hilfe von Junktoren und Quantoren beliebig komplex zusammengesetzt sein können;
 - ☞ Sortierungen von Formel- und Funktionsargumenten;
 - ☞ explizite Repräsentation von Formelgültigkeiten durch Fakten.

Daneben wird der konventionelle Mengenbegriff um eine ganzzahlige Ausdruckskomponente erweitert. Es resultiert das Konzept der Multimengen.

- Es wird ein Bewußtsein für die Modellierungsbedeutung von TURING-Automaten geweckt. Entsprechende Ausdrucksmittel für die Modellkonstruktion stellen das allgemeine Ausdrucksvermögen von TURING-Automaten bereit.
- Ein allgemeiner¹¹⁾ Prozeßbegriff wird präzise definiert¹²⁾. In konventionellen Modellierungskonzepten wird der Prozeßbegriff entweder überhaupt nicht thematisiert oder aber nur auf intuitive Weise verwendet.
- Die oftmals übliche kinetische Beschreibung von Prozessen wird durch eine dynamische Prozeßdarstellung auf kausalem Fundament abgelöst.
- Parallelität und kausale Unabhängigkeit werden durch das Konzept nebenläufiger Ereignisse und nebenläufiger Prozeßausführungen systematisch entfaltet.
- Artifizielle Sequentialisierungen von Prozeßausführungen lassen sich entdecken und vermeiden.

- ❑ Animationstechniken der Automatischen Informationsverarbeitung können für die anschauliche Visualisierung von Prozeßabläufen benutzt werden.
- ❑ Neuartige Modelleigenschaften werden erschlossen, die in konventionellen Koordinierungsmodellen bislang keine oder nur geringfügige Berücksichtigung gefunden haben¹³⁾. Dazu gehören vor allem¹⁴⁾:
 - ☞ Blockierungen von Prozeßausführungen, die als Folge komplexer Abhängigkeiten beim Zugriff auf gemeinsam benötigte, aber knappe Ressourcen auftreten können (Deadlocks)¹⁵⁾;
 - ☞ überflüssige Modellkomponenten, die niemals aktiv werden können (tote Transitionen);
 - ☞ unerwünschte Endlosschleifen (Livelocks);
 - ☞ Endlichkeit der Koordinierungsprozesse (Terminieren).
- ❑ Die Analyse der Promptheit von Netzmodellen gestattet sogar, in einer groben Annäherung zu untersuchen, ob eine Prozeßkoordinierung unter Realzeitbedingungen möglich ist.
- ❑ Koordinierungsmodelle werden um einen strengen Nachweis ihrer logischen Widerspruchsfreiheit bereichert.
- ❑ Einen schwächeren Nachweis der Koordinierungskonsistenz gestattet die Beachtung von Integritätsbedingungen.
- ❑ Das Treffen lokaler Koordinierungsentscheidungen, insbesondere nach Maßgabe von heuristischen Entscheidungsregeln, wird auf zweifache Weise unterstützt: durch die charakteristische Lokalität des Petrinetz-Konzepts und durch die regelartige Behandlung von Transitionen in operationalen Netzmodellen. Der Regelcharakter von Transitionen läßt sich noch ausbauen, indem Produktionsregeln in die Schaltvorschriften der Transitionen eingebunden werden.
- ❑ Eine prinzipielle Beschränkung für das Bewältigen von Entscheidungsproblemen, die an Koordinierungsmodelle herangetragen werden können, wird als prädikatenlogische Semi-Entscheidbarkeit identifiziert.
- ❑ Beiträge der Graphentheorie und KI-Forschung zur Lösungssuche in graphischen Problemrepräsentationen werden erschlossen. Beispielsweise lassen sich "intelligente" Suchtechniken einsetzen, um die Erforschung des Erreichbarkeitsgraphen eines Netzmodells zu beschleunigen.
- ❑ Das Vorurteil, Optimierungsrechnungen erforderten analytische Modellierungsansätze, wird widerlegt. Statt dessen wird aufgezeigt, daß sich optimale Prozesse durch das simulative Auswerten spezieller Netzmodelle ermitteln lassen. Zugleich wird dadurch deutlich, daß die übliche Gegenüberstellung von analytischen und simulativen Konzepten nicht zutrifft. Denn mit der Hilfe von Petrinetzen lassen sich sowohl analytische als auch simulative Ansätze in einem homogenen Auswertungskonzept für die Erreichbarkeitsgraphen von Netzmodellen zusammenführen.
- ❑ Das Inferenzpotential der logischen Programmierung wird für die Auswertung von Netzmodellen zugänglich gemacht. Dies betrifft sowohl das allgemeine Resolutions- und Unifizierungskonzept als auch die spezielle Implementierungssprache PROLOG.
- ❑ Beiträge der KI-Forschung zum verteilten Problemlösen und der allgemeinen Informatik zur Gestaltung von "parallelen" Automatenarchitekturen können in die Gestaltung und Implementierung von nebenläufigen Modellauswertungen eingebunden werden¹⁶⁾. Dazu gehört z.B. die nebenläufige Konstruktion von Erreichbarkeitsgraphen, bei der mehrere Agenten auf eine gemeinsame Agenda zugreifen. Ebenso kommen Maschinen- und Auftragsagenten

in Betracht, die für das verteilte Lösen von Koordinierungsproblemen in einem Kontrakt-
netzwerk miteinander kommunizieren.

- ❑ Für störungsbedingte Anpassungsplanungen läßt sich von der Erforschung Künstlicher Intelligenz das Konzept begründungsverwaltender Systeme übernehmen. Der Anpassungsspielraum, der im Falle unvorhergesehener Produktionsstörungen offensteht, wird durch den Verzicht auf artifizielle Sequentialisierungen vergrößert.
- ❑ Es ist möglich, in einem Koordinierungsmodell unmittelbar auszudrücken, wie sich das subjektive Wissen, das ein Modellierungsträger über die zu koordinierenden Produktionsprozesse besitzt, im Zeitablauf verändert.

Die vorgenannten Einzelaspekte lassen sich aus einer übergeordneten Perspektive zusammenführen: Netzmodelle fördern durch die Vielfalt ihrer konzeptionellen Neuerungen ein vertieftes Verständnis für die modellierten Realprobleme¹⁷⁾. Sie befruchten das Problemverständnis auch dann noch, wenn aufgrund der erheblichen Effizienzmängel bei der Modellauswertung keine konkreten Problemlösungen gewonnen werden können¹⁸⁾. Dies betrifft nicht nur Einsichten in die statische oder dynamische Struktur eines modellierten Produktionssystems. Ebenso werden Erkenntnisse über das Systemverhalten unterstützt. Sie erstrecken sich vor allem auf Prozeßausführungen und ihre Beeinflussung durch Koordinierungsentscheidungen. Darüber hinaus ermöglicht die Visualisierung von graphisch repräsentierten Netzmodellen ein fruchtbares Zusammenwirken zwischen menschlichen Kognitions- und automatischen Verarbeitungsleistungen¹⁹⁾.

Das Vorhergesagte rechtfertigt, dem Petrinetz-Konzept insgesamt eine ausgezeichnete Erfüllung des Fruchtbarkeitskriteriums zuzugestehen. Dabei werden nahezu alle befruchtenden Aspekte durch das Kernkonzept Synthetischer Netze erschlossen. Bei Erweiterten Synthetischen Netzen kommt lediglich der Gesichtspunkt der besonders großen TURING-Ausdrucksmächtigkeit hinzu²⁰⁾. Stelle/Transition-Netze gestatten dagegen nur einen stark eingeschränkten Zugang zu den vorgenannten Befruchtungspotentialen. Dies liegt in ihrer geringen Ausdruckskraft begründet. Insbesondere die meisten²¹⁾ Befruchtungen seitens der KI-Forschung bleiben aus. Denn sie setzen in der Regel ein prädikatenlogisch-algebraisches Ausdrucksvermögen voraus. Allerdings erweist sich die Fruchtbarkeit von Stelle/Transition-Netzen immer noch als recht beachtlich. So treffen alle prozeßbezogenen Befruchtungsaspekte auch auf Stelle/Transition-Netze zu. Dies gilt vor allem für die Existenz einer präzisen Prozeßdefinition, für das kausale Prozeßfundament und für die Nebenläufigkeit von Prozessausführungen. Ebenso bleibt die Untersuchung der o.a. neuartigen Eigenschaften von Koordinierungsmodellen erhalten. Gleiches gilt für die Lösungssuche in graphischen Problemrepräsentationen.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Die Fruchtbarkeit wird oftmals zur Beurteilung von Konstrukten herangezogen. Dabei kann es sich um Konstrukte beliebiger Art handeln, wie z.B. um ganze Modellierungskonzepte oder nur einzelne Begriffsbildungen. Dies schließt auch die mittelbare Forderung nach Fruchtbarkeit durch den Vorwurf der Unfruchtbarkeit ein. Vgl. zur häufigen Verwendung des Fruchtbarkeitskriteriums POPPER (1935a), S. 24; KOSIOL (1958), S. 9; POPPER (1965b), S. 266f. u. 272; WILD (1966), S. 67; POPPER (1966), S. 12 u. 27; KÖHLER, R. (1966), S. 43; FISCHER-WINKELMANN (1971), S. 19; SCHANZ (1973), S. 139 u. 148; STÄHLIN (1973), S. 61; OPP, K. (1976), S. 304f., 371, 376 u. 417; HERRMANN, T. (1976), S. 35f., sowie - als Anregungs- und Überraschungsgehalt - S. 103f. u. 113; WOSSIDLO (1976), S. 465; KUBICEK (1977), S. 16ff.; WOLLNIK (1977), S. 40ff.; CHMIELEWICZ (1979), S. 40 u. 93; RESCHER (1980a), S. 14; PUTNAM, H. (1982a), S. 262; SCHMIDT, R.H. (1983), S. 512, 515 u. 523f.; ULRICH, W. (1983), S. 156; HUBER, G.P. (1983), S. 576; POPPER (1984b), S. 1; CHALMERS (1986), S. 147ff.; SCHOPMAN (1986), S. 59ff.; HABERMAS (1986), S. 327; KUHLMANN (1987), S. 92, 99f. u. 102f.; ALBERT, H. (1987), S. 117 u. 161; KÜPPER, H. (1988), S. 412; KLEIN, S. (1989), S. 54; vgl. ebenso die frühere Anmerkung zur exogenen Rechtfertigung eines Begriffszusammenhangs durch seine Erkenntnisbefruchtung.

2) Dabei wird grundsätzlich unterstellt, daß die neuartigen Beiträge eine Bereicherung im positiven Sinne darstellen: Sie erlauben, eine Modellierungsaufgabe so zu behandeln, daß sich mindestens eines der Ziele des Modellierungsträgers besser als zuvor erfüllen läßt. Zugleich wird unterstellt, daß die Erfüllung anderer Modellierungsziele dadurch nicht beeinträchtigt wird. Es läßt sich zwar durchaus vorstellen, daß konzeptionelle "Bereicherungen" zu negativen Befruchtungseffekten führen. Dies hat SCHOPMAN (1986), S. 60ff., ausführlicher erörtert. Der Verf. sieht jedoch bei den Befruchtungsaspekten, die im folgenden für das Petrinetz-Konzept genannt werden, keine Gefahr, daß sie sich auf die Modellierung von produktionswirtschaftlichen Koordinierungsproblemen negativ auswirken könnten. Daher besteht kein Anlaß, die Präsupposition positiver Befruchtungswirkungen weiter zu vertiefen.

3) Das Kriterium der Fruchtbarkeit besitzt hier also einen doppelt bedingten Charakter. Erstens wird es auf eine vorgegebene Modellierungsaufgabe bezogen. Zweitens werden alternative, bisher vorherrschende Modellierungskonzepte als Vergleichsmaßstab herangezogen. Die Anwendungen dieser Modellierungskonzepte auf die hier betrachtete Modellierungsaufgabe werden im folgenden kurz als "konventionelle" Modellierungen von Prozeßkoordinierungen (oder ähnlich) angesprochen.

4) Auf eine systematische Bearbeitung der vorherrschenden alternativen Modellierungskonzepte wurde von vornherein verzichtet. Allerdings wurde im Zusammenhang mit Detailspekten auch auf weitere Modellierungskonzepte eingegangen. Dazu gehörten z.B. Warteschlangensysteme und Simulationssprachen.

5) Wenn dieser produktionswirtschaftliche Hintergrund verlassen wird, lassen sich auch andere Befruchtungsaspekte aufzeigen. Da dies jedoch über die Themenstellung der hier vorgelegten Ausarbeitung hinausweist, wird nur ein verdeutlichendes Beispiel angeführt. Es bezieht sich auf die Voraussetzung zahlreicher prädikatenlogischer Modellierungen, ausschließlich HORN-Klauseln zu verwenden. Darauf wurde schon aufmerksam gemacht. Der einfache Umgang mit HORN-Klauseln und ihre Implementierung in der Programmiersprache PROLOG sprechen zugunsten dieser Modellierungsweise. Allerdings wird dadurch in Kauf genommen, auf einen Teil der prädikatenlogischen Ausdruckskraft zu verzichten. Denn mit HORN-Klauseln lassen sich nicht alle prädikatenlogischen Formelsysteme wiedergeben. Mit der Hilfe von Synthetischen Netzen ist es aber möglich, zwei scheinbar unversöhnliche Aspekte zusammenzuführen: Deklarative Netzmodelle gestatten einerseits, den vollen prädikatenlogischen Formulierungsreichtum auszuschöpfen. Andererseits können sie dennoch mittels der Programmiersprache PROLOG auf HORN-Klausel-Basis implementiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, die automatengerechte Implementierung prädikatenlogischer Modellierungen durch die Einbeziehung von Nicht-HORN-Klauseln zu befruchten.

6) Dazu gehört vor allem die Erkenntnis, daß strenge Optimierungsrechnungen keineswegs auf analytische Modellierungskonzepte beschränkt sind, sondern sich ebenso auf simulative Weise ausführen lassen.

7) Um Mißverständnisse zu vermeiden, wird betont, daß die angesprochenen Befruchtungsleistungen stets auf die *Neuartigkeit* der betroffenen Konstrukte verweisen. Dabei wird die Neuartigkeit auf konventionelle produktionswirtschaftliche Koordinierungsmodelle bezogen. Dies schließt keineswegs aus, daß die gleichen Konstrukte aus *anderer* Perspektive schon an früherer Stelle behandelt wurden. Beispielsweise wurde bereits erwähnt, daß Synthetische Netze aufgrund ihres prädikatenlogischen Ausdrucksvermögens eine große allgemeine Modellierungsfähigkeit besitzen. Hier geht es aber nicht mehr um die graduelle Beurteilung einer mehr oder minder großen Ausdrucksmächtigkeit. Statt dessen interessiert jetzt, daß prädikatenlogische Formeln ein *neuartiges* Ausdrucksmittel für die Konstruktion von Koordinierungsmodellen zur Verfügung stehen. Es kann weder in Netzplänen noch in OR-Programmen verwendet werden.

8) Die Übersicht bezieht sich zunächst auf befruchtende Beiträge zur Modellkonstruktion. Später werden Aspekte der Modellauswertung beleuchtet. In beiden Fällen wird von allgemeineren zu spezielleren Gesichtspunkten übergegangen.

9) Weniger bedeutsame Befruchtungsaspekte ließen sich ergänzen. Es wird aber darauf verzichtet, sie hier vollständig zu erfassen. Statt dessen wird nur kurz auf zwei verdeutlichende Beispiele eingegangen. Das erste erstreckt sich auf einen Beitrag zur Handlungstheorie. Betriebswirtschaftliche Anwendungen der Handlungstheorie bleiben in der Regel auf natürlichsprachliche Ausführungen beschränkt. Vgl. dazu die Quellen, die in einer früheren Anmerkung zum handlungstheoretischen Paradigma angeführt wurden. Das Petrinetz-Konzept bietet dagegen einen Ansatz, der handlungstheoretische Problemkonzeptualisierungen um eine präzise, formalsprachlich verfaßte Handlungslogik bereichert. In dieser Arbeit spielten handlungstheoretische Aspekte bei der Konzeptualisierung von produktionswirtschaftlichen Koordinierungsproblemen allerdings nur eine untergeordnete Rolle. Daher wird die handlungslogische Präzisierung nicht zu den "wichtigen" Befruchtungsaspekten gerechnet.

Ein zweites Beispiel betrifft die Netzplantechnik. Im Vordergrund steht die Modellierung von Entscheidungsalternativen in Netzplänen. An früherer Stelle wurde gezeigt, daß der suggestive Anspruch von "Entscheidungsnetzplänen", echte Auswahlentscheidungen zu repräsentieren, von den meisten Spielarten der Entscheidungsnetzpläne nicht erfüllt wird. Dieses Repräsentationsdefizit der Netzplantechnik ist bislang kaum beachtet worden. Es trat dagegen augenfällig in Erscheinung, als Netzpläne mit Petrinetzen, die eine vorzügliche Repräsentation von Entscheidungsalternativen gestatten, verglichen wurden. Daher hat die Auseinandersetzung mit dem Petrinetz-Konzept auf indirekte Weise dazu beigetragen, eine Modellierungsschwäche der Netzplantechnik klarer zu erkennen. Einen weiteren Beitrag zur Befruchtung der Netzplantechnik haben QUICHAUD und CHRETIENNE in QUICHAUD (1987), S. 308ff., vorgelegt. Dort wird eine Analysemöglichkeit für allgemeine GERT-Netzpläne aufgezeigt, die nicht auf den einfach auswertbaren Sonderfall der STEOR-Netzpläne beschränkt sind. Dabei wird versucht, allgemeine GERT-Netzpläne so lange zu vereinfachen, bis sich die reduzierten GERT-Netzpläne analytisch bewältigen lassen. Die erforderlichen Netzplanreduktionen beruhen u.a. auf Ideen, die im Rahmen des Petrinetz-Konzepts entwickelt worden sind; vgl. QUICHAUD (1987), S. 312ff. Auf diesen Ansatz wurde schon hingewiesen. Ebenso wurden weitere Beiträge, die sich um eine befruchtende Wechselwirkung zwischen Petrinetz-Konzept und Netzplantechnik bemühen, bereits erwähnt. In dieser Arbeit interessieren aber alternative Modellierungskonzepte für Koordinierungsprobleme - zu denen auch die Netzplantechnik gehört - nicht näher. Daher werden auch die zuvor skizzierten Befruchtungsaspekte nicht als "wichtig" eingestuft.

10) Hier schließt sich ein Argumentationskreis, der zu Beginn dieser Arbeit eröffnet wurde. Dort erfolgten stimulierende Vorgriffe auf die produktionswirtschaftliche Fruchtbarkeit des Petrinetz-Konzepts. Sie sollten eine nähere Auseinandersetzung mit dem Leistungspotential von Petrinetzen motivieren. Um eine schlichte Verdopplung von bereits vorgetragenen Argumenten zu vermeiden, nimmt sich der Verf. die Freiheit, die Argumentationsstruktur im folgenden leicht zu variieren.

11) Die Allgemeinheit erstreckt sich auf den Sachverhalt, daß sowohl sequentielle als auch nicht-sequentielle, im engeren Sinne nebenläufige Prozesse umschlossen werden.

12) Bemerkenswert ist, daß das Petrinetz-Konzept nicht nur eine präzise Definition von Prozessen bietet. Vielmehr konstituieren seine Schaltprozesse auch einen Angelpunkt, an dem eine charakteristische Selbstbezüglichkeit des Petrinetz-Konzepts anknüpft. Denn Schaltprozesse, die zunächst als alternierende Markierungs- und Schaltschrittfolgen in Netzen definiert sind, lassen sich ebenso als Netze sui generis darstellen. Dazu gehören einerseits die Geschehnisnetze, die als "Prozeßnetze" aus der schaltprozeßspezifischen Abwicklung eines "gewöhnlichen" Netzes hervorgehen. Andererseits ist es auch möglich, die Gesamtheit aller Schaltprozesse, die in einem Netz zulässig sind, als spezielles Erreichbarkeitsnetz darzustellen. Auf diese Option wurde zurückgegriffen, um für Netzmodelle optimale Schaltprozesse zu ermitteln.

13) Im Anschluß an RESCHER (1985b), S. 77 u. 85, kann von einer "erotischen Befruchtung" gesprochen werden. Mit dieser Kurzformel soll folgender Sachverhalt ausgedrückt werden: Der Wissenszuwachs, der aus der Auseinandersetzung mit dem Petrinetz-Konzept hervorgegangen ist, hat ein Bewußtsein für neuartige Fragestellungen geschaffen, die sich an Koordinierungsmodelle herantragen lassen. Vgl. dazu die ausführlichere Erörterung der "Fragendynamik" und ihrer Bedeutung für die Entwicklung von Wissenschaften bei RESCHER (1985b), S. 74ff., insbesondere S. 77 u. 87. Die erotische Befruchtungsqualität des Petrinetz-Konzepts läßt sich u.a. darauf zurückführen, daß dieses Modellierungskonzept weitgehend im Bereich der Informatik fern ab von produktionswirtschaftlichen Fragestellungen herangereift ist. Daher wurde die Konzeptentwicklung nicht von vorherrschenden Denkmustern produktionswirtschaftlicher Koordinierungsmodelle eingeengt. Statt dessen erwuchs das Petrinetz-Konzept aus den oftmals andersartigen Modellierungsbedürfnissen der Informatik. Die konzeptionellen Erfahrungen, die bei der Erfüllung jener Bedürfnisse gesammelt wurden, vermitteln heute horizonterweiternde Einsichten in die Prozeßkoordinierung bei komplexen Produktionssystemen. Diese Einsichten manifestieren sich in neuartigen Eigenschaften von Koordinierungsmodellen. Die Koordinierungsrelevanz dieser Modelleigenschaften blieb der produktionswirtschaftlichen Wahrnehmung von Koordinierungsproblemen bisher verborgen. Erst der "erotische Impuls" des Petrinetz-Konzepts öffnete den Zugang zu ihnen.

- 14) Vgl. zu weiteren Eigenschaften von Netzmodellen, die Ausführungen in Teilband 5.2. Mit der Ausnahme von Optimalität und - in weitaus geringerem Umfang - Robustheit werden sie bei konventionellen Modellierungen kaum jemals beachtet.
- 15) Dazu gehört nicht nur das Erkennen solcher Blockierungen. Hinzu kommt auch der Beweis, daß ein Netzmodell von allen Blockierungen frei ist (Deadlockfreiheit und Lebendigkeit).
- 16) Dies wurde anhand eines Algorithmus für die nebenläufige Konstruktion von Erreichbarkeitsgraphen exemplarisch, aber ausführlich demonstriert.
- 17) Vgl. MELDMAN (1971), S. 75; NOE (1971), S. 371; AGERWALA (1978a), S. 149; ROUCAIROL (1982a), S. 1; ROSENSTENGEL (1983); O.V. (1983c), S. 1; KIEBLER (o.J.), S. 7 u. 41.
Damit wird das Petrinetz-Konzept auch der allgemeinen Forderung nach Erkenntnistiefe gerecht. Sie findet sich z.B. bei POPPER (1972a), S. 34f. u. 39f.; POPPER (1984b), S. 205 u. 210ff.; ALBERT, H. (1987), S. 68, 96, 105ff., 147 u. 161.
Zwar erfolgt hier keine Präzisierung des Kriteriums "Erkenntnistiefe". Doch rechnet der Verf. mit keinem ernsthaften Widerspruch, wenn z.B. kausal fundierte Modellierungen von Produktionsprozessen gegenüber den sonst üblichen kinetischen Prozeßmodellierungen als tiefer eingestuft werden. Ebenso wird wohl kaum bestritten werden, daß Erkenntnisse über die Semi-Entscheidbarkeit von Modellierungen zu tiefreichenden Einsichten gehören, die bisher von produktionswirtschaftlichen Modellierungen noch nicht erschlossen wurden. Gleiches gilt für die Erkenntnis, daß es sich bei analytischen und simulativen Modellierungen keineswegs um strenge Gegensätze handelt.
- 18) In dieser Hinsicht trägt das Modellierungskonzept der Petrinetze einem Fortschrittsgedanken von KOCH, H. (1974), S. 340, Rechnung. Er verfißt die Ansicht, "daß wissenschaftlicher Fortschritt auch dann vorliegen kann (nicht muß), wenn neue Modelle entwickelt werden, die nicht unmittelbar anwendbar sind, jedoch den Praktiker zum Durchdenken neuer betrieblicher Zusammenhänge anregen ...".
- 19) Vgl. die Erläuterungen zur Interaktivität.
- 20) Zugleich geht dadurch die Bereicherung verloren, strenge Untersuchungen der prädikatenlogischen Widerspruchsfreiheit führen zu können. Denn die neuartigen Netzkonstrukte, die zur Erlangung der TURING-Mächtigkeit zugelassen werden müssen, verhindern die Anwendung jener Netztheoreme, die für die prädikatenlogischen Konsistenzbeweise erforderlich sind. Daher wird den Erweiterten Synthetischen Netzen keine größere Fruchtbarkeit als den Synthetischen Kernnetzen eingeräumt.
- 21) Ausgenommen sind die Beiträge der Künstlichen Intelligenz zur Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen. Sie lassen sich auch auf die Erreichbarkeitsgraphen von Stelle/Transition-Netzen anwenden.

9.3 Darstellung des Stärken/Schwächen-Profiles

Zuvor wurde das Petrinetz-Konzept aus den Perspektiven verschiedenartiger Beurteilungskriterien beleuchtet. Die dabei gesammelten Erkenntnisse werden abschließend in einer profilartigen Darstellung¹⁾ kondensiert. Es resultiert ein Stärken/Schwächen-Profil für das Petrinetz-Konzept. Dieses Beurteilungsprofil stellt die Erkenntnisse einander gegenüber, die auf konzeptendogene Weise über die relative Vorteilhaftigkeit von Stelle/Transition-Netzen, von Synthetischen Kernnetzen und von Erweiterten Synthetischen Netzen gewonnen wurden.

Das Ausmaß, in dem die Beurteilungskriterien durch die drei vorgenannten Netzklassen erfüllt werden, wurde in den voranstehenden Kapiteln ausführlicher dargelegt. Diese Erläuterungen werden nunmehr herangezogen, um die Netzklassen auf groben quasi-ordinalen²⁾ oder nominalen³⁾ Skalen anzuordnen⁴⁾. Die Erfüllung von Beurteilungskriterien, die quasi-ordinale Skalen befolgen, wird durch die fünf graduellen Ausprägungen "sehr hoch erfüllt", "hoch erfüllt", "mittelmäßig erfüllt", "niedrig erfüllt" und "sehr niedrig erfüllt" abgestuft⁵⁾. Für Beurteilungskriterien, die auf nominalen Skalen gemessen werden, kommen dagegen nur die beiden Ausprägungsalternativen "erfüllt" und "nicht erfüllt" in Betracht⁶⁾. Das Ausmaß der Kriterienerfüllung wird im Stärken/Schwächen-Profil der Abb. 218 bis 220, die sich am Ende dieses Kapitels finden, durch ein graphisches Symbol für jede beurteilte Netzklasse gekennzeichnet: Stelle/Transition-Netze werden durch das Symbol "O", Synthetische Kernnetze durch das Symbol "●" und Erweiterte Synthetische Netze durch das Symbol "■" vertreten.

Die Gesamtheit der Erfüllungsausmaße für alle Beurteilungskriterien stellt das intendierte Stärken/Schwächen-Profil des Petrinetz-Konzepts dar. Es erstreckt sich allerdings nur auf die hier betrachteten drei Netzklassen. Auf eine Verdichtung dieses multidimensionalen⁷⁾ Beurteilungsprofils zu einem monodimensionalen Gesamturteil⁸⁾ wird aus mehreren Gründen bewußt verzichtet.

Zunächst setzt eine Aggregation der kriterienspezifischen Teilergebnisse voraus, daß den zugrundeliegenden Beurteilungskriterien jeweils eine Artenpräferenz zugeordnet wird. Diese Artenpräferenzen hängen jedoch im allgemeinen von den subjektiven Einstellungen des Anwenders eines Modellierungskonzepts ab⁹⁾. Darüber hinaus kann sich die jeweils aktuelle Anwendungssituation auf die Artenpräferenzen auswirken¹⁰⁾. Infolge dieser Subjekt- und Situationsabhängigkeit von Artenpräferenzen ist keine allgemeingültige Aussage über deren Ausprägungen möglich¹¹⁾. Dies gilt insbesondere auch für das Ausmaß, in dem konfliktionäre Beurteilungskriterien¹²⁾ auf ein Gesamturteil Einfluß nehmen sollen. Es erfolgt hier grundsätzlich kein Versuch, solche Kriterienkonflikte in der einen oder anderen Richtung aufzulösen. Dies bleibt dem Modellierungsträger in der jeweils aktuellen Modellierungssituation überlassen.

Selbst wenn Artenpräferenzen bekannt wären, so würde immer noch ein gravierendes Problem fortbestehen. Denn die Aggregation der Teilergebnisse zu einem Gesamturteil erfordert, die Erkenntnisse bezüglich einzelner Beurteilungskriterien mit ihren kriterienspezifischen Artenpräferenzen zu "gewichten". Die Verrechnung derart gewichteter Teilergebnisse unterliegt aber fundamentalen konzeptionellen Schwierigkeiten. Sie resultieren aus dem Umstand, daß die Beurteilung der relativen Vorteilhaftigkeit der verglichenen Netzklassen nur zu quasi-ordinalen, mitunter sogar nur zu nominalen Abstufungen führte. Die Aggregation solcher partieller Beurteilungsergebnisse zu einem Gesamturteil läßt sich aber im allgemeinen nicht ohne Amalgamationsfehler durchführen. Dies gilt zumindest für die betriebswirtschaftlich vorherrschenden Aggregationskonzepte¹³⁾, wie z.B. die Nutzwertanalyse¹⁴⁾. Denn dort werden Beurteilungsergebnisse, die zunächst auf einer quasi-ordinalen oder nominalen Skala gemessen wurden, durch additive und multiplikative Verrechnungsoperationen miteinander verknüpft. Diese arithmetischen Operationen sind aber nur für Größen zulässig, die kardinale Meßskalen erfüllen. Daher liegt ein unzulässiger Skalenbruch vor¹⁵⁾, wenn die Teilergebnisse des Stärken/Schwächen-Profiles

zunächst mit den Artenpräferenzen für die betroffenen Beurteilungskriterien gewichtet¹⁶⁾ und danach zusammengefaßt¹⁷⁾ werden¹⁸⁾.

Aufgrund der vorgenannten Variabilität und Aggregationsproblematik von Artenpräferenzen unterbleibt von vornherein jeder Versuch, die Resultate für einzelne Beurteilungsergebnisse zu einem Gesamturteil zusammenzuführen¹⁹⁾. Daher schließt das Stärken/Schwächen-Profil, das in Abb. 218 bis 220 aufgeführt ist²⁰⁾, die hier vorgelegte Beurteilung des Petrinetz-Konzepts ab. Die Beurteilungskriterien des Profils werden aus der Beurteilungsliste übernommen, die in Abb. 211 bis 213 präsentiert wurde²¹⁾.

Das Stärken/Schwächen-Profil fällt allerdings aufgrund seiner Kriterienvielfalt so umfangreich aus, daß es auf den ersten Blick schwer zu überschauen ist. Daher folgt in Abb. 221 eine Stärken/Schwächen-Übersicht als Polarprofil. Diese Übersicht beruht aber auf partiellen Zusammenfassungen von Beurteilungskriterien²²⁾. Daher unterliegt sie der zuvor geäußerten Kritik an Kriteriengewichtungen und -verrechnungen²³⁾. Aus diesem Grund stellt die Stärken/Schwächen-Übersicht *keine* Beurteilung des Petrinetz-Konzepts dar, die der Verf. mit Entschiedenheit verteidigen möchte. Vielmehr präsentiert sie das Ergebnis der Teilaggregationen von inhaltlich verwandten Beurteilungskriterien, das auf den *subjektiven* Präferenzen des Verf. beruht. Die Teilaggregationen könnten bei der Präsupposition alternativer Präferenzen ebenso anders ausfallen. Darüber hinaus wurde die Freiheit subjektiver Kriteriengewichtungen ausgenutzt, um die praktisch orientierten Determinanten der Modellierungsgüte in den Vordergrund zu rücken²⁴⁾. Dagegen werden die theoretisch orientierten Gütedeterminanten und die Modellierungsfähigkeit in der Stärken/Schwächen-Übersicht weniger stark berücksichtigt. Aufgrund dieser subjektiven Setzungen besitzt die Übersicht lediglich exemplarischen Charakter²⁵⁾.

Stärken / Schwächen-Profil des Petrinetz-Konzepts

Beurteilungskriterien	nominale Skalen						erfüllt
	nicht erfüllt	quasi-ordinale Skalen				erfüllt	
		sehr niedrig	niedrig	mittel=mäßig	hoch		
Modellierungsfähigkeit							
allgemeine Modellierungsfähigkeit		○			●	■	
* Turing-Mächtigkeit	○ ●						■
spezielle Modellierungsfähigkeiten							
* sequentielle Prozesse				○	●	■	
* nebenläufige Prozesse				○	●	■	
* Entscheidungsalternativen					○	● ■	
* Ressourcenkonkurrenz			○		● ■		
* Kausalzusammenhänge					○ ● ■		
* bewegliche Objekte							○ ● ■
* Objekteigenschaften	○						● ■
* Objektindividualität	○						● ■
* zeitbezogene Determinanten		○ ●				■	
* stochastische Einflüsse		○	● ■				
* Koordinierungskonzepte				○	●	■	
* Sachziele	○ ●						■
* Formalziele				○	●	■	
* Offenheit				○ ●	■		

Legende: ○ Stelle/Transition-Netze ● Synthetische Netze ■ Erweiterte Synthetische Netze

Abb. 218: Stärken/Schwächen-Profil für das Petrinetz-Konzept bei der Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen - erster Teil

Stärken / Schwächen-Profil des Petrinetz-Konzepts						
Beurteilungskriterien	nominale Skalen					
	nicht erfüllt	quasi-ordinale Skalen				erfüllt
		sehr niedrig	niedrig	mittel= mäßig	hoch	
Modellierungsgüte						
praktisch orientierte Gütedeterminanten						
Modellierungsphasen						
Konstruktivität		○	● ■			
* Modularität		○		● ■		
* hierarchische Modellverfeinerung		○		● ■		
Analysierbarkeit						
* Modelleigenschaften					○ ● ■	
* Technikenanzahl			● ■		○	
* Technikenmächtigkeit				● ■	○	
Modellierungsträger						
Benutzerfreundlichkeit			● ■	○		
* graphisch visualisierte Netzmodelle					○ ● ■	
* formale Netzmodelle		● ■		○		
Effizienz						
* Konstruktionseffizienz			● ■		○	
* Auswertungseffizienz		● ■	○			
Implementierbarkeit			■	●	○	
* Interaktivität				● ■	○	

Legende: ○ Stelle/Transition-Netze ● Synthetische Netze ■ Erweiterte Synthetische Netze

Abb. 219: Stärken/Schwächen-Profil für das Petrinetz-Konzept bei der Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen - zweiter Teil

Stärken / Schwächen-Profil des Petrinetz-Konzepts

Beurteilungskriterien	nominale Skalen						erfüllt
	nicht erfüllt	quasi-ordinale Skalen				erfüllt	
		sehr niedrig	niedrig	mittel=mäßig	hoch		
theoretisch orientierte Gütedeterminanten							
Konsistenz							
* logische Widerspruchsfreiheit		■		●	○		
* Validierungskriterien		○ ● ■					
* Verifizierungskriterien							○ ● ■
* Integritätsbedingungen		●	○			■	
* Invarianten		● ■			○		
Eindeutigkeit			○ ●	■			
Formalisierung							
* formalsprachliche Modelldefinition			■		○	●	
* logisch-mathematische Fundierung					○	● ■	
* Axiomatisierung		■	●		○		
Interpretierbarkeit				○	●	■	
Operationalität			■	●	○		
Realitätsadäquanz							
* Natürlichkeit					○ ■	●	
Einfachheit							○ ● ■
Einheitlichkeit			●	■	○		
* Standardisierung		● ■		○			
* Vollständigkeit				○ ● ■			
Adaptivität			○		● ■		
Integrationsqualität				○		● ■	
Fruchtbarkeit				○		● ■	

Legende : ○ Stelle/Transition-Netze ● Synthetische Netze ■ Erweiterte Synthetische Netze

Abb. 220: Stärken/Schwächen-Profil für das Petrinetz-Konzept bei der Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen - dritter Teil

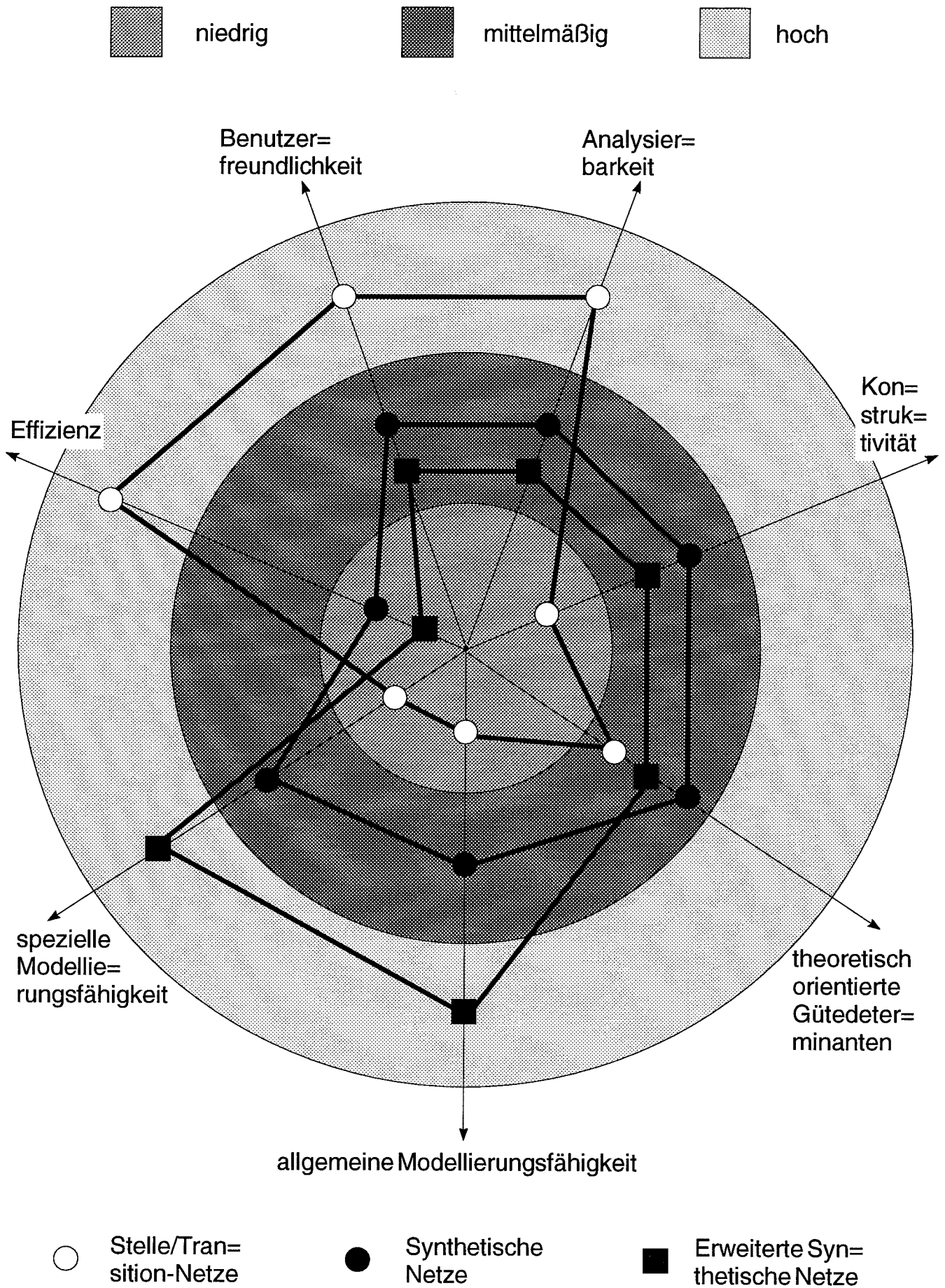


Abb. 221: Exemplarische Stärken/Schwächen-Übersicht

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Strenggenommen handelt es sich um die spezielle Darstellungsvariante der Polaritätsprofile. Vgl. zur Verwendung solcher Profile für die Präsentation von Beurteilungsergebnissen MILLER, T. (1968), S. 232ff., insbesondere S. 234f.; STREBEL (1975), S. 33; FRANK, J. (1976), S. 196; KERN, W. (1977), S. 219ff.; KRÜGER, W. (1990a), S. 383 u. 385; STEFFEN (1991), S. 370; WILLENBACHER (1991), S. 6; KIRN (1992b), S. 394.

Die hier präferierten Polaritätsprofile stimmen im wesentlichen mit einer anderen, oftmals üblichen Präsentationsweise überein. Es handelt sich um die Verwendung von Polarprofilen. Vgl. zu solchen Polarprofilen SCHLEGEL (1975), S. 469f.; KERN, W. (1977), S. 219ff.; ELLINGER (1977c), S. 11f.; ELLINGER (1978e), S. 176ff. u. 216f.; HETTICH (1979), S. 173f.; PFOHL (1981), S. 193f.; FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEMTECHNIK (1982), S. 329ff.; ELLINGER (1985), S. 166ff.; MERTINS (1985a), S. 77ff. u. 128ff.; ALBACH (1988a), S. 1145ff.; WILDEMANN (1988f), S. 279f.; BÖTZOW (1988a), S. 229f.; LOOS, U. (1989), S. 219, Bild 10; MEYER, W. (1990a), S. 297, Fig. 7.11; EVERSHEIM (1990c), S. 77.

Polaritäts- und Polarprofile verzichten in gleicher Weise darauf, die Teilergebnisse bezüglich einzelner Beurteilungskriterien zu einem Gesamturteil zu aggregieren. Sie unterscheiden sich lediglich durch die geometrische Anordnung der Beurteilungskriterien. Bei Polaritätsprofilen erfolgt eine lineare Auflistung der Beurteilungskriterien, während sie bei Polarprofilen in einem Polarkoordinatensystem von einem gemeinsamen Ursprung strahlenförmig ausgehen.

2) Ordinale Skalen wurden innerhalb der Rahmenlegung erläutert. Das einschränkende Präfix "quasi" wird in Kürze näher beleuchtet.

3) Nominale Meßskalen lassen nur zu, entweder das Vorliegen oder aber das Nichtvorliegen eines Sachverhalts festzustellen. Entsprechend können einerseits alle sachverhaltserfüllenden und andererseits alle sachverhaltsverletzenden Objekte zu jeweils einer Klasse gleichartiger Objekte zusammengefaßt werden. Daher werden Nominalskalen oftmals auch als klassifikatorische Skalen bezeichnet. Vgl. zu nominalen oder klassifikatorischen Skalen SZYPERSKI (1974), S. 63; FRANK, J. (1976), S. 88f. u. 91; BECHMANN (1978), S. 331f.

4) Strenggenommen müßte jede einzelne Anordnungsentscheidung vor dem Hintergrund der früher vorgetragenen Erläuterungen gerechtfertigt werden. Die Zusammenhänge zwischen den Anordnungsentscheidungen und den früheren Erläuterungen erscheinen dem Verf. aber so trivial, daß er darauf verzichtet, sie im einzelnen explizit zu rechtfertigen.

5) Die sprachlich farblosen Stufenbezeichnungen "sehr hoch erfüllt" und "sehr niedrig erfüllt" werden hier gegenüber ausdruckskräftigeren Formulierungen - wie z.B. "ausgezeichnet erfüllt" bzw. "überhaupt nicht erfüllt" bevorzugt. Denn erstgenannten Bezeichnungen besitzen den Vorteil, sprachlich symmetrisch formuliert zu sein und zugleich stets inhaltlich zuzutreffen. Die Formulierung "Überhaupt nicht erfüllt" würde dagegen inhaltliche Verbiegungen erfordern, sollte sie noch auf die "beklagenswert ineffiziente" Auswertung der Erreichbarkeitsgraphen von Synthetischen Netzen angewendet werden. Dies wäre aber erforderlich, da die nächst höhere Beurteilungsstufe, die "niedrige" Auswertungseffizienz, bereits für Stelle/Transition-Netze vorgesehen wurde. Um solche inhaltlichen Probleme zu vermeiden, hält der Verf. an den oben eingeführten Stufenbezeichnungen fest.

Falls mehrere Netzklassen derselben Ausprägungsstufe zugerechnet werden, gilt ihre Kriterienerfüllung als gleich. Die - letztlich willkürliche - Anordnung der Netzklassen innerhalb derselben Ausprägungsstufe gibt daher keine beurteilungsrelevanten Erkenntnisse wieder. Sie dient lediglich der optischen Entzerrung des Beurteilungsprofils.

In den natürlichsprachlichen Bezeichnungen der fünf Ausprägungsstufen klingt eine absolute Positionierung der jeweils beurteilten Netzklasse an. Auch das Überspringen von Ausprägungsstufen, das bei einzelnen Beurteilungskriterien vorkommt, beruht auf solchen Absoluteneinschätzungen. Beides läßt sich strenggenommen mit ordinalen Beurteilungsskalen, die nur Rangfolgen der beurteilten Objekte zulassen, nicht vereinbaren. Beispielsweise läßt die Beurteilung des Kriteriums der Universalität oder allgemeinen Modellierungsfähigkeit auf einer streng ordinalen Meßskala nur die Feststellung zu, daß Erweiterte Synthetische Netze eine größere Ausdrucksmächtigkeit als Synthetische Kernnetze besitzen und daß Synthetische Kernnetze ihrerseits eine größere Ausdrucksmächtigkeit als Stelle/Transition-Netze aufweisen. Dagegen wird im Stärken/Schwächen-Profil in Abb. 221 die allgemeine Modellierungsfähigkeit von Stelle/Transition-Netzen als "niedrig", die von Synthetischen Kernnetzen als "hoch" und die von Erweiterten Synthetischen Netzen als "sehr hoch" eingestuft. In der "niedrigen" Beurteilung der Ausdrucksmächtigkeit von Stelle/Transition-Netzen klingt bereits eine absolute Positionierung an. Denn dieses Beurteilungsergebnis übermittelt einen Informationsgehalt auch dann, wenn kein Vergleich mit den beiden anderen Netzklassen erfolgen würde. Gleiches gilt für die Qualifizierungen der Synthetischen Kernnetze und der Erweiterten Synthetischen Netze. Darüber hinaus kann das Überspringen der Ausprägungsstufe "mittelmäßig" auf rein ordinale Weise nicht erklärt werden. Es ergibt sich aber unmittelbar, wenn das Mitschwingen der vorgenannten absoluten Informationsgehalte akzeptiert wird. Wegen dieser Überformung von ordinalen Meßskalen durch die Andeutungen von absoluten Positionierungen wird hier nicht von ordinalen, sondern nur von *quasi*-ordinalen Skalen gesprochen. Zugleich werden die absoluten Positionierungen durch die groben Ausprägungsstufen aber nur *vage angedeutet*. Daher wird von vornherein darauf verzichtet, diesen Positionierungen das Skalenniveau einer Verhältnis- oder gar

Absolutskala zugrundelegen zu wollen. Infolgedessen werden weder ein wohldefinierter Skalennullpunkt noch eine wohldefinierte Maßeinheit unterstellt. Deshalb reichen die Andeutungen absoluter Positionierungen nicht aus, um das Skalenniveau der einzelnen Beurteilungskriterien hinsichtlich der Kriterienamalgamation "wesentlich" über das Niveau von ordinalen Meßskalen anzuheben. Auch aus diesem Grund wird von quasi-ordinalen Skalen geredet.

Es könnte die Frage erhoben werden, warum nicht entweder "reine" ordinale oder aber kardinale Skalen für die Beurteilung der einzelnen Kriterien verwendet werden (sofern nicht der unproblematische Fall von Nominalskalen vorliegt). Darauf wurde jedoch aus drei Gründen zugunsten der "unreinen" quasi-ordinalen Skalen verzichtet. Erstens geht der Verf. davon aus, daß die hier betrachteten Beurteilungskriterien keine kardinalen Skalenniveaus zu erfüllen vermögen. Vgl. zur weitgehenden praktischen Irrelevanz von Kardinalskalen beispielsweise auch KERN, W. (1977), S. 212 (Dort werden Kardinalskalen als Intervallskalen mit Nullpunkten bezeichnet. Sie entsprechen den Verhältnisskalen, auf die in der Rahmenlegung Kardinalskalen zurückgeführt wurden.). Zweitens besitzen quasi-ordinale Skalen gegenüber reinen Ordinalskalen den Vorzug, einen höheren Informationsgehalt aufzuweisen. Das wurde schon oben angesprochen. Darüber hinaus verweisen die Einstufungen der drei Netzklassen mitunter auch auf relative Leistungsvergleiche mit alternativen Modellierungskonzepten. Dadurch steigt der Informationsgehalt des Beurteilungsprofils ebenso. Drittens wahren die quasi-ordinalen Skalen den Anschluß an multikriterielle Beurteilungsschemata, die in betriebswirtschaftlichen Argumentationskontexten weit verbreitet sind. Dort findet z.B. der Ansatz weite Beachtung, die Erfüllung einzelner Beurteilungskriterien auch dann mit "Punkten" zu bewerten, wenn nur eine ordinale Rangfolge der Beurteilungsobjekte intendiert wird. Die Punktezuweisungen suggerieren aber stets eine absolute Positionierung. Dies gilt zumindest dann, wenn - wie im allgemeinen üblich - für jedes Beurteilungskriterium eine feste Punkteanzahl vorgegeben wird, die für die Einstufung der Kriterienerfüllung zur Verfügung steht. Solche Punktezuweisungen erfolgen z.B. oftmals im Rahmen der Nutzwertanalyse. Ebenso liegt sie dem eng verwandten "scoring"-Konzept zugrunde. Vgl. dazu die ausführliche Darstellung der "Punktbewertungsmethoden" bei KERN, W. (1977), S. 200ff., insbesondere S. 206 hinsichtlich der primär intendierten ordinalen Meßskalen und S. 206f. bezüglich der fest vorgegebenen Punkteanzahlen. Vgl. ebenso STREBEL (1969), S. 251ff., insbesondere S. 264f. Dort wird explizit eingeräumt, daß die nominale oder ordinale Messung der Kriterienerfüllung durch die Einführung eines Punkteschemas zugunsten einer kardinalen Skalierung verlassen wird; vgl. STREBEL (1969), S. 263; KERN, W. (1977), S. 206. Darüber hinaus sind natürlichsprachliche Bezeichnungen von Ausprägungsstufen, die den oben verwendeten ähneln, bei etablierten multikriteriellen Beurteilungsschemata - auch unabhängig vom Aspekt der Punktezuweisungen - allgemein üblich; vgl. z.B. MILLER, T. (1968), S. 234f.; STREBEL (1969), S. 262ff.; KERN, W. (1977), S. 206. Die absoluten Positionierungen, die in den natürlichsprachlichen Stufenbezeichnungen mitschwingen, werden dabei allerdings nicht thematisiert.

6) Falls mehrere Netzklassen derselben Ausprägungsalternative zugerechnet werden, wird ihre Kriterienerfüllung wiederum als gleich behandelt. Die entsprechenden Ausführungen aus der voranstehenden Anmerkung gelten in analoger Weise.

7) Die Multidimensionalität erstreckt sich strenggenommen auf zwei verschiedenartigen Erkenntnisebenen. Einerseits ist die Ebene der unterschiedlichen Beurteilungsdimensionen gemeint, die jeweils durch ein Beurteilungskriterium konstituiert werden. Andererseits lassen sich die Netzklassen als unterschiedliche Dimensionen des Petrinetz-Konzepts auffassen. Fortan werden unter den Dimensionen des Beurteilungsprofils ausschließlich seine Beurteilungsdimensionen verstanden. Die Netzklassen werden dagegen nicht mehr als verschiedene Dimensionen des Petrinetz-Konzepts herausgestellt.

8) Das Gesamturteil wird hier stets auf die Gesamtheit aller Beurteilungskriterien, aber nicht auf die Gesamtheit aller Netzklassen bezogen. Statt dessen erstreckt sich jedes Gesamturteil auf genau eine beurteilte Netzklasse. Darüber hinaus könnte daran gedacht werden, alle netzklassenspezifischen Gesamturteile zu einem "Superurteil" über das Petrinetz-Konzept als Ganzheit zu verdichten. Eine solche noch weiter reichende Aggregation bleibt hier aber von vornherein ausgeklammert. Denn der Verf. sieht keinen Erkenntniswert darin, "das" Petrinetz-Konzept trotz der ausgeprägten Heterogenität seiner Netzklassen insgesamt beurteilen zu wollen.

9) Dies folgt aus dem Umstand, daß die Artenpräferenzen zur Modellierung des Entscheidungsträgers gehören. Vgl. dazu die Erläuterungen zur entscheidungstheoretischen Konzeptualisierung von Koordinierungsproblemen.

10) Dies wurde schon im entscheidungstheoretischen Kontext dargelegt.

11) In einer früheren Anmerkung wurde der Vorbehalt geäußert, daß unterschiedliche Anwender eines Modellierungskonzepts deutlich divergierende Präferenzen hinsichtlich der Konzeptstandardisierung verfolgen können.

12) Der Konflikt zwischen den Kriterien der Ausdrucksmächtigkeit und der Auswertungs- oder Lösungseffizienz wurde in dieser Arbeit als allgemeines Modellierungsdilemma mehrfach behandelt. Ähnliche, aber inhaltlich verallgemeinerte Verhältnisse liegen bei der tendenziellen Gegenläufigkeit vor, die für Kriterien der Modellierungsfähigkeit und -güte festgestellt wurde. Vgl. dazu die Ausführungen im Zusammenhang mit der Adaptivität des Petrinetz-Konzepts. Die Modellierungsfähigkeit bezieht sich dabei nicht nur auf die Ausdrucksmächtigkeit als allgemeine Modellierungsfähigkeit. Vielmehr umfaßt sie ebenso die speziellen Modellierungsfähigkeiten, die in Kapitel 9.2.1.2

diskutiert wurden. Die Modellierungsgüte erstreckt sich in analoger Weise nicht nur auf die Auswertungs- oder Lösungseffizienz. Statt dessen gehören zu ihr alle Kriterien, die in dieser Arbeit in Abschnitt 9.2.2 behandelt wurden.

13) Vgl. zu einem Überblick über die einschlägigen Aggregationskonzepte, die mitunter auch unter dem Stichwort der "Wert-" oder "Bewertungssynthese" behandelt werden, KNIGGE (1975), S. 123ff.; FRANK, J. (1976), S. 184ff.; KERN, W. (1977), S. 212ff. (im Rahmen der Nutzwertanalyse) u. 223f.; DINKELBACH (1982), S. 153ff.; ZELEWSKI (1986a), S. 985ff. (und die dort angeführte Literatur).

Von den dort angeführten Aggregationskonzepten wird im folgenden nur auf die Nutzwertanalyse näher eingegangen. Denn nur sie vereinigt zwei Vorzüge in sich. Einerseits stellt sie so schwache Anforderungen, daß sie - zumindest auf den ersten Blick - für eine Aggregation des Stärken/Schwächen-Profiles in Betracht kommt. Andererseits handelt es sich um ein betriebswirtschaftlich vertrautes Aggregationskonzept. Von "exotischen" Alternativen wird von vornherein abgesehen. Andere Aggregationskonzepte stellen so hohe Anforderungen an die Informationsqualität, daß sie ebenso ausscheiden. Dies trifft beispielsweise auf Kosten/Nutzen-Analysen zu. Sie setzen monetäre Bewertungen des Ressourceneinsatzes auf einer Absolutskala voraus. Solche monetären Bewertungen wurden aber bei der Beurteilung der Modellierungseffizienz ausgeklammert. Darüber hinaus erfordern sie eine Aggregation der Nutzengrößen, die der Verf. für ausgeschlossen hält. Dies wird er anhand von Nutzwertanalysen näher darlegen. Erst recht muß auf Wirtschaftlichkeitsanalysen verzichtet werden. Sie würden zusätzlich eine monetäre Bewertung der Nutzengrößen erfordern. Die Nutzenbeiträge eines Modellierungskonzepts erstrecken sich auf alle Beurteilungskriterien, die in den voranstehenden Kapiteln erörtert wurden, mit Ausnahme des Effizienzkriteriums. Die durchgängige Monetarisierung aller Kriterienerfüllungen hält der Verf. für ausgeschlossen. Beispielsweise erachtet er das Ansinnen, die Benutzerfreundlichkeit eines Modellierungskonzepts monetär bewerten zu wollen, für vollkommen verfehlt.

Eine abweichende Ansicht vertritt dagegen VIEFHUES (1982). Er räumt zwar Aggregationsschwierigkeiten ein (S. 149f.). Dennoch fordert er explizit, daß bei der Beurteilung von Modellierungen die "Beurteilungsmerkmale ... mittels einer Überführung in Kosten-Nutzenkategorien vergleichbar zu machen sind." (S. 149). Er zielt also auf eine Kosten/Nutzen-Analyse ab. Sie umfaßt sowohl monetäre Bewertungen für die Ermittlung der Modellierungskosten als auch Aggregationen von Nutzengrößen zur Bestimmung des Modellierungsnutzens. In ähnlicher Weise plädiert ZENTES (1976), S. 37, dafür, Modellierungskosten und -erträge einander gegenüberzustellen. Zwar bezieht er sich nicht auf die Beurteilung eines Modellierungskonzepts, sondern auf die Ermittlung eines "optimalen" Komplexionsgrads. Aber diesem Optimierungsstreben liegt inhaltlich eine Konzeptbeurteilung zugrunde. Auf die Schwierigkeiten solcher Optimierungsvorhaben wurde schon hingewiesen.

Eine distanziertere und zugleich weiterreichende Haltung findet sich bei PFOHL (1977), S. 280. Obwohl er entscheidungsunterstützende Systeme und Entscheidungsmethoden thematisiert, treffen seine Gedanken auf die hier interessierende Beurteilung von Modellierungskonzepten ebenso zu. PFOHL fordert zunächst auch eine Kosten/Nutzen-Analyse. Aber er weist zu Recht darauf hin, daß alle bisher erfolgten Versuche in dieser Richtung letztlich daran gescheitert seien, *operationale* Kosten- und Nutzenkriterien aufzustellen. Wenn der Begriff der Kriterienoperationalität so weit gefaßt wird, daß er auch die Aggregierbarkeit der Einzelkriterien einschließt, deckt sich die Feststellung PFOHL's vollkommen mit der hier vertretenen Aggregationsskepsis. Darüber hinaus regt PFOHL an, ein Konzept nicht isoliert zu beurteilen. Vielmehr müsse es hinsichtlich derjenigen Kosten- und Nutzenbeiträge untersucht werden, die es in einem *vorgegebenen* betrieblichen Konzeptrahmen zu entfalten vermag. Diesem Vorbehalt schließt sich der Verf. uneingeschränkt an.

Im Idealfall müßten daher die Stärken und Schwächen eines Modellierungskonzepts in einem zweistufigen Verfahren beurteilt werden. Auf der ersten Stufe des Beurteilungsverfahrens ist die Menge der potentiellen Anwendungsumgebungen zu identifizieren, in denen ein Konzeptesatz in Betracht gezogen wird. Auf der zweiten Verfahrensstufe wird in jeder potentiellen Anwendungsumgebung beurteilt, welche Verbesserungen und welche Verschlechterungen bei der Erfüllung von Modellierungsaufgaben durch die Anwendung des beurteilten Modellierungskonzepts zu erwarten sind. Die Beurteilungsergebnisse stellen umgebungsspezifische Stärken und Schwächen des untersuchten Modellierungskonzepts dar. Nur solche Stärken und Schwächen, die in allen identifizierten potentiellen Anwendungsumgebungen zugleich auftreten, lassen sich als umgebungsunspezifische Konzeptcharakteristika qualifizieren. Jedoch steht auch diese Auszeichnung unter dem Vorbehalt, daß sie strenggenommen nur für die Menge aller identifizierten potentiellen Anwendungsumgebungen gilt. Es kann sich bei Extensionsvariationen dieser Menge durchaus herausstellen, daß Konzeptstärken oder -schwächen, die vor einer Variation noch als umgebungsunspezifisch erschienen sind, danach als umgebungsspezifisch erkannt werden. Die Gesamtheit aller vorstellbaren potentiellen Anwendungsumgebungen für ein Modellierungskonzept ist aber prinzipiell offen. Daher kann niemals mit abschließender Gewißheit behauptet werden, eine Konzeptstärke oder -schwäche sei umgebungsunspezifisch. Allerdings läßt sich die Umgebungsabhängigkeit von Stärken und Schwächen eines Modellierungskonzepts erst dann in seine Beurteilung aufnehmen, wenn die Menge der potentiellen Anwendungsumgebungen des Konzepts bekannt ist. Diese Prämisse ist bei einer *allgemeinen* Beurteilung des Petrinetz-Konzepts jedoch nicht erfüllt. Daher wird in dieser Arbeit auf die Umgebungsdependenz der Konzeptbeurteilung nicht weiter eingegangen.

14) Vgl. zur Nutzwertanalyse KNIGGE (1975), S. 125ff.; ZANGEMEISTER (1976), insbesondere S. 45, 55ff. u. 252ff.; FRANK, J. (1976), S. 205ff.; KERN, W. (1977), S. 199ff.; BECHMANN (1978), S. 20ff., insbesondere S. 26ff.;

STAHLKNECHT (1981), S. 108ff.; ANSELSTETTER (1984), S. 2f.; THOM (1987), S. 385ff.; vgl. aber auch die kritischen Positionen gegenüber der Nutzwertanalyse in HEIDEMANN (1981), S. 4ff.; STRASSERT (1981), S. 19ff.; EEKHOFF (1981a), S. 38ff. Vgl. ebenso den ähnlichen konzipierten Ansatz einer "semantischen Differentialtechnik" bei BAILEY (1983), S. 531ff.

15) Vgl. zu Skalenbrüchen der Nutzwertanalyse EEKHOFF (1978), S. 86; EEKHOFF (1981a), S. 50; ZELEWSKI (1986a), S. 988; THOM (1987), S. 394. Es überrascht, daß THOM zwar die Problematik von Skalenbrüchen zu erkennen scheint, aber daraus nicht die naheliegende Konsequenz zieht, auf die skalenbrechende Aggregation ordinaler Teilnutzwerte zu verzichten. BECHMANN (1978), S. 33f., 39, 42, 55, 58 u. 71, verhält sich dagegen folgerichtig, wenn er für die Anwendung der "konventionellen" Nutzwertanalyse fordert, die Teilergebnisse *aller* Beurteilungskriterien müßten von vornherein auf kardinalen Skalen gemessen werden (Nutzwertanalyse der 1. Generation). Vgl. ebenso BECHMANN (1980), S. 169. Dann besteht zwar kein Aggregationsproblem mehr. Aber die Nutzwertanalyse läßt sich auch nicht mehr auf die hier interessierenden Beurteilungskriterien anwenden, die nur ein ordinales Skalenniveau erfüllen.

Allerdings hat BECHMANN (1978), S. 61ff., eine Fortentwicklung der Nutzwertanalyse vorgelegt. Diese "Nutzwertanalyse der 2. Generation" wird näher beschrieben bei BECHMANN (1978), S. 76ff.; BECHMANN (1980), S. 167 u. 169ff.; EEKHOFF (1981a), S. 42ff. Sie ist auf die Aggregation ordinaler Teilnutzwerte zugeschnitten; vgl. BECHMANN (1978), S. 71, 73, 77, 83 u. 86; BECHMANN (1980), S. 170; EEKHOFF (1981a), S. 43 u. 45f. Dennoch wird die Nutzwertanalyse der 2. Generation hier aus zwei Gründen nicht weiter gewürdigt. Erstens vermochte sie sich in betriebswirtschaftlichen Anwendungskontexten nicht durchzusetzen. Zweitens ist ihre konkrete Durchführung nur schwer zu durchschauen. Vgl. dazu die aufwendige, undurchsichtige, passagenweise auch inoperationale Beschreibung des Aggregationsschemas für ordinale Teilergebnisse bei BECHMANN (1978), S. 80ff. u. 91ff. Daher verwundert es nicht, daß EEKHOFF (1981a), S. 44f. u. 50f., und THOM (1987), S. 394, Fn. 168, zu entsprechend negativen Urteilen über die Nutzwertanalyse der 2. Generation gelangen. BECHMANN (1980), S. 170ff., räumt sogar selbst ein, daß seine Präsentationen der fortentwickelten Nutzwertanalyse unter Darstellungsmängeln leide. Sie sei "nicht so eindeutig und präzise" (S. 170), sie könne "evtl. unklar" (S. 171) erscheinen, und sie besitze eine "geringere Mechanisierbarkeit" (S. 171). Der Verf. hält diese Einschätzungen BECHMANN's immer noch für vorsichtige Formulierungen.

Vgl. zu weiteren Schwierigkeiten der Nutzwertanalyse, die hier nicht näher thematisiert werden, BECHMANN (1978), S. 31ff. u. 52ff.; ZELEWSKI (1986a), S. 988. Vgl. ebenso die betont kritischen Positionen zur Nutzwertanalyse, die bereits in einer früheren Anmerkung angeführt wurden.

Die Nutzwertanalyse wurde an dieser Stelle nur als pars pro toto betrachtet. Ihre immanente Problematik, bei der Anwendung auf ordinal gemessene Beurteilungskriterien zu Skalenbrüchen zu führen, liegt auch allen ähnlichen Konzepten für multikriterielle Beurteilungen zugrunde. Vgl. dazu beispielsweise die Hinweise bei STREBEL (1969), S. 263, und KERN, W. (1977), S. 206, daß das "scoring"-Konzept eine Umwandlung von Nominal- oder Ordinal- in Kardinalskalen erfordere, um die Teilurteile, die bezüglich einzelner Beurteilungskriterien getroffen wurden, zu einem Gesamturteil aggregieren zu können. Allerdings wird dort die Skalenumwandlung nur als solche konstatiert. Die Problematik des hiermit verbundenen Skalenbruchs wird dagegen nicht gewürdigt. Dagegen spricht STREBEL (1975), S. 104 u. 106, deutlich aus, daß beim "scoring"-Konzept jede Aggregation von ordinal gemessenen Teilurteilen letztlich "systemwidrig" (S. 104) sei oder "systemwidrige Annahmen" (S. 106) erfordere.

Vgl. ebenso BAILEY (1983), S. 534, zur "semantischen Differentialtechnik", die auch schon kurz erwähnt wurde. Auch dort läßt sich die Schwierigkeit von Skalenbrüchen nicht überwinden.

16) Diese Gewichtungen verknüpfen die Teilergebnisse der Konzeptbeurteilung mit den "Gewichten", welche die kriterienspezifischen Artenpräferenzen wiedergeben, auf multiplikative Weise. Dies gilt allerdings nur für das vorherrschende additive Amalgamationskonzept der Nutzwertanalyse. Im konkurrierenden multiplikativen Amalgamationskonzept beruht die Gewichtung auf einer Potenzoperation. Vgl. zur Unterscheidung zwischen additivem und multiplikativem Amalgamationskonzept KERN, W. (1977), S. 212ff.

17) Diese Zusammenfassung bedeutet eine additive Verknüpfung der gewichteten Teilergebnisse. Dies trifft allerdings wiederum nur auf das additive Amalgamationskonzept zu. Bei der multiplikativen Amalgamationsalternative erfolgt dagegen eine multiplikative Verknüpfung. Vgl. zu diesen beiden Amalgamationsvarianten den Hinweis in der voranstehenden Anmerkung.

18) Darüber hinaus wird von den betriebswirtschaftlich vorherrschenden Aggregationskonzepten im allgemeinen die wechselseitige Unabhängigkeit ("Orthogonalität") aller Beurteilungskriterien gefordert. Dies trifft z.B. auch auf die Nutzwertanalyse zu; vgl. z.B. KERN, W. (1977), S. 201 u. 203. Die Beurteilungskriterien aus dem hier vorgelegten Kriterienkatalog erfüllen dieses Unabhängigkeitspostulat jedoch nicht vollkommen. Denn einzelne Kriterien bedingen sich gegenseitig oder überlappen einander. Das Unabhängigkeitspostulat muß wegen des Aggregationsverzichts aber auch nicht notwendig erfüllt werden. Darauf wird in KERN, W. (1977), S. 219, explizit hingewiesen: Bei profilartigen Präsentationen von Beurteilungsergebnissen trage "weder die Überschneidungsfreiheit noch die Unabhängigkeit der einzelnen Bewertungskriterien ... den Charakter unbedingt zu erfüllender Voraussetzungen."

Beispielsweise läßt sich das Kriterium "Prioritätenmodellierung" im allgemeinen nur dann erfüllen, wenn ein Modellierungskonzept hinsichtlich des Kriteriums "Universalität" die Anforderung "TURING-Mächtigkeit" erfüllt. Daher hängt die Erfüllung des ersten Kriteriums teilweise vom Ausmaß der Erfüllung des zweiten Kriteriums ab. Zugleich überlappen sich die Kriterien inhaltlich, weil sie im Hinblick auf TURING-Automaten partiell übereinstimmen. Eine Kriterienüberlappung liegt ebenso vor, wenn einerseits die Promptheit und andererseits die Realzeitfähigkeit von Modellen gefordert werden. Eine weitere Kriterienüberlappung besteht zwischen dem Kriterium der Implementierbarkeit auf der einen Seite und den beiden Kriterien der Benutzerfreundlichkeit und der Effizienz auf der anderen Seite. Zugleich existiert auch eine doppelte Kriterienabhängigkeit derart, daß sich die Implementierbarkeit eines Modellierungskonzepts auf dessen Benutzerfreundlichkeit und Effizienz positiv auszuwirken vermag. Die beiden letztgenannten Überlappungs- und Abhängigkeitsaspekte wurden schon erörtert. Des weiteren hängen mehrere Beurteilungskriterien vom Kriterium der allgemeinen Modellierungsfähigkeit ab. Denn die Erfüllung der erstgenannten Kriterien wird u.a. auch von der Ausdrucksmächtigkeit der beurteilten Netzklassen beeinflusst. Dies wurde kurz zuvor hinsichtlich der quasi-ordinalen Beurteilung der beiden speziellen Fähigkeiten, sequentielle oder nebenläufige Prozesse zu modellieren, näher ausgeführt. Der gleiche Beeinflussungszusammenhang wurde auch schon deutlich, als der Beitrag von Netzmorphismen zur Konstruktivität von Stelle/Transition-Netzen eingeschätzt wurde. Eine ausgeprägte Abhängigkeitsbeziehung besteht zwischen den Kriterien der Formalisierung und der Implementierbarkeit. Denn ein Modellierungskonzept läßt sich auf einem Automatischen Informationsverarbeitungssystem nur in dem Ausmaß implementieren, in dem zuvor eine Formalisierung der Konzeptkonstrukte gelungen ist. Schließlich weist auch das Beurteilungskriterium der phasen- und zweckbezogenen Modellierungsvollständigkeit zahlreiche Überschneidungen mit anderen Beurteilungskriterien auf. Vgl. dazu die Diskussion des Vollständigkeitskriteriums.

19) In dieser Hinsicht stimmt das Stärken/Schwächen-Profil mit dem Konzept *unbewerteter* Anforderungskataloge überein. Vgl. zu solchen Anforderungskatalogen BLOHM (1977), S. 22f. i.V.m. S. 41; KNOOP (1986), S. 45.

Der Verzicht, Teilergebnisse zu einem Gesamturteil zu aggregieren, wird besonders deutlich von EEKHOFF (1981a), S. 52ff., vertreten. Dabei stellt er als Maxime heraus: "In vielen Fällen kann die Arbeit der Planer ... als abgeschlossen angesehen werden, wenn sie den Entscheidungsträgern eine fundierte Beschreibung der zu erwartenden Zielwirkungen (Zielerträge) der Handlungsalternativen vorlegen. Voraussetzung dafür ist ein umfassender, auf das Entscheidungsproblem bezogener Katalog von Zielkriterien, mit dem die relevanten Zielwirkungen beschrieben werden können. Dabei wird deutlich, daß die wichtigste Funktion der Planer darin besteht, Zielerträge zu ermitteln und nicht Nutzenfunktionen zu konstruieren und Zielerträge umzuskalieren. In vielen ... Fällen ist eine solide Zielertragsmatrix für den Entscheidungsträger hinreichend, um unmittelbar anhand der Zielerträge die ... günstigste Handlungsalternative auswählen zu können." (S. 52f.). Vgl. zu analogen Aggregationsverzichten EEKHOFF (1978), S. 86; ZELEWSKI (1986a), S. 985 und Fn. 1 auf S. 989.

Zwar unterbleibt eine Aggregation von Teilergebnissen. Doch wurde die Erfüllung einiger Beurteilungskriterien anhand von präzisierenden Subkriterien untersucht. Daher könnte die Frage aufgeworfen werden, ob die Erfüllungsgrade der Subkriterien zu einem Urteil über die Erfüllung ihrer jeweils übergeordneten Beurteilungskriterien zusammengefaßt worden sind. Dies ist aber grundsätzlich nicht geschehen, um den Aggregationsverzicht konsequent durchzuhalten. Statt dessen wurden Beurteilungskriterien, zu denen präzisierende Subkriterien gehören, wie folgt behandelt:

- Falls ein Beurteilungskriterium durch seine Subkriterien vollständig erfaßt wird, finden ausschließlich die Erfüllungsausmaße der Subkriterien Berücksichtigung. Das Erfüllungsausmaß des übergeordneten Beurteilungskriteriums, das nur aus der Aggregation der Erfüllungsausmaße seiner Subkriterien gewonnen werden könnte, wird nicht beachtet.
- Wenn ein Beurteilungskriterium durch seine Subkriterien nur unvollständig abgedeckt wird, werden die Erfüllungsausmaße sowohl für die Subkriterien als auch für das übergeordnete Beurteilungskriterium angegeben. In das Erfüllungsausmaß des übergeordneten Beurteilungskriteriums gehen dann auch jene Aspekte ein, die von der Gesamtheit seiner Subkriterien nicht erfaßt werden.

Der erste Fall liegt z.B. bei der Beurteilung der speziellen Modellierungsfähigkeiten vor. Gleiches gilt für die Beurteilung der Effizienz. Der zweite Fall trifft dagegen z.B. auf die Beurteilung der allgemeinen Modellierungsfähigkeit zu. Ebenso erstreckt er sich auf die Beurteilung der Benutzerfreundlichkeit.

20) Gewöhnlich werden in Polaritätsprofilen alle Kennzeichnungen von einzelnen Kriterienausprägungen, die zum selben Beurteilungsobjekt gehören, mittels durchgezogener Linien verbunden. Vgl. dazu die Quellen, die zu Polaritätsprofilen angeführt wurden. Auf solche Verbindungslinien wurde jedoch im Stärken/Schwächen-Profil der Abb. 218 bis 220 bewußt verzichtet. Denn eine erste Profilversion, die diese Verbindungslinien noch erhielt, erwies sich als extrem unübersichtlich.

21) Das Stärken/Schwächen-Profil weicht nur in zwei Besonderheiten von den Beurteilungsliste ab. Erstens wird auf die Dezimalklassifizierung der wichtigsten Gliederungsgesichtspunkte verzichtet, um eine kompaktere Profilpräsentation zu ermöglichen. Zweitens entfällt auf das Subkriterium der objektbezogenen Modellierungsvollständigkeit, das sich zur Präzisierung der Realitätsadäquanz heranziehen läßt. Es wurde schon dargelegt, daß dieses Subkriterium bereits durch die speziellen Modellierungsfähigkeiten berücksichtigt wird. Um eine Doppelterfassung

dieses Aspekts zu vermeiden, wird die objektbezogene Vollständigkeit im Stärken/Schwächen-Profil nicht mehr aufgeführt. Aus diesem Grunde ist es nicht mehr nötig, die phasen- und zweckbezogene Modellierungsvollständigkeit durch die vorgestellten Attribute von ihrem objektbezogenen Pendant abzuheben. Daher reicht es auch, die phasen- und zweckbezogene Modellierungsvollständigkeit im Stärken/Schwächen-Profil nur noch kurz als "Vollständigkeit" anzusprechen. Dies entspricht auch der Gliederung der hier vorgelegten Ausarbeitung.

22) Allerdings geschehen nur Aggregationen von Beurteilungskriterien zu partiell verdichteten Zwischenurteilen. Ein vollständig aggregiertes Gesamturteil liegt im Polarprofil jedoch nicht vor. Insofern wird dem voranstehenden Diktum, es erfolge kein Gesamturteil, nicht widersprochen. Statt dessen bietet die partielle Kriterienzusammenfassung der Stärken/Schwächen-Übersicht einen Kompromiß zwischen dem zuvor präsentierten total disaggregierten Stärken/Schwächen-Profil einerseits und einem vollständig aggregierten Gesamturteil andererseits.

23) Angesichts dieser Kritik werden die Zwischenurteile lediglich auf einer sehr groben Skala erfaßt. Es handelt sich um eine quasi-ordinale Skala, die nur noch die drei Erfüllungsstufen "niedrig", "mittelmäßig" und "hoch" vorsieht.

24) Darüber hinaus wurde das Kriterium der Implementierbarkeit außer Acht gelassen, um das Polarprofil nicht zu überfrachten.

25) Wenn an der *Übersichtlichkeit* des verdichteten Polarprofils kein Interesse besteht, kann darauf verzichtet werden. Alle Beurteilungsergebnisse, die der Verf. für "wesentlich" hält, sind bereits im Stärken/Schwächen-Darstellung des zuvor präsentierten Polaritätsprofils ausgedrückt.

9.4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Petrinetz-Konzept erweist sich als ein Modellierungskonzept mit bemerkenswerten Qualitäten. Seine Modellierungsfähigkeit und Modellierungsgüte tragen in vielfältigen Aspekten zur Bereicherung produktionswirtschaftlicher Modellierungen bei. Dies wird durch die herausragende Integrationsqualität und die hohe Fruchtbarkeit des Petrinetz-Konzepts unterstrichen. Allerdings leidet es derzeit unter einer eklatanten Effizienzbarriere bei der Auswertung von Netzmodellen. Sie schränkt die praktischen Anwendungsmöglichkeiten des Petrinetz-Konzepts drastisch ein, wenn eine ausdrucksmächtige Modellierung von "realistischen" Problemen beabsichtigt wird. Dies gilt insbesondere für die hier interessierende Koordinierung von Produktionsprozessen in komplexen Produktionssystemen, wie z.B. Flexiblen Fertigungssystemen.

Zukünftige Fortentwicklungen der hier vorgelegten Ausarbeitung bieten sich in mehreren Richtungen an. Dazu gehören insbesondere Anstrengungen, um die Effizienzbarriere von Netzmodellen zu senken:

- Das Kernkonzept Synthetischer Netze bedarf einer endgültigen Implementierung auf Automatischen Informationsverarbeitungssystemen. Der Implementierungsweg wird durch das zugrundegelegte Softwarepaket PASIPP bereits im Sinne der logischen Programmierung vorgezeichnet. Hinzu kommt eine Präzisierung der Implementierungsweise durch einen sortierten Dialekt der Programmiersprache PROLOG.
- Für den praktischen Umgang mit Synthetischen Netzen empfiehlt sich die Entwicklung eines automatengestützten Netzeditors. Er dient der interaktiven Konstruktion von graphisch visualisierten Netzmodellen. Dabei sollte er auf die Graphiksymbole und Notationskonventionen für Synthetische Netze zugeschnitten sein.
- Ebenso müßte ein automatengestützter Netzanalysator erstellt werden. Seine Hauptaufgabe besteht darin, die Erreichbarkeitsgraphen von Netzmodellen auszuwerten, um produktionswirtschaftlich interessante Modelleigenschaften zu untersuchen. Dabei bietet sich die Einbindung von Konzepten aus der KI-Forschung an, um die Analyseeffizienz von Erreichbarkeitsgraphen zu erhöhen.

Darüber hinaus müssen die zusätzlichen Netzkonstrukte, die zur Erweiterung des Kernkonzepts Synthetischer Netze eingeführt wurden, in eine umfassende, vollständig formalisierte Definition für Erweiterte Synthetische Netze eingebettet werden. Daran kann sich eine entsprechende Ausweitung der Konzeptimplementierung anschließen.

Schließlich läßt sich der Kriterienkatalog, der für die Beurteilung von Stärken und Schwächen des Petrinetz-Konzepts entwickelt wurde, auf andere produktionswirtschaftliche Modellierungskonzepte anwenden. Dafür kommen z.B. die Netzplantechnik und der Programmansatz des Operations Research in Betracht. Die Beurteilungsergebnisse können herangezogen werden, um die Konzepte hinsichtlich ihrer relativen Vorteilhaftigkeit bei der Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen einzustufen.

Literaturverzeichnis zu Band 9

Vorbemerkungen:

- ❑ Jedes Werk wird durch die Angabe eines Referenztitels (1. Zeile) und durch seine bibliographischen Angaben (folgende Zeilen) aufgeführt. In den Quellenangaben dieser Arbeit wird immer auf den Referenztitel Bezug genommen.
- ❑ Die Referenztitel bestehen nur aus den Autorennachnamen und den Erscheinungsjahren, solange hierdurch eine eindeutige Identifizierung der jeweils zugehörigen Werke möglich ist. Andernfalls dienen zusätzliche - abgekürzte - Autorenvornamen oder alphabetische Zusätze zu den Erscheinungsjahren der eindeutigen Identifizierung.
- ❑ Um eine einheitliche Quellenangabe in allen Bänden des Projekts PEMOPS zu gewährleisten, bezieht sich die eindeutige Identifizierung durch Autorenvornamen und alphabetische Zusätze zu den Erscheinungsjahren auf den Gesamtkorpus aller verarbeiteten Quellen. Daher kann es dazu kommen, daß innerhalb eines Bandes Lücken klaffen. Sie resultieren daraus, daß die scheinbar fehlenden Quellen im Gesamtkorpus zwar enthalten sind, aber im jeweils betroffenen Band nicht verwendet wurden.
- ❑ Die Titel fremdsprachlicher Werke werden grundsätzlich in der Notation des Originals wiedergegeben. Allerdings gelten drei Ausnahmen:
 - Titel, die sich nicht mit dem deutschsprachigen Alphabet ausdrücken lassen, werden in ihrer lautsprachlichen Umschreibung durch das deutschsprachige Alphabet wiedergegeben. Dies gilt insbesondere für Werke mit chinesischen oder kyrillischen Schriftzeichen.
 - Falls die Titel im Original durchgängig mit Großbuchstaben dargestellt werden, erfolgt hier eine Notation in der jeweils sprachspezifischen Groß-/Kleinschreibung von Titeln. Dies trifft vor allem auf anglophone Werke zu, in deren Titeln die jeweils sinnbestimmenden Worte durch Großbuchstaben eingeleitet werden.
 - Accents und andere diakritische Zeichenbestandteile, die nicht im deutschsprachigen Alphabet enthalten sind, werden grundsätzlich ausgelassen.
- ❑ In das Literaturverzeichnis wurden alle Quellen aufgenommen, auf die in den Anmerkungen zum laufenden Text verwiesen wurde.
- ❑ Weitere Publikationen, die sich auf die Thematik des Petrinetz-Konzepts beziehen, aber in den vorgenannten Quellen nicht angesprochen wurden, finden sich im Band 10 des Projekts PEMOPS zur Petrinetz-Literatur.
- ❑ Die Literaturlauswertung wurde 1992 abgeschlossen (vgl. das Vorwort in Band 1).

Abel,D. (1990)

Abel,D.: Petri-Netze für Ingenieure - Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme, Berlin - Heidelberg - New York 1990.

Abu-Mostafa (1987)

Abu-Mostafa,Y.S.; Psaltis,D.: Optische Neuro-Computer; in: Spektrum der Wissenschaft, o.Jg. (1987), Heft 5, S. 54-61.

Adam,D. (1983b)

Adam,D.: Kurzlehrbuch Planung, 2. Aufl., Wiesbaden 1983.

Agerwala (1973)

Agerwala,T.; Flynn,M.: Comments on Capabilities, Limitations and "Correctness" of Petri Nets; in: Lipovski G.J.; Szygenda,S.A. (Hrsg.): Proceedings of the 1st Symposium on Computer Architecture (ACM), New York 1973, S. 81-86.

Agerwala (1974a)

Agerwala,T.: A Complete Model For Representing the Coordination of Asynchronous Processes, Hopkins Computer Research Reports, Report No. 32, Electrical Engineering Department, The John Hopkins University, Baltimore 1974.

Agerwala (1975)

Agerwala,T.K.M.: Towards a Theory for the Analysis and Synthesis of Systems Exhibiting Concurrency, Dissertation am Computer Science Department, John Hopkins University, Baltimore 1975.

Agerwala (1978a)

Agerwala,T.: Some Applications of Petri Nets; in: Tranter,W.H. (Hrsg.): Proceedings of the National Electronics Conference, Vol. 32, 16.-18.-10.1978 in Chicago, Oak Brook 1978, S. 149-154.

Agerwala (1978b)

Agerwala,T.; Choed-Amphai,Y.-C.: A Synthesis Rule for Concurrent Systems; in: o.V.: Proceedings of the 15th Design Automation Conference, im Juni 1978 in Las Vegas, New York 1978, S. 305-311.

Agerwala (1979)

Agerwala,T.: Putting Petri Nets to Work; in: Computer, Vol. 12 (1979), No. 12, S. 85-94.

Albach (1988a)

Albach,H.: Kosten, Transaktionen und externe Effekte im betrieblichen Rechnungswesen; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 58. Jg. (1988), S. 1143-1170.

Albert,H. (1962)

Albert,H.: Probleme der Wissenschaftslehre in der Sozialforschung; in: König,R. (Hrsg.): Handbuch der empirischen Sozialforschung, Bd. 1, Stuttgart 1962, S. 38-63.

Albert,H. (1964)

Albert,H.: Probleme der Theoriebildung - Entwicklung, Struktur und Anwendung sozialwissenschaftlicher Theorien; in: Albert,H. (Hrsg.): Theorie und Realität - Ausgewählte Aufsätze zur Wissenschaftslehre der Sozialwissenschaften, 1. Aufl., Tübingen 1964, S. 3-70.

Albert,H. (1976a)

Albert,H.: Wissenschaftstheorie; in: Grochla,E.; Wittmann,W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, 4. Aufl., Stuttgart 1976, Sp. 4674-4692.

Albert,H. (1987)

Albert,H.: Kritik der reinen Erkenntnislehre - Das Erkenntnisproblem in realistischer Perspektive, Tübingen 1987.

Aldinger (1985a)

Aldinger,L.: Leitstandunterstützte kurzfristige Fertigungssteuerung bei Einzel- und Kleinserienfertigung, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1985.

Alexis (1967)

Alexis,M.; Wilson,C.Z.: Organizational Decision Making, Englewood Cliffs 1967.

Anselstetter (1984)

Anselstetter,R.: Betriebswirtschaftliche Nutzeffekte der Datenverarbeitung - Anhaltspunkte für Kosten-Nutzen-Schätzungen, Berlin - Heidelberg - New York ... 1984.

Augin (1978b)

Augin,M.: Conception des systemes de commande a l'aide de reseaux logiques programmables, Dissertation, Universität Nizza, Nizza 1978.

Aveyard (1974)

Aveyard,R.L.: A Boolean Model for a Class of Discrete Event Systems; in: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-4 (1974), S. 249-258.

Ayache (1979a)

Ayache,J.M.; Diaz,M.; Valette,R.: Methode de specification de la commande dans les systemes de commutation electronique; in: o.V.: Proceedings of the International Switching Symposium ISS'79, Paris 1979, S. 1049-1056.

Azema (1975)

Azema,P.; Diaz,M.; Doucet,J.E.: Multilevel Description Using Petri Nets; in: o.V.: Proceedings of the International IEEE-Symposium on Computer Hardware Description Languages and Their Applications, 3.-5.09.1975 in New York, New York 1975, S. 188-190.

Azema (1976b)

Azema,P.; Valette,R.; Diaz,M.: Petri Nets As a Common Tool For Design Verification and Hardware Simulation; in: o.V.: Proceedings of the 13th Annual Design Automation Conference (IEEE), in San Francisco, New York 1976, S. 109-116.

Azema (1980)

Azema,P.; Berthomieu,B.; Decitre,P.: The Design and Validation by Petri Nets of a Mechanism for the Invocation of Remote Servers; in: Lavington,S. (Hrsg.): Information Processing 80, Proceedings of the IFIP Congress 80, 6.-9.10.1980 in Tokyo und 14.-17.10.1980 in Melbourne, Amsterdam - New York - Oxford 1980, S. 599-604.

Baer,J. (1973b)

Baer,J.L.: Modeling for Parallel Computation: A Case Study; in: o.V.: Proceedings of the Sagamore Computer Conference on Parallel Processing, New York 1973, S. 13-22.

Baer,J. (1977)

Baer,J.-L.; Ellis,C.S.: Model, Design, and Evaluation of a Compiler for a Parallel Processing Environment; in: IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. SE-3 (1977), S. 394-405.

Baer,J. (1982)

Baer,J.-L.: Techniques to exploit parallelism; in: Evans,D.J. (Hrsg.): Parallel processing systems, Cambridge - London - New York ... 1982, S. 75-99.

Bailey (1983)

Bailey,J.E.; Pearson,S.W.: Development of a Tool for Measuring and Analysing Computer User Satisfaction; in: Management Science, Vol. 29 (1983), S. 530-545.

Baker,H. (1973a)

Baker,H.G.: Rabin's Proof of the Undecidability of the Reachability Set Inclusion Problem of Vector Addition Systems, Computation Structures Group Memo 79, Project MAC am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts) 1973.

Barber (1983)

Barber,R.E.; Lucas,H.C.: System Response Time Operator Productivity, and Job Satisfaction; in: Communications of the ACM, Vol. 26 (1983), S. 972-986. (Anmk. des Verf.: Interpunktion gemäß dem Original.)

Barr,R. (1989)

Barr,R.S.; Christiansen,M.G.: A Parallel Auction Algorithm: A Case Study in the Use of Parallel Object-Oriented Programming; in: Sharda,R.; Golden,B.L.; Wasil,E.; Balci,O.; Stewart,W. (Hrsg.): Impacts of Recent Computer Advances on Operations Research, New York - Amsterdam - London 1989, S. 23-32.

Bartusch (1988)

Bartusch, M.; Möhring, R.H.; Radermacher, F.J.: Scheduling Project Networks with Resource Constraints and Time Windows; in: Keeney, R.L.; Otway, H.; Möhring, R.H.; Radermacher, F.J.; Richter, M.M. (Hrsg.): Multi-Attribute Decision Making via O.R.-Based Expert Systems, Proceedings of the International Conference on Multi-Attribute Decision Making via O.R.-Based Expert Systems, Basel 1988; zugleich: Annals of Operations Research, Vol. 16 (1988), S. 201-240.

Barzilai (1978a)

Barzilai, Z.; Strasbourger, E.; Yoeli, M.: Concurrent System Modelling by Conditional Petri Nets, Technical Report No. 124, Department of Computer Science, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa 1978.

Baudin (1990)

Baudin, M.: Manufacturing Systems Analysis with Application to Production Scheduling, Englewood Cliffs 1990.

Bauer, F. (1981)

Bauer, F.L.; Wössner, H.: Algorithmische Sprache und Programmentwicklung, Berlin - Heidelberg - New York 1981.

Baumers (1977)

Baumers, B.: Zur Reduktion und graphischen Manipulation von Petri-Netzen, Diplomarbeit, Abteilung Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1977.

Baumgarten (1978)

Baumgarten, B.; Prinoth, R.: Einige Begriffe und Ergebnisse aus der Theorie der Petri-Netze, Teil I, Interner Bericht IFV am Institut für Datenfernverarbeitung der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Darmstadt 1978.

Bechmann (1978)

Bechmann, A.: Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung, Bern - Stuttgart 1978.

Bechmann (1980)

Bechmann, A.: Die Nutzwertanalyse der zweiten Generation - Unsinn, Spielerei oder Weiterentwicklung?; in: Raumforschung und Raumordnung, 38. Jg. (1980), Heft 1-2, S. 167-173.

Becker, B. (1991)

Becker, B.-D.: Simulationssystem für Fertigungsprozesse mit Stückgutcharakter - Ein gegenstandsorientiertes System mit parametrisierter Netzwerkmodellierung, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991.

Becker, P. (1979)

Becker, P.-J.: Optoelektronische Datenverarbeitung: Stand und Trend; in: FhG-Berichte, o.Jg. (1979), Heft 3, S. 26-29.

Bekhi (1989)

Bekhi, N.; Tavares, S.E.: An Integrated Approach To Protocol Design; in: o.V.: Proceedings of the IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, 01.-02.06.1989 in Victoria, New York 1989, S. 244-248.

Bell, T. (1986)

Bell, T.E.: Optical Computing: A Field in Flux; in: IEEE Spectrum, Vol. 23 (1986), No. 8, S. 34-57.

Berger, K. (1979)

Berger, K.-H.: Normung und Typung; in: Kern, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, Stuttgart 1979, Sp. 1353-1370.

Berndt (1987)

Berndt, W.; Brantner, K.; Thome, H.G.; Wieneke-Toutaoui, B.: Modellebenen; in: Halin, J. (Hrsg.): Simulationstechnik. 4. Symposium Simulationstechnik, Proceedings, 9.-11.09.1987 in Zürich, Informatik-Fachberichte 150, Berlin - Heidelberg - New York ... 1987, S. 103-118.

Bernstein (1973)

Bernstein, P.A.: Description Problems in the Modeling of Asynchronous Computer Systems, Master of Science-Thesis 1972, zugleich: Technical Report No. 48, Department of Computer Science, University of Toronto, Toronto 1973.

Bernstein (1974)

Bernstein, P.A.; Tsichritzis, D.: Models for Description of Computer Systems; in: o.V.: Proceedings of the Eighth Annual Princeton Conference on Information Sciences and Systems, 28.-29.03.1974 in Princeton, o.O. 1974, S. 340-343.

Berthelot (1976)

Berthelot, G.; Roucairol, G.: Reduction of Petri Nets; in: Mazurkiewicz, A. (Hrsg.): Mathematical Foundations of Computer Science 1976, Proceedings, 5th Symposium, 6.-10.09.1976 in Gdansk, Lecture Notes in Computer Science 45, Berlin - Heidelberg - New York 1976, S. 202-209.

Berthelot (1980a)

Berthelot, G.; Roucairol, G.; Valk, R.: Reductions of Nets and Parallel Programs; in: Brauer, W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 277-290.

Berthelot (1982b)

Berthelot, G.; Terrat, R.: Modeling and Proofs of a Data Transfer Protocol by Predicate/Transition Nets; in: Girault, C.; Reisig, W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 251-257.

Berthelot (1982d)

Berthelot, G.; Terrat, R.: Petri Nets Theory for the Correctness of Protocols; in: van de Riet, R.P.; Litwin, W. (Hrsg.): Distributed Data Sharing Systems, Proceedings of the 2nd Seminar on Distributed Data Sharing Systems, im Juni 1982, Amsterdam 1982, S. 23-43.

Best, E. (1974)

Best, E.: Beiträge zur Petrinetz-Theorie, Diplomarbeit am Institut für Informatik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1974.

Best, E. (1975a)

Best, E.; Schmid, A.: Systems of Open Paths in Petri Nets; in: Becvar, J. (Hrsg.): Mathematical Foundations of Computer Science 1975, 4th Symposium, 1.-5.09.1975 in Mariánské Lázně, Lecture Notes in Computer Science 32, Berlin - Heidelberg - New York 1975, S. 186-193.

Best, E. (1985e)

Best, E.; Fernandez, C.: Notations and Terminology on Petri Net Theory; in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 20 (1985), Special Issue on Notations and Terminology, S. 1-15.

Beyaert (1981)

Beyaert, B.; Florin, G.; Lonc, P.; Natkin, S.: Evaluation of Computer Systems Dependability Using Stochastic Petri Nets; in: o.V.: Proceedings of the 11th Annual International Symposium on Fault-Tolerant Computing, im Juni 1981 in Portland, New York 1981, S. 79-81.

Billington (1981a)

Billington, J.; Symons, F.J.W.: Modelling and Analysis of Communication Protocols - Part I; in: o.V.: Proceedings IREECON International, Melbourne - Sydney 1981, S. 18-20.

Blohm (1977)

Blohm, H.: Organisation, Information und Überwachung, 3. Aufl., Wiesbaden 1977.

Blohm (1988)

Blohm, H.; Lüder, K.: Investition - Schwachstellen im Investitionsbereich des Industriebetriebes und Wege zu ihrer Beseitigung, 6. Aufl., München 1988.

Bloom, T. (1979)

Bloom, T.: Evaluating Synchronization Mechanisms; in: o.V.: Proceedings of the Seventh Symposium on Operating Systems Principles, 10.-12.12.1979 in Pacific Grove, New York 1979, S. 24-32.

Böhling (1974)

Böhling, K.H.; von Braunmühl, B.: Komplexität bei Turingmaschinen, Mannheim - Wien - Zürich 1974.

Bötzow (1988a)

Bötzow, H.: Die Fertigungsinsel als Konzept zur Einführung flexibler Automation in mittelständischen Industriebetrieben der Einzel- und Kleinserienfertigung, Dissertation, Universität Köln 1987, Düsseldorf 1988.

Bolle (1980)

Bolle, H.; Becker, P.-J.: Volumenholographischer Assoziativspeicher: Systemaufbau und Anwendungen; in: FhG-Berichte, o.Jg. (1980), Heft 2, S. 59-62.

Bossi (1989)

Bossi, A.; Cocco N.: Verifying correctness of logic programs; in: Diaz, J.; Orejas, F. (Hrsg.): TAPSOFT'89, Proceedings of the International Joint Conference on Theory and Practice of Software Development, 13.-17.03.1989 in Barcelona, Volume 2: Advanced Seminar on Foundations of Innovative Software Development II and Colloquium on Current Issues in Programming Languages (CC IPL), Lecture Notes in Computer Science 352, Berlin - Heidelberg - New York ... 1989, S. 96-110.

Boussin (1978)

Boussin, J.L.: Synthesis and Analysis of Logic Automation Systems; in: o.V.: Proceedings of the 7th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, im Juni 1978 in Helsinki, Oxford - New York 1978, S. 1527-1535.

Braybrooke (1963)

Braybrooke, D.; Lindblom, C.E.: A Strategy of Decision - Policy Evaluation as a Social Process, Glencoe - London 1963.

Brenig (1990)

Brenig, H.: Informationsflußbezogene Schnittstellen bei industriellen Produktionsprozessen; in: Information Management, 5. Jg. (1990), Heft 1, S. 28-38.

Bretschneider (1980a)

Bretschneider, G.: Petrinetze - Ein leicht verständliches Verfahren zum Systementwurf, München 1980.

Bretschneider (1980c)

Bretschneider, G.: Petri Heil! Folge 3; in: Computerwoche, Jg. 1980, Nr. 26, S. 41-42.

Bretschneider (1980d)

Bretschneider, G.: Petri Heil! Folge 4; in: Computerwoche, Nr. 27, S. 24-25.

Bretzke (1980)

Bretzke, W.-R.: Der Problembezug von Entscheidungsmodellen, Habilitationsschrift, Universität Köln 1979, Tübingen 1980.

Brown, C.A. (1981)

Brown, C.A.; Purdom, P.W.: How to Search Efficiently; in: Drinan, A. (Hrsg.): Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-81, 24.-28.08.1981 in Vancouver, o.O. (Menlo Park) 1981, S. 588-594.

Brucker (1981)

Brucker, P.: Scheduling, Wiesbaden 1981.

Buchmann (1982b)

Buchmann, W.: Realisierung von Programmsystemen zur belastungsorientierten Fertigungssteuerung; in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, 77. Jg. (1982), S. 590-594.

Budinas (1989)

Budinas, B.L.: Decidability of the Petri net Reachability Problem; in: Automation and Remote Control, Vol. 49 (1989), S. 1393-1422.

Bus (1982)

Bus, J.C.P.: Some Comments on Recent Computational Testing in Mathematical Programming; in: Mulvey, J.M. (Hrsg.): Evaluating Mathematical Programming Techniques, Proceedings of a Conference, Held at the National Bureau of Standards, 5.-6.01.1981 in Boulder, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 199, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 170-173.

Busch, R. (1977)

Busch, R.: Entwurf und Darstellung von Lösungsspielräumen bei Zuordnungsproblemen mit Hilfe der losen Kopplung, Dissertation, Universität Bonn, Bonn 1977.

Byrn (1974)

Byrn, W.H.: Sequential Processes, Deadlocks, and Semaphore Primitives, Dissertation, Department of Applied Mathematics, Harvard University, Cambridge (Massachusetts) 1974.

Cardoza (1976)

Cardoza, E.; Lipton, R.; Meyer, A.R.: Exponential Space Complete Problems for Petri Nets and Commutative Semigroups: Preliminary Report; in: o.V.: Conference Record of The Eighth Annual ACM Symposium on Theory of Computing, Papers presented at the Symposium, 3.-5.05.1976 in Hershey, New York 1976, S. 50-54.

Carnap (1959a)

Carnap, C.: Induktive Logik und Wahrscheinlichkeit, bearbeitet von W. Stegmüller, Wien 1959.

Carnap (1961)

Carnap, R.: Der logische Aufbau der Welt - Scheinprobleme in der Philosophie, 2. Aufl., Hamburg 1961.

Carnap (1968)

Carnap, R.: Logische Syntax der Sprache, 2. Aufl., Wien - New York 1968.

Carstensen (1982)

Carstensen, H.: Fairness bei Petrinetzen mit unendlichem Verhalten, Bericht Nr. 93 am Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Hamburg 1982.

Cavarroc (1974)

Cavarroc, J.C.; Blanchard, M.; Gillon, J.: An Approach to the Modular Design of Industrial Switching Systems; in: o.V.: Discrete Systems, Papers from an International Symposium, 30.09.-4.10.1974 in Riga, o.O. 1974, S. 93-102.

Chalmers (1986)

Chalmers, A.F.: Wege der Wissenschaft - Einführung in die Wissenschaftstheorie, Berlin - Heidelberg - New York ... 1986.

Chapanis (1991)

Chapanis, A.: Evaluating Usability; in: Shackel, B.; Richardson, S.J. (Hrsg.): Human Factors for Informatics Usability, Cambridge (Großbritannien) - New York - Port Chester ... 1991, S. 359-395.

Checkland (1981)

Checkland, P.: Systems Thinking, Systems Practice, Chichester - New York - Brisbane ... 1981.

Checkland (1985)

Checkland, P.: The Approach to Plural Rationality Through Soft Systems Methodology; in: Grauer, M.; Thompson, M.; Wierzbicki, A.P. (Hrsg.): Plural Rationality and Interactive Decision Processes, Proceedings of an IISA Summer Study on Plural Rationality and Interactive Decision Processes, 16.-26.08.1984 in Sopron, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 248, Berlin - Heidelberg - New York ... 1985, S. 8-21.

Checkland (1987)

Checkland, P.: Weiches Systemdenken - Aus Optimieren wird Lernen: eine Weiterentwicklung des Systemdenkens für die neunziger Jahre; in: Die Unternehmung, 41. Jg. (1987), S. 117-133.

Chmielewicz (1979)

Chmielewicz, K.: Forschungskonzeptionen der Wirtschaftswissenschaft, 2. Aufl., Stuttgart 1979.

Christodoulakis (1982)

Christodoulakis, D.; Moritz, M.: Net Morphisms and Software Engineering; in: Girault, C.; Reisig, W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 111-117.

Cohen, M. (1976)

Cohen, M.D.; March, J.G.; Olsen, J.P.: People, Problems, Solutions, and the Ambiguity of Relevance; in: March, J.G.; Olsen, J.P. (Hrsg.): Ambiguity and Choice in Organizations, Bergen 1976, S. 24-37.

Cohen, M. (1990)

Cohen, M.D.; March, J.G.; Olsen, J.P.: Ein Papierkorb-Modell für organisatorisches Wahlverhalten; in: March, J.G. (Hrsg.): Entscheidung und Organisation - Kritische und konstruktive Beiträge, Entwicklungen und Perspektiven, Wiesbaden 1990, S. 329-372.

Cook, S. (1973)

Cook, S.A.: An Observation on Time-Storage Trade Off; in: o.V.: Conference Record of the 5th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, New York 1973, S. 29-33.

Cook, S. (1983)

Cook, S.A.: An Overview of Computational Complexity; in: Communications of the ACM, Vol. 26 (1983), 401-408.

Coomann (1983)

Coomann, H.: Die Kohärenztheorie der Wahrheit - Eine kritische Darstellung der Theorie Reschers vor ihrem historischen Hintergrund, Dissertation, Universität Düsseldorf, Frankfurt - Bern - New York 1983.

Coopriider (1976)

Coopriider, L.W.: Petri Nets and the Representation of Standard Synchronizations, Department of Computer Science, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1976.

Corsten (1990b)

Corsten, H.C.: Betriebswirtschaftslehre der Dienstleistungsunternehmen - Einführung, 2. Aufl., München - Wien 1990.

Cotronis (1977)

Cotronis, J.Y.; Lauer, P.E.: Verification of Concurrent Systems of Processes; in: Morlet, E.; Ribbens, D. (Hrsg.): Proceedings of the International Computing Symposium 1977, 4.-7.04.1977 in Liege, Amsterdam - New York - Oxford 1977, S. 197-207.

Courvoisier (1974c)

Courvoisier, M.; Escourrou, A.: Description Language and Realization Method for Simultaneous Event Asynchronous Logical Control Systems; in: o.V.: Discrete Systems, Papers from an International Symposium, 30.09.-4.10.1974 in Riga, o.O. 1974, S. 142-153.

Courvoisier (1977a)

Courvoisier, M.; Valette, R.: Description and Realization of Parallel Control Systems; in: o.V.: 15th IEEE Computer Society International Conference: Micros, Minis, and Maxies, Digest of Papers, Washington 1977, S. 167-172.

Courvoisier (1977b)

Courvoisier, M.: A Parallel Asynchronous Architecture for Control Systems; in: o.V.: Proceedings of the 2nd IFAC International Symposium on Discrete Systems, im März 1977 in Dresden, o.O. 1977, S. 139-151.

Courvoisier (1983)

Courvoisier, M.: A Matrix-Based Implementation of Generalized Petri Nets; in: Pagnoni, A.; Rozenberg, G. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the 3rd European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 27.-30.09.1982 in Varenna, Informatik-Fachberichte 66, Berlin - Heidelberg - New York 1983, S. 60-73.

Cox, L. (1978)

Cox, L.A.: Predicting Concurrent Computer System Performance Using Petri-Net Models; in: o.V.: Proceedings of the ACM Annual National Conference, 4.-6.12.1978, Washington 1978, S. 901-906.

Crespi-Reghizzi (1974)

Crespi-Reghizzi, S.; Mandrioli, D.: Petri Nets and Commutative Grammars, Rapporto interno n. 74-5 am Laboratorio di Calcolatori, Istituto di Elettrotecnica ed Elettronica, Politecnico di Milano, Mailand 1974.

Crespi-Reghizzi (1976a)

Crespi-Reghizzi, S.; Mandrioli, D.: Some Algebraic Properties of Petri Nets; in: Alta Frequenza, Vol. 45 (1976), N. 2, S. 130-137.

Crespi-Reghizzi (1977)

Crespi-Reghizzi,S.; Mabdrili,D.: Petri Nets and Szilard Languages; in: Information and Control, Vol. 33 (1977), S. 177-192.

Czeranowsky (1980)

Czeranowsky,G.: Grundsätzliche Überlegungen bei der Auswahl adäquater Modellformulierungen; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 50. Jg. (1980), S. 53-58.

Dadda (1976a)

Dadda,L.: On the Simulation of Petri-Nets As a Control Tool; in: Euromicro (Newsletter), Vol. 2 (1976), S. 38-45.

Dadda (1976c)

Dadda,L.: Programming methods for simulated Petri networks as control tool; in: Rivista di informatica, Vol. VI (1976), No. 1/2, S. 49-64.

Dadda (1977b)

Dadda,L.: Petri-Nets for Controlling and Synchronizing Complex Asynchronous Operations; in: Euromicro (Newsletter), Vol. 3 (1977), S. 7-26.

Dantzig (1966)

Dantzig,G.B.: Lineare Programmierung und Erweiterungen, Berlin - Heidelberg - New York 1966.

De Cindio (1982)

De Cindio,F.; De Michelis,G.; Pomello,L.; Simone,S.: Superposed Automata Nets; in: Girault,C.; Reising,W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 269-279.

De Cindio (1983b)

De Cindio,F.; De Michelis,G.; Pomello,L.; Simone,C.: Milner's Communicating Systems and Petri Nets; in: Pagnoni,A.; Rozenberg,G. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the 3rd European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 27.-30.09.1982 in Varenna, Informatik-Fachberichte 66, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1983, S. 40-59.

Delahaye (1987)

Delahaye,J.-P.: Formal Methods in Artificial Intelligence, Oxford 1987.

Devy (1979)

Devy,M.; Diaz,M.: Multilevel Description and Validation of the Control in Communication Systems; in: o.V.: Proceedings of the 1st International Conference on Distributed Computing Systems, 1.-5.10.1979 in Huntsville, New York 1979, S. 43-50.

DIN 66252 (1978)

Normenausschuß Informationsverarbeitung (FNI) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 66252 Teil 1: Informationsverarbeitung, Programmiersprache PEARL, Basic PEARL, Entwurf Juni 1978, Berlin - Köln 1978.

Dinkelbach (1969)

Dinkelbach,W.: Sensitivitätsanalysen und parametrische Programmierung, Habilitationsschrift (überarbeitete Fassung), Universität Köln 1967, Berlin - Heidelberg - New York 1969.

Dinkelbach (1976)

Dinkelbach,W.: Sensitivitätsanalysen; in: Grochla,E.; Wittmann,W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, 4. Aufl., Stuttgart 1976, Sp. 3530-3536.

Dinkelbach (1982)

Dinkelbach,W.: Entscheidungsmodelle, Berlin - New York 1982.

Diruf (1980b)

Diruf,G.: Kostenanalyse eines zweistufigen Müllentsorgungssystems mit Hilfe eines Grobmodells; in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 32. Jg. (1980), S. 419-429.

Diruf (1983)

Diruf,G.: Strategisch-logistische Müllentsorgungs-Planung mit einem lernorientierten Modellsystem; in: Bühler,W.; Fleischmann,B.; Schuster,K.P.; Streitferdt,L.; Zander,H. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 1982, DGOR - Vorträge der 11. Jahrestagung, 22.-24.09.1982 in Frankfurt, Berlin - Heidelberg - New York 1983, S. 237-247.

Diruf (1984)

Diruf,G.: Modell- und computergestützte Gestaltung physischer Distributionssysteme; in: Albach,H. (Schriftleitung): Unternehmensführung und Logistik, Ergänzungsheft 2/84 zu: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Wiesbaden 1984, S. 114-130.

Dittrich,G. (1989b)

Dittrich,G.; Evertz-Jägers,B.: Der Kanal-Instanz-Netz Editor KINED - Ein Tool zur Unterstützung einer methodischen Systemmodellierung mit Hilfe von hierarchisch dargestellten Kanal-Instanz-Netzen, Forschungsbericht Nr. 308, Fachbereich Informatik, Universität Dortmund, Dortmund o.J. (1989).

Dörnhöfer (1991)

Dörnhöfer,K.: Graphische Modellierung betriebswirtschaftlicher Strukturen; in: Biethahn,J.; Hummeltenberg,W.; Schmidt,B. (Hrsg.): Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe, Band 2, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991, S. 125-136.

Drexl (1990a)

Drexl,A.: Job-Processor-Scheduling für heterogene Computernetzwerke; in: Wirtschaftsinformatik, 32. Jg. (1990), S. 345-351.

Dworatschek (1985)

Dworatschek,S.; Höcker,H.: Möglichkeiten einer Bewertung software-technologischer Methoden; in: Angewandte Informatik, 27. Jg. (1985), S. 183-190.

Ebert,J. (1981)

Ebert,J.; Perl,J.: Reachability Homomorphisms on Nets; in: Noltemeier,H. (Hrsg.): Graphtheoretic Concepts in Computer Science, Proceedings of the International Workshop WG 80, 15.-18.06.1980 in Bad Honnef, Lecture Notes in Computer Science 100, Berlin - Heidelberg - New York 1981, S. 326-334.

Ecker (1977)

Ecker,K.: Organisation von parallelen Prozessen - Theorie deterministischer Schedules, Mannheim - Wien - Zürich 1977.

Eekhoff (1978)

Eekhoff,J.; Schellhaass,H.: Einige Anwendungsprobleme der Nutzwertanalyse; in: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 49. Jg. (1978), S. 83-93.

Eekhoff (1981a)

Eekhoff,J.: Verstärkte Wirkungsanalyse als Alternative zur "Perfektionierung" der Nutzwertanalyse; in: Institut für Regionalwissenschaft der Universität Karlsruhe (Hrsg.): Kritik der Nutzwertanalyse, IfR Diskussionspapier Nr. 11, o.O. (Karlsruhe) 1981, S. 38-58.

Eggert (1978)

Eggert,H.: Eine Anwendung von Petri-Netzen für eine partielle Prozeßbeschreibung und deren Abbildung auf Echtzeitelemente von PEARL (Die Automatisierung eines technischen Prozesses zur Bierherstellung mit einer Prozeßdatenverarbeitungsanlage), Dissertation, Technische Universität Berlin 1978, zugleich: Bericht KfK-PDV 166, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1978.

Ellinger (1977a)

Ellinger,T.; Wildemann,H.: Zielorientierte Produktionsplanung und Produktionssteuerung - Betriebswirtschaftlich und technologisch begründete Zielsetzungen für Entscheidungen über die Gestaltung und Bewertung von Produktionsplanungs- (und) Produktionssteuerungssystemen, Arbeitsbericht Nr. 6, Industrieseminar, Universität Köln, Köln 1977. (Anmk. des Verf.: "und" fehlt auf der Titelseite.)

Ellinger (1977b)

Ellinger,T.; Schmitz,P.; Bous,H.; Hasenkamp,U.; Linnartz,W.: Ein Generatorsystem für die Simulation von Reihenfolgeproblemen; in: Angewandte Informatik, 19. Jg. (1977), S. 422-430.

Ellinger (1977c)

Ellinger,T.; Wildemann,H.: Investitionsentscheidungsprozeß für Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungssysteme - Die Ermittlung von Kosten und Leistungspotentialen zur Vorbereitung von Investitionsentscheidungen über Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungssysteme, Arbeitsbericht Nr. 11, Seminar für Allgemeine und Industrielle Betriebswirtschaftslehre, Universität Köln, Köln o.J. (1977).

Ellinger (1978c)

Ellinger,T.; Schmitz,P.: Simulationssystem für Reihenfolgeprobleme der industriellen Fertigung; in: Rationalisierung, 29. Jg. (1978), S. 17-21.

Ellinger (1978d)

Ellinger,T.; Schmitz,P.: Simulationssystem für Reihenfolgeprobleme der industriellen Fertigung (II); in: Rationalisierung, 29. Jg. (1978), S. 43-45.

Ellinger (1978e)

Ellinger,T.; Wildemann,H.: Planung und Steuerung der Produktion - aus betriebswirtschaftlich-technologischer Sicht, Wiesbaden 1978.

Ellinger (1979)

Ellinger,T.; Schmitz,P.; Bons,H.; Goldbecker,H.; Hasenkamp,U.; Haupt,R.; Linnartz,W.; van Megen,R.; Oellers,B.; Ortman,L.: Generatorsystem zur Simulation von Reihenfolgeproblemen (SIRE), Köln 1978, hrsg. vom Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht DV 79-03, Eggenstein-Leopoldshafen 1979.

Ellinger (1985)

Ellinger,E.; Wildemann,H.: Planung und Steuerung der Produktion aus betriebswirtschaftlicher Sicht, 2. Aufl. München 1985.

Ellinger (1990a)

Ellinger,T.: Operations Research - Eine Einführung, 3. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York ... 1990.

Ellis,C.J. (1979)

Ellis,C.J.: The Design and Evaluation of Algorithms for Parallel Processing, Dissertation an der University of Washington, Washington 1979.

Elmaghraby (1964)

Elmaghraby,S.E.: An Algebra for the Analysis of Generalized Activity Networks; in: Management Science, Vol. 10 (1964), S. 494-514.

Elmaghraby (1977)

Elmaghraby,S.E.: Activity Networks: Project Planning and Control by Network Models, New York - London - Sydney ... 1977.

Encarnacao (1988)

Encarnacao,J.; Straßer,W.: Computer Graphics - Gerätetechnik, Programmierung und Anwendung graphischer Systeme, 3. Aufl., München - Wien 1988.

Eschenbacher (1991)

Eschenbacher,P.: Formulierung transactions-orientierter Modelle mit der systemtheoretischen Beschreibungssprache SIMPLEX-MDL; in: Biethahn,J.; Hummeltenberg,W.; Schmidt,B. (Hrsg.): Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe, Band 2, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991, S. 221-235.

Esser,H. (1977a)

Esser,H.; Klenovits,K.; Zehnpfennig: Wissenschaftstheorie 1: Grundlagen und Analytische Wissenschaftstheorie, Stuttgart 1977.

Essler (1975)

Essler,W.K.: Willard Van Orman Quine: Empirismus auf pragmatischer Grundlage; in: Speck,J. (Hrsg.): Grundprobleme der großen Philosophen - Philosophie der Gegenwart III, Göttingen 1975, S. 87-125.

Ester (1989)

Ester,M.: Konsistenzwerkzeuge für PROLOG-Wissensbasen, Dissertation, Technische Hochschule Zürich, Zürich 1989.

Estraillier (1982c)

Estraillier,P.; Girault,C.: Petri Net Specification of a New Protocol for Controlling a Distributed System Organization; in: o.V.: Proceedings of the 3rd International Conference on Distributed Computing Systems, 18.-22.10.1982 in Miami, Los Alamitos 1982, S. 654-659.

Eversheim (1990c)

Eversheim,W.; Schuh,G.; Caesar,C.: Produkt- und Produktionscontrolling innerhalb integrierter Produktionssysteme; in: Ahlert,D.; Franz,K.-P.; Göppl,H. (Hrsg.): Finanz- und Rechnungswesen als Führungsinstrument, Herbert Vormbaum zum 65. Geburtstag, Wiesbaden 1990, S. 73-107.

Fandel (1991a)

Fandel,G.: Produktion I - Produktions- und Kostentheorie, 3. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York ... 1991.

Fehling (1990a)

Fehling,R.: Hierarchische Petrinetze - Idee und grundlegende Struktur, Forschungsbericht Nr. 344, Fachbereich Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1990.

Fehling (1990b)

Fehling,R.; Zelewski,S.: Schriftwechsel zur Thematik "Schaltverhalten von Petrilab", Dortmund - Köln 1990.

Fehling (1991)

Fehling,R.: A Concept of Hierarchical Petri Nets with Building Blocks; in: o.V.: Application and Theory of Petri Nets - 12th International Conference, 26.-28.06.1991 in Gjern, o.O. 1991, S. 370-389.

Feiner (1988)

Feiner,S.: Seeing the Forest for the Trees: Hierarchical Display of Hypertext Structure; in: Allen, R.B. (Hrsg.): Conference on Office Information Systems, 23.-25.03.1988 in Palo Alto, New York 1988, S. 205-212.

Fernandez (1975)

Fernandez,C.: Net Topology I, Interner Bericht ISF-75-9, Institut für Informationssystemforschung, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1975.

Ferstl (1979)

Ferstl,O.K.: Konstruktion und Analyse von Simulationsmodellen, Dissertation, Universität Regensburg 1979, Königstein 1979.

Fidelak (1988b)

Fidelak,M.; Lischka,C.; Voß,H.: Repräsentation der Dynamik technisch-physikalischer Systeme; in: Hoschka,P. (Hrsg.): Forschungsgruppe Expertensysteme - Aus der Arbeit der Forschungsgruppe Expertensysteme, Arbeitspapiere der GMD 337, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1988, 5. Beitrag.

Finkel (1987b)

Finkel,A.: A Generalization of the Procedure of Karp and Miller to Well Structured Transition Systems; in: Ottmann,T. (Hrsg.): Automata, Languages and Programming, 14th International Colloquium, 13.-17.07.1987 in Karlsruhe, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science 267, Berlin - Heidelberg - New York ... 1987, S. 499-508.

Fischer,J. (1981)

Fischer,J.: Heuristische Investitionsplanung - Entscheidungshilfen für die Praxis, Dissertation, Technische Universität Berlin (1980), Berlin 1981.

Fischer,R. (1990)

Fischer,R.: Workgroup-Computing - Die Kooperationsverstärker; in: PC Magazin, o.Jg. (1990), Nr. 51, S. 60-64.

Fischer,R. (1991)

Fischer,R.: "Text gefunden - vergessen warum"; in: PC Magazin, o.Jg. (1991), Nr. 5, S. 64-65.

Fischer-Winkelmann (1971)

Fischer-Winkelmann,W.F.: Methodologie der Betriebswirtschaftslehre, München 1971.

Frank,J. (1976)

Frank,J.: Selektion von Standard-Software, Kriterien und Methoden zur Beurteilung und Auswahl von Software-Produkten, Dissertation, Universität Köln, Köln 1976.

Fraunhofer-Institut für Systemtechnik (1982)

Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI); Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB); Institut für Werkzeugmaschinen- und Fertigungstechnik (IWF): Der Einsatz flexibler Fertigungssysteme - Technische, einführungsorganisatorische, wirtschaftliche und arbeitsplatzbezogene Aspekte, Forschungsbericht KfK-PFT 41, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1982.

Freedman (1988b)

Freedman,P.; Malowany,A.: SAGE: A Decision Support System for the Sequencing of Operations within a Robotic Workcell; in: Decision Support Systems, Vol. 4 (1988), S. 329-343.

Gaitanides (1979b)

Gaitanides,M.: Konstruktion von Entscheidungsmodellen und 'Fehler dritter Art'; in: Wirtschaftswissenschaftliches Studium, 8. Jg. (1979), S. 8-12.

Garey (1979)

Garey,M.R.; Johnson,D.S.: Computers and Intractability - A Guide to the Theory of NP-Completeness, San Francisco 1979.

Gelenbe (1982)

Gelenbe,E.: Stationary Properties of Timed Vector Addition Systems; in: Dempster,M.A.H.; Lenstra,J.K.; Rinnooy Kan,A.H.G. (Hrsg.): Deterministic and Stochastic Scheduling, Proceedings of the NATO Advanced Study and Research Institute on Theoretical Approaches to Scheduling Problems, 6.-17.07.1981 in Durham, Dordrecht - Boston - London 1982, S. 223-232.

Genrich (1976a)

Genrich,H.J.; Thieler-Mevissen,G.: The Calculus of Facts; in: Mazurkiewicz,A. (Hrsg.): Mathematical Foundations of Computer Science 1976, Proceedings, 5th Symposium, 6.-10.09.1976 in Gdansk, Lecture Notes in Computer Science 45, Berlin - Heidelberg - New York 1976, S. 588-595.

Genrich (1976b)

Genrich,H.J.: The Petri Net Representation of Mathematical Knowledge, Interner Bericht ISF-76-5, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1976.

Genrich (1977)

Genrich,H.J.: Appendix on Petri Nets; in: Wegner,E.; Hopmann,C.: Semantics of a Language for Describing Systems and Processes, Bericht Nr. 36, Institut für Software-Technologie, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1977, S. 37-42.

Genrich (1978a)

Genrich,H.J.; Lautenbach,K.: Facts in Place/Transition Nets; in: Winkowski,J. (Hrsg.): Mathematical Foundation of Computer Science 1978, Proceedings on the 7th Symposium, 4.-8.09.1978 in Zakopane, Lecture Notes in Computer Science 64, Berlin - Heidelberg - New York 1978, S. 213-231.

Genrich (1978b)

Genrich,H.J.; Thiagarajan,P.S.: Net Progress; in: Computing Surveys, Vol. 10 (1978), S. 84-85.

Genrich (1979a)

Genrich,H.J.; Lautenbach,K.: The Analysis of Distributed Systems by Means of Predicate/Transitions-Nets; in: Kahn,G. (Hrsg.): Semantics of Concurrent Computation, Proceedings of the International Symposium, 2.-4.07.1979 in Evian, Lecture Notes in Computer Science 70, Berlin - Heidelberg - New York 1979, S. 123-146.

Genrich (1980a)

Genrich,H.J.; Lautenbach,K.; Thiagarajan,P.S.: Elements of General Net Theory; in: Brauer,W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg -New York 1980, S. 21-164.

Genrich (1980b)

Genrich,H.J.; Stankiewicz-Wiechno,E.: A Dictionary of Some Basic Notions of Net Theory; in: Brauer,W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg -New York 1980, S. 519-531.

Genrich (1980c)

Genrich,H.J.; Lautenbach,K.; Thiagarajan,P.S.: Substitution Systems - A Family of System Models Based on Concurrency; in: Dembinski,P. (Hrsg.): Mathematical Foundations of Computer Science 1980, Proceedings of the 9th Symposium, 1.-5.09.1980 in Rydzyna, Lecture Notes in Computer Science 88, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 698-723.

Genrich (1982b)

Genrich,H.J.; Thiagarajan,P.S.: Well-Formed Flow Charts for Concurrent Programming, 2. Aufl., ISF-Report 81.03, Institut für Informationssystemforschung, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1982.

Genrich (1983a)

Genrich,H.J.: Diskussionsbeiträge anlässlich: 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-29.09.1983 in Toulouse.

Genrich (1988b)

Genrich,H.J.: Equivalence Transformations of PrT-Nets; in: o.V.: Application and Theory of Petri Nets - 9th European Workshop, 22.-24.06.1988 in Venedig, o.O. 1988, Vol. I, S. 229-248.

Geoffrion (1980)

Geoffrion,A.M.; Powers,R.F.: Facility Location Analysis is Just the Right Beginning (If You Do it Right); in: Interfaces, Vol. 10 (1980), No. 2, S. 22-30.

Gernert (1982)

Gernert,D.: Structural Modifications in Net Theory; in: Girault,C.; Reisig,W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 151-153.

Ghosh,S. (1977)

Ghosh,S.: Structured Petri Nets, Bericht Nr. 49/77, Abteilung Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1977.

Girault (1982a)

Girault,C.: Modelisation des Systemes Paralleles, D.E.A. de Systemes Informatiques, Institut de Programmation, Universite Pierre et Marie Curie, Paris 1982.

Glover (1990)

Glover,F.; Klingman,D.; Phillips,N.: Netform Modeling and Applications; in: Interfaces, Vol. 20 (1990), No. 4, S. 7-27.

Godbersen (1978)

Godbersen,H.P.; Meyer,B.E.: Function Nets as a Tool for the Simulation of Information Systems, Interner CIS-Bericht 3/78, Institut für Angewandte Informatik, Technische Universität Berlin, Berlin 1978. (Erschienen auch in: o.V.: Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, 24.-26.07.1978 in Newport Beach, o.O. o.J., S. 46-53.)

Godin (1978)

Godin,V.B.: Interactive Scheduling: Historical Survey and State of the Art; in: AIIE Transactions, Vol. 10 (1978), S. 331-337.

Götze,U. (1991)

Götze,U.: Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung, Dissertation, Universität Göttingen 1990, Wiesbaden 1991.

Gostelow (1971)

Gostelow,K.P.: Flow of Control, Resource Allocation, and the Proper Termination of Programs, Dissertation an der University of California, Los Angeles 1971.

Gostelow (1975)

Gostelow,K.P.: Computation Modules and Petri Nets; in: o.V.: Proceedings of the 3rd IEEE-ACM Milwaukee Symposium on Automatic Computation and Control, New York 1975, S. 345-353.

Gottschalk,W. (1977)

Gottschalk,W.: Petri-Netze in der Eisenbahnsignaltechnik; in: Siemens-Zeitschrift, 51. Jg. (1977), S. 876-879.

Grabowski, H. (1991a)

Grabowski, H.; Anderl, R.; Dienst, P.: Benchmarktests zur Untersuchung von CAD-Systemen, Teil 1: Vorgehensmodell für die Entwicklung und Durchführung von Benchmarktests; in: VDI-Z(eitschrift), Bd. 133 (1991), Nr. 5, S. 50-57.

Grabowski, H. (1991b)

Grabowski, H.; Anderl, R.; Dienst, P.; Hosenmann, T.: Benchmarktests zur Untersuchung von CAD-Systemen, Teil 2: Anwendung des Vorgehensmodells in der Praxis; in: VDI-Z(eitschrift), Bd. 133 (1991), Nr. 6, S. 150-156.

Grabowski, J. (1981a)

Grabowski, J.: On Partial Languages; in: Annales Societatis Mathematicae Polonae, Series 4: Fundamenta Informaticae, Vol. 4 (1981), S. 427-498.

Graefen (1991)

Graefen, R.: Monitore, Grafikkarten, Softwaretreiber, Anwendungen - Ein Weg durch den Grafikdschungel; in: PC Magazin, o.Jg. (1991), Nr. 7, S. 70-78.

Graham, N. (1983)

Graham, N.: Künstliche Intelligenz - Wie Sie Ihren Computer zum Denken bringen, Sprendlingen 1983.

Graubmann (1982b)

Graubmann, P.: Petrinetz-Entwicklungssystem PES, Sprachbeschreibung, Version 3.0, o.O. (München) 1982.

Griese, W. (1979)

Griese, W.: Lebendigkeit in NSK-Petri-Netzen, TUM-Info-7906, Institut für Informatik, Technische Universität München, München 1979.

Grill (1982)

Grill, E.: Design-Review by Petri-Nets; in: Girault, C.; Reisig, W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 38-44.

Grochla (1984)

Grochla, E.; Lehmann, H.; Renner, G.: Die Identifikation betrieblicher Systeme - Konzepte, Methoden und Vorgehensweisen -, Köln 1984.

Gruhler (1990)

Gruhler, W.: Dienstleistungsbestimmter Strukturwandel in deutschen Unternehmen - Einzel- und gesamtwirtschaftlicher Kontext, Determinanten, Interaktionen, empirischer Befund, Dissertation, Universität Köln, Köln 1990.

Haas (1987)

Haas, P.J.; Shedler, G.S.: Stochastic Petri Nets with Simultaneous Transition Firings; in: o.V.: International Workshop on Petri Nets and Performance Models, PNPM87, 24.-26.08.1987 in Madison, Washington 1987, S. 24-32.

Habermas (1986)

Habermas, J.: Entgegnung; in: Honneth, A.; Joas, H. (Hrsg.): Kommunikatives Handeln - Beiträge zu Jürgen Habermas' "Theorie des kommunikativen Handelns", Frankfurt 1986, S. 327-405.

Hack, M. (1972)

Hack, M.H.: Analysis of Production Schemata be Petri Nets, Master of Science Thesis, Department of Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Technical Report TR-94, Project MAC, Cambridge (Massachusetts) 1972.

Hack, M. (1974b)

Hack, M.: The Recursive Equivalence of the Reachability Problem And the Liveness Problem For Petri Nets And Vector Addition Systems; in: o.V.: Proceedings of the 15th Annual Symposium on Switching and Automata Theory, 14.-16.10.1974, New York 1974, S. 156-164.

Hack, M. (1975a)

Hack, M.H.T.: Decidability Questions For Petri Nets, Dissertation, Department of Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts) 1975.

Hack, M. (1975b)

Hack, M.: Petri Net Languages, Computation Structures Group Memo 124, Project MAC, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts) 1975.

Hackmann (1980a)

Hackmann, W.K.: Report on the "European Workshop on the Application and Theory of Petri Nets"; in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 6 (1980), S. 9-10.

Hackmann (1981)

Hackmann, o.Vn. (W.K.); Buchholz, o.Vn.: Petrinetze zur Kommunikation; in: Online, 19. Jg. (1981), Heft 5, S. 372.

Hackmann (1982)

Hackmann, W.K.: Systementwicklung mit Petrinetzen PET/PEM/PES: Ein Überblick, Bericht ZT ZTI SDF 1 der Siemens AG, München 1982.

Hahn, U. (1988a)

Hahn, U.; Jarke, M.: A Multi-Agent Reasoning Model for Negotiation Support, Bericht MIP-8804, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Passau, Passau 1988.

Hahn, U. (1989a)

Hahn, U.: Dialogstrukturen in Gruppendiskussionen - Ein Modell für argumentative Verhandlungen mehrerer Agenten, Bericht MIP-8921, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Passau, Passau 1989.

Hahn, U. (1989b)

Hahn, U.: Dialogstrukturen in Gruppendiskussionen - Ein Modell für argumentative Verhandlungen mehrerer Agenten; in: Metzger, D. (Hrsg.): GWAI-89, 13th German Workshop on Artificial Intelligence, 18.-22.09.1989 in Eringerfeld, Proceedings, Informatik-Fachberichte 216, Berlin - Heidelberg - New York ... 1989, S. 409-420.

Hahn, U. (1990b)

Hahn, U.; Jarke, M.; Rose, T.: Group Work in Software Projects: Integrated Conceptual Models and Collaboration Tools, Bericht MIP-9004, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Passau, Passau 1990. (Auch veröffentlicht in: Gibbs, S.; Verrijn-Stuart, A.A. (Hrsg.): Multi-User Interfaces and Applications, Proceedings of the IFIP WG 8.4 Conference, 24.-26.09.1990 in Heraklion, Amsterdam - New York - Oxford 1990, S. 83-101.)

Hall, N. (1986)

Hall, N.G.; Rhee, W.T.: Average and worst-case analysis of heuristics for the maximum tardiness problem; in: European Journal of Operational Research, Vol. 26 (1986), S. 272-277.

Han (1978a)

Han, Y.W.: Performance Evaluation of a Digital System Using a Petri Net-Like Approach; in: Tranter, W.H. (Hrsg.): Proceedings of the National Electronics Conference, Vol. 32, 16.-18.10.1978 in Chicago, Oak Brook 1978, S. 166-172.

Han (1979)

Han, Y.-W.: Petri Nets for Distributed Digital System Modeling and Evaluation; in: o.V.: Proceedings of the 12th Hawaii International Conference on System Sciences, North Hollywood 1979, S. 270-279.

Hansen, N. (1983)

Hansen, N.D.; Madsen, K.H.: Formal Semantics by a Combination of Denotational Semantics and High-Level Petri Nets; in: Pagnoni, A.; Rozenberg, G. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the 3rd European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 27.-30.09.1982 in Varenna, Informatik-Fachberichte 66, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1983, S. 132-148. (Auch erschienen als: Bericht DAIMI PB-152, Computer Science Department, Aarhus University, Aarhus 1982.)

Hartwich (1989)

Hartwich, G.: Entwicklungstendenzen für eine Fabrik mit Zukunft - Neue Fabriktechniken in Europa'92 -; in: Wildemann, H.; Westkämper, E. (Hrsg.): Fabrikstrukturierung Europa'92, Tagungsbericht, 16.-17.11.1989 in Frankfurt, München 1989, S. 519-538.

Hasenkamp (1987)

Hasenkamp,U.: Konzipierung eines Bürovorgangssystems - Informations- und Kommunikationstechnik zur aktiven Steuerung von Bürovorgängen, Habilitationsschrift, Universität Köln, Köln 1987.

Haug (1989b)

Haug,H.: Workstation-Markt in Bewegung: Heißer Tanz auf den Schreibtischen; in: computer magazin, 18. Jg. (1989), Heft 9, S. 36-37.

Haun (1990)

Haun,P.: Einsatz von Arbeitsplatzrechnern zur betriebswirtschaftlichen Planung und Entscheidungsunterstützung; in: Kostenrechnungspraxis, o.Jg. (1990), Sonderheft 1/90, S. 14-20.

Hax,H. (1974)

Hax,H.: Entscheidungsmodelle in der Unternehmung - Einführung in Operations Research, Reinbek 1974.

Hefele (1990)

Hefele,J.: PPS-Ablauf auf Basis vernetzter PC's (File-Server-Konzept; in: in: Nechutniß,R. (Leitung): PPS - Produktionsplanung und -steuerung im CIM-Umfeld, Informationstagung, 10.-11.11.1990 in Wiesbaden, Frankfurt 1990, Beitrag Nr. 4.

Heidemann (1981)

Heidemann,C.: Die Nutzwertanalyse - Ein Beispiel für Magien und Mythen in der Entscheidungsdogmatik; in: Institut für Regionalwissenschaft der Universität Karlsruhe (Hrsg.): Kritik der Nutzwertanalyse, IfR Diskussionspapier Nr. 11, o.O. (Karlsruhe) 1981, S. 1-18.

Heimerdinger (1978)

Heimerdinger,W.L.: A Petri Net Approach to System Level Fault Tolerance Analysis; in: Tranter,W.H. (Hrsg.): Proceedings of the National Electronics Conference, Vol. 32, 16.-18.10.1978 in Chicago, Oak Brook 1978, S. 161-165.

Heinemann (1980)

Heinemann,B.: Teilklassen der selbst-modifizierenden Netze, Bericht Nr. 69 FBI-HH-B-69/80, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Hamburg 1980.

Heinemann (1982)

Heinemann,B.: Subclasses of Self-Modifying Nets; in: Girault,C.; Reisig,W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 187-192.

Heinen (1966)

Heinen,E.: Betriebswirtschaftslehre heute - Die Bedeutung der Entscheidungstheorie für Forschung und Praxis, Öffentlicher Vortrag, 01.02.1966 in München, Wiesbaden o.J. (1966).

Heinrich,G. (1990)

Heinrich,G.: Strategischer Wandel; in: PC Magazin, o.Jg. (1990), Nr. 44, S. 114-121.

Helberg (1987)

Helberg,P.: PPS als CIM-Baustein - Gestaltung der Produktionsplanung und -steuerung für die computerintegrierte Produktion, Berlin 1987.

Helmer (1959)

Helmer,O.; Rescher,N.: On the Epistemology of the Inexact Sciences; in: Management Science, Vol. 6 (1959/60), No. 1 (1959), S. 25-52.

Henrion (1978)

Henrion,M.: Automatic Space-Planning: A Postmortem?; in: Latombe,J.-C. (Hrsg.): Artificial Intelligence and Pattern Recognition in Computer Aided Design, Proceedings of the Working Conference, 17.-19.03.1978 in Grenoble, Amsterdam - New York - Oxford 1978, S. 175-196.

Herrmann,T. (1976)

Herrmann,T.: Die Psychologie und ihre Forschungsprogramme, Göttingen - Toronto - Zürich ... 1976.

Herrmann, T. (1979)

Herrmann, T.: Zur Tauglichkeit psychologischer Theorien; in: Albert, H.; Stapf, K.H. (Hrsg.): Theorie und Erfahrung - Beiträge zur Grundlagenproblematik der Sozialwissenschaften, Stuttgart 1979, S. 195-217.

Herzog, O. (1973)

Herzog, O.: Petrinetze als Modelle für parallele Prozesse, im Auftrag der Firma ORGALOGIC/Köln erstellter Bericht, o.O. 1973.

Herzog, O. (1976a)

Herzog, O.: Kontrollstruktur-Netze: eine Darstellung paralleler Programme zur Deadlock-Analyse; in: Noltemeier, H. (Hrsg.): Graphen, Algorithmen, Datenstrukturen - Ergebnisse des Workshops WG 76, 2. Fachtagung über Graphentheoretische Konzepte der Informatik, 16.-18.06.1976 in Göttingen, München - Wien 1976, S. 297-314.

Herzog, O. (1976c)

Herzog, O.: Zur Analyse der Kontrollstruktur von parallelen Programmen mit Hilfe von Petri-Netzen, Dissertation an der Universität Dortmund, Bericht Nr. 24/76, Abteilung Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1976.

Herzog, O. (1983)

Herzog, O.: Beitrag zur Paneldiskussion, gehalten am 28.09.1983 in Toulouse anlässlich: 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets.

Heß-Kinzer (1974)

Heß-Kinzer, D.; Doering, K.: Grobtermin- und Kapazitätsplanung bei Einzel-, Serien- und Massenfertigung; in: Industrial Engineering, 4. Jg. (1974), S. 19-30.

Hettich (1979)

Hettich, G.O.: Entscheidungsprinzipien und Entscheidungsregeln bei mehrfacher Zielsetzung; in: Schanz, G. (Hrsg.): Betriebswirtschaftliche Gesetze, Effekte und Prinzipien, München 1979, S. 172-191.

Hiltz (1990)

Hiltz, S.R.; Johnson, K.: User satisfaction with Computer-Mediated Communication Systems; in: Management Science, Vol. 36 (1990), S. 739-764.

Hinderer (1982b)

Hinderer, W.: Treatment of recovery problems using cuts in Occurrence Nets; in: Girault, C.; Reisig, W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 234-239.

Hintz (1987)

Hintz, G.-W.: Ein wissensbasiertes System zur Produktionsplanung und -steuerung für flexible Fertigungssysteme, Dissertation, Universität Aachen, Düsseldorf 1987.

Hoch (1973)

Hoch, P.: Betriebswirtschaftliche Methoden und Zielkriterien der Reihenfolgeplanung bei Werkstatt- und Gruppenfertigung, Frankfurt - Zürich 1973.

Hoffmann, K. (1982)

Hoffmann, K.L.; Jackson, R.H.F.: In Pursuit of a Methodology for Testing Mathematical Programming Software; in: Mulvey, J.M. (Hrsg.): Evaluating Mathematical Programming Techniques, Proceedings of a Conference, 5.-6.01.1981 in Boulder, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 199, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 177-199.

Holt, A. (1968)

Holt, A.W. et al.: Information System Theory Project, Technical Report No. RAD-TR-68-305, Applied Data Research, Inc., Princeton 1968.

Holt, A. (1971)

Holt, A.W.: Introduction to Occurrence Systems; in: Jacks, E.L. (Hrsg.): Associative Information Techniques, New York 1971, S. 175-203.

Holt,A. (1975d)

Holt,A.W.: Communication Mechanics; in: Massachusetts Computer Associates, Inc. (Hrsg.): Second Semi-Annual Technical Report (1.12.1973-31.03.1975) for the Project "Development of Theoretical Foundations for Description and Analysis of Discrete Information Systems", Wakefield 1975, S. 156-176.

Holt,A. (1976)

Holt,A.W.: Formal Methods in System Analysis; in: Shaw,B. (Hrsg.): Computers and the Educated Individual, Proceedings of the Joint IBM University of Newcastle upon Tyne Seminar, 9.-12.09.1975 in Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne 1976, S. 135-179.

Holt,A. (1979)

Holt,A.W.: Net Models of Organizational Systems, in Theory and Practice; in: Petri,C.A. (Hrsg.): Ansätze zur Organisationstheorie Rechnergestützter Informationssysteme, Bericht Nr. 111, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, München - Wien 1979, S. 39-62.

Holub (1990)

Holub,H.-W.: Die PME-Ökonomik - Ein kleiner Beitrag zur jüngsten historischen Schule; in: Wirtschaftswissenschaftliches Studium, 19. Jg. (1990), S. 269.

Holzmann (1987)

Holzmann,G.J.: On Limits and Possibilities of Automated Protocol Analysis; in: Rudin,H.; West,C.H. (Hrsg.): Protocol Specification, Testing, and Verification, VII, Proceedings of the IFIP WG 6.1 International Workshop on Protocol Specification, Testing, and Verification, 05.-08.05.1987 in Zürich, Amsterdam 1987, S. 339-344.

Holzmann (1991)

Holzmann,G.J.: Design and Validation of Computer Protocols, London - Sydney - Toronto ... 1991.

Hopcroft (1974)

Hopcroft,J.E.: Complexity of Computer Computations; in: Rosenfeld,J.L. (Hrsg.): Information Processing 74, Proceedings of the IFIP Congress 1974, 05.-10.08.1974 in Stockholm, Amsterdam - London - New York 1974, S. 620-626.

Horkheimer (1969)

Horkheimer,M.; Adorno,T.W.: Dialektik der Aufklärung - Philosophische Fragmente, Frankfurt 1969.

Hormann,A. (1972)

Hormann,A.N.: Planning by Man-Machine Synergism; in: Sackman,H.; Citrenbaum,R.L. (Hrsg.): Online Planning - Towards Creative Problem-Solving, Englewood Cliffs 1972, S. 69-134.

Horvath (1983)

Horvath,P.; Petsch,M.; Weihe,M.: Standard-Anwendungssoftware für die Finanzbuchhaltung und die Kosten- und Leistungsrechnung, München 1983.

Hruschka (1980a)

Hruschka,P.; Kappatsch,A.: Formale Semantik von Realzeitsprachen mit Netz-attribuierten Grammatiken; in: Elektronische Rechenanlagen, 22. Jg. (1980), S. 267-275.

Hruschka (1980b)

Hruschka,P.; Kappatsch,A.; Kastens,U.: Net-Attributed Grammars, Bericht Nr. 16/80, Institut für Informatik II, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1980.

Hruschka (1980c)

Hruschka,P.: Netz-Attribut Grammatiken als formale Methode zur Definition von Programmiersprachen für parallele Prozesse, Dissertation, Universität Wien, Wien 1980.

Huber,G.P. (1983)

Huber,G.P.: Cognitive Style as a Basis for MIS and DSS Designs: Much Ado About Nothing?; in: Management Science, Vol. 29 (1983), S. 567-579.

Huckert (1991)

Huckert,K.: Zum Verbund von individueller und zentraler EDV (I); in: Das Wirtschaftsstudium, 20. Jg. (1991), S. 273-282.

Hura (1981a)

Hura,G.S.: A Petri Net Approach to Minimize ROM in Microprogrammed Digital Computers; in: Computers and Electrical Engineering, Vol. 8 (1981), S. 245-248.

Hura (1982c)

Hura,G.S.: Petri Net as a Modeling Tool; in: Microelectronics and Reliability, Vol. 22 (1982), S. 433-439.

Hwang,S. (1984)

Hwang,S.-L.; Barfield,W.; Chang,T.-C.; Salvendy,G.: Integration of humans and computers in the operation and control of flexible manufacturing systems; in: International Journal of Production Research, Vol. 22 (1984), S. 841-856.

Igel (1986b)

Igel,B.; Jungfermann,M.: Rechnergestützte graphische Spezifikation mit Kanal/Instanz-Netzen, Forschungsbericht Nr. 223, Abteilung Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1986.

Jackson,M.A. (1979)

Jackson,M.A.: Grundsätze des Programmierwurfs, Darmstadt 1979.

Jacobi (1991)

Jacobi,T.: Intelligente Grafikprozessoren - Neue Dimensionen erschließen; in: PC Magazin, o.Jg. (1991), Nr. 7, S. 58-60.

Jäger,P. (1982)

Jäger,P.K.: Modellmethodologie und optimale Bestellmenge - Grundriß einer Methodologie der Modellkonstruktion konkretisiert am Modell der optimalen Bestellmenge -, Dissertation, Universität Frankfurt, Frankfurt 1982.

Jähnichen (1990)

Jähnichen,S.; Bieler,F.; Burghardt,J. (Hrsg.): Seminar Spezifikationstechniken, Sommersemester 1989, GMD-Studien Nr. 176, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1990.

Janicki (1979)

Janicki,R.: A Characterization of Concurrency-Like Relations; in: Kahn,G. (Hrsg.): Semantics of Concurrent Computation, Proceedings of the International Symposium, 2.-4.07.1979 in Evian, Lecture Notes in Computer Science 70, Berlin - Heidelberg - New York 1979, S. 109-122.

Janicki (1980a)

Janicki,R.: An Algebraic Structure of Petri Nets; in: Robinet,B. (Hrsg.): International Symposium on Programming, Proceedings of the 4th 'Colloque International sur la Programmation', 22.-24.04.1980 in Paris, Lecture Notes in Computer Science 83, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 177-192.

Jehle (1973)

Jehle,E.: Über Fortschritt und Fortschrittskriterien in betriebswirtschaftlichen Theorien - Eine erkenntnis- und methodenkritische Bestandsaufnahme betriebswirtschaftlicher Forschungsprogramme, Dissertation, Universität Mannheim 1971, Stuttgart 1973.

Jensen (1979a)

Jensen,K.; Kyng,M.; Madsen,O.L.: A Petri Net Definition of a System Description Language; in: Kahn,G. (Hrsg.): Semantics of Concurrent Computation, Proceedings of the International Symposium, 2.-4.07.1979 in Evian, Lecture Notes in Computer Science 70, Berlin - Heidelberg - New York 1979, S. 348-368.

Jensen (1980b)

Jensen,K.: Coloured Petri Nets and the Invariant-Method, Report DAIMI PB-104, Computer Science Department, Aarhus University, Aarhus 1980.

Jensen (1981a)

Jensen,K.: A method to compare the descriptive power of different types of Petri nets, Report DAIMI PB-108, Computer Science Department, Aarhus University, Aarhus 1981. (Anmk. des Verf.: enthält die wesentlichen Ausführungen des nicht mehr aufgelegten Werks: Jensen,K.: Extended and Hyper Petri Nets, Report DAIMI PB-5, Computer Science Department, Aarhus University, Aarhus 1978.)

Johnson,R.R. (1982)

Johnson,R.R.: The Relationship Between Time and Information; in: Girault,C.; Reisig,W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 74-81.

Jones,N. (1977)

Jones,N.D.; Landweber,L.H.; Lien,Y.E.: Complexity of some problems in Petri Nets; in: Theoretical Computer Science, Vol. 4 (1977), S. 277-299.

Jordan (1978)

Jordan,W.; Urban,H.: Strukturierte Programmierung, Berlin - Heidelberg - New York 1978.

Kammüller (1991)

Kammüller,R.; Fedrowitz,C.-H.: Roboter menügesteuert programmieren; in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, 86. Jg. (1991), S. 41-44.

Kanitscheider (1971)

Kanitscheider,B.: Geometrie und Wirklichkeit, Berlin 1971.

Kay,A. (1984)

Kay,A.: Software; in: Spektrum der Wissenschaft, o.Jg. (1984), Heft 11, S. 34-43.

Keen (1978)

Keen,P.G.W.; Scott Morton,M.S.: Decision Support Systems - An Organizational Perspective, Reading - Menlo Park - London ... 1978.

Keller,R. (1975a)

Keller,R.M.: Generalized Petri Nets as Models for System Verification, Technical Report 202, Department of Electrical Engineering, Computer Science Laboratory, Princeton University, Princeton 1975.

Keramidis (1979)

Keramidis,S.; Grote,W.: Beiträge zur Lösung des Verklemmungsproblems in prioritätsfreien Betriebsmittelmaschinen und Petri-Netzen, Arbeitsberichte des Instituts für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung (Informatik), Universität Erlangen-Nürnberg, Bd. 12, Nr. 9, Erlangen 1979.

Kern,W. (1962b)

Kern,W.: Gestaltungsmöglichkeiten und Anwendungsbereich betriebswirtschaftlicher Planungsmodelle; in: Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung - Neue Folge, 14. Jg. (1962), S. 167-179.

Kern,W. (1967)

Kern,W.: Optimierungsverfahren in der Ablauforganisation - Gestaltungsmöglichkeiten mit Operations Research, Essen 1967.

Kern,W. (1977)

Kern,W.; Schröder,H.-H.: Forschung und Entwicklung in der Unternehmung, Reinbek 1977.

Kern,W. (1987)

Kern,W.: Operations Research - Einführung und Überblick, 6. Aufl., Stuttgart 1987.

Kern,W. (1990a)

Kern,W.: Industrielle Produktionswirtschaft, 4. Aufl., Stuttgart 1990.

Kern,W. (1991)

Kern,W.: Die Zeit als Dimension betriebswirtschaftlichen Denkens und Handelns, Arbeitsbericht Nr. 35, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1991.

Kießler (o.J.)

Kießler,G.: Petrinetz-Entwurfstechnologie, Bestandteil der Technologie komplexer Systeme (Basisinformation), AP-Bericht Nr. 34, Siemens AG, o.O. (München) o.J.

Kimm (1979)

Kimm,R.; Koch,W.; Simonsmeier,W.; Tontsch,F.: Einführung in Software Engineering, Berlin - New York 1979.

Kinney (1976)

Kinney,L.L.; Han,Y.-W.: Reduction of Petri Nets; in: o.V.: Proceedings of the 14th Allerton Conference on Circuit and System Theory, 1976 in Monticello, Urbana 1976, S. 616-625.

Kirn (1992b)

Kirn,S.; Schneider,J.: STRICT: Selecting The "Right" Architecture - A Blackboard-Based DAI Advisory System Supporting The Design of Distributed Production Planning & Control Applications; in: Belli,F.; Radermacher,F.J. (Hrsg.): Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, 5th International Conference, IEA/AIE-92, 09.-12.06.1992 in Paderborn, Proceedings, Lecture Notes in Artificial Intelligence 604, Berlin - Heidelberg - New York ... 1992, S. 391-400.

Kirsch (1977a)

Kirsch,W.: Erster Band - Verhaltenswissenschaftliche Ansätze der Entscheidungstheorie; in: Kirsch,W.: Einführung in die Theorie der Entscheidungsprozesse, 2. Aufl. der Bände I bis III, Habilitationsschrift (unter dem Titel "Entscheidungen und Entscheidungsprämissen in der Unternehmungsorganisation"), Universität München, Wiesbaden 1977.

Kirsch (1977c)

Kirsch,W.: Dritter Band - Entscheidungen in Organisationen; in: Kirsch,W.: Einführung in die Theorie der Entscheidungsprozesse, 2. Aufl. der Bände I bis III, Habilitationsschrift (unter dem Titel "Entscheidungen und Entscheidungsprämissen in der Unternehmungsorganisation"), Universität München, Wiesbaden 1977.

Kirsch (1981a)

Kirsch,W.: Aspekte einer Lehre von der Führung; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 51. Jg. (1981), S. 656-671.

Kirsch (1984)

Kirsch,W.: Wissenschaftliche Unternehmensführung oder Freiheit vor der Wissenschaft? - Studien zu den Grundlagen der Führungslehre, 1. und 2. Halbband, München 1984.

Kirsch (1988)

Kirsch,W.: Zur Konzeption der Betriebswirtschaftslehre als Führungslehre; in: Wunderer,R. (Hrsg.): Betriebswirtschaftslehre als Management- und Führungslehre, 2. Aufl., Stuttgart 1988, S. 153-172.

Klein,S. (1989)

Klein,S.: Theorie der Unternehmungsplanung - Struktur und Beitrag einer anwendungsorientierten Planungstheorie, Stuttgart 1989.

Knigge (1975)

Knigge,R.: Von der Cost-Benefit-Analyse zur Nutzwert-Analyse; in: Das Wirtschaftsstudium, 4. Jg. (1975), S. 123-129.

Knoop (1986)

Knoop,J.: Online-Kostenrechnung für die CIM-Planung - Prozeßorientierte Kostenrechnung zur Ablaufplanung flexibler Fertigungssysteme, Berlin 1986.

Koch,H. (1974)

Koch,H.: Zum Methodenproblem der betriebswirtschaftlichen Theorie; in Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 44. Jg. (1974), S. 223-242 u. 327-342.

Köhler,R. (1966)

Köhler,R.: Theoretische Systeme der Betriebswirtschaftslehre im Lichte der neueren Wissenschaftslogik, Stuttgart 1966.

König,R. (1988a)

König,R.; Quäck,L.: Petri-Netze in der Steuerungs- und Digitaltechnik, München - Wien 1988.

Kosiol (1958)

Kosiol,E.: Kritische Analyse der Wesensmerkmale des Kostenbegriffs; in: Kosiol,E.; Schlieper, F. (Hrsg.): Betriebsökonomisierung durch Kostenanalyse, Absatzrationalisierung und Nachwuchserziehung, Festschrift für R. Seyffert zu seinem 65. Geburtstag, Köln - Opladen 1958, S. 7-37.

Kotov (1983a)

Kotov, V.E.: The Outline of Some Soviet Works on Petri Nets and Their Application - Summary; in: o.V.: Papers presented at the 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-29.09.1983 in Toulouse, o.O. 1983, S. 1-3.

Krämer (1981)

Krämer, B.; Schmidt, H.W.: Der Entwurf nebenläufiger Systeme mit Handlungs-Entscheidungs-Netzen; in: Brauer, W. (Hrsg.): GI - 11. Jahrestagung in Verbindung mit: Third Conference of the European Co-operation in Informatics (ECI), Proceedings, 20.-23.10.1981 in München, Informatik-Fachberichte 50, Berlin - Heidelberg - New York 1981, S. 460-471.

Krämer (1983a)

Krämer, B.: On the Stepwise Construction of Non-Sequential Software Systems Using a Net Based Description Language; in: o.V.: Papers presented at the 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-29.09.1983 in Toulouse, o.O. 1983, S. 230-252.

Krcmar (1989)

Krcmar, H.: Considerations for a Framework for CA Team Research, Arbeitspapier Nr. 9, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Universität Hohenheim, Stuttgart 1989.

Krieg, B. (1977)

Krieg, B.: Petrinetze und Zustandsgraphen, Bericht Nr. 29, Institut für Informatik, Universität Hamburg, Hamburg 1977.

Krüger, W. (1990a)

Krüger, W.; Reißner, S.: Inhaltsmuster der Hierarchie - Eine exploration anhand der zfo-Führungsprofile; in: Zeitschrift Führung + Organisation, 59. Jg. (1990), S. 380-388.

Krycha (1972)

Krycha, K.-T.: Methoden der Ablaufplanung, Frankfurt - Zürich 1972.

Kubicek (1977)

Kubicek, H.: Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung; in: Köhler, R. (Hrsg.): Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre, Kommission Wissenschaftstheorie im Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V., Bericht über die Tagung in Aachen, März 1976, Stuttgart 1977, S. 3-36.

Küpper, H. (1988)

Küpper, H.-U.: Inverstitionstheoretische versus kontrolltheoretische Abschreibung: Alternative oder gleichartige Konzepte einer entscheidungsorientierten Kostenrechnung?; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 58. Jg. (1988), S. 397-415.

Kuhlmann (1987)

Kuhlmann, W.: Was spricht heute für eine Philosophie des kantischen Typs?; in: Köhler, W.R.; Kuhlmann, W.; Rohs, P. (Hrsg.): Philosophie und Begründung, Frankfurt 1987, S. 84-115.

Kupka (1981)

Kupka, I.; Maas, S.; Oberquelle, H.: Kommunikation - ein Grundbegriff für die Informatik, Mitteilung Nr. 91, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Hamburg 1981.

Kwan (1977a)

Kwan, C.L.; Michel, C.; Le Beux, P.: Logical Systems Design USING PLAs and Petri Nets - Programmable Hardwired Systems; in: Gilchrist, B. (Hrsg.): Information Processing 77, Proceedings of IFIP Congress 77, 8.-12.08.1977 in Toronto, Amsterdam - New York - Oxford 1977, S. 607-611.

Kwan (1977b)

Kwan, C.L.; Le Beux, P.; Michel, C.: The Design of Structured Digital Systems Controlled by PLA; in: Nicoud, J.-D.; Wilkink, J.; Zaks, R. (Hrsg.): EUROMICRO 1977, Proceedings of 3rd Symposium on Microprocessing and Microprogramming, 3.-6.10.1977, Amsterdam 1977, S. 44-50.

Latz (1990)

Latz, H.-W.: Einsatz von CAD-Graphiken und Hypertext in der technischen Dokumentation; in: Krallmann, H. (Hrsg.): Innovative Anwendungen der Informations- und Kommunikationstechnologien in den 90er Jahren, München - Wien 1990, S. 321-349.

Lauer (1979)

Lauer, P.E.; Torrigiani, P.R.; Shields, M.W.: COSY - A System Specification Language Based on Paths and Processes; in: Acta Informatica, Vol. 12 (1979), S. 109-158.

Lautenbach (1973)

Lautenbach, K.: Exakte Bedingungen der Lebendigkeit für eine Klasse von Petri-Netzen, Dissertation Bonn 1973, Bericht Nr. 82, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1973.

Lautenbach (1974a)

Lautenbach, K.; Schmid, H.A.: Use of Petri Nets for Proving Correctness of Concurrent Process Systems; in: Rosenfeld, J.L. (Hrsg.): Information Processing 74, Proceedings of the IFIP Congress 1974, 5.-10.08.1974 in Stockholm, Amsterdam - London - New York 1974, S. 187-191.

Lautenbach (1983c)

Lautenbach, K.: Beiträge zu Diskussionen anlässlich: 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-29.09.1983 in Toulouse.

Lee-Kwang (1985b)

Lee Kwang-hyung: Analyse et modelisation des systemes de production par les reseaux de Petri, Dissertation, Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, Lyon 1985.

Leinwand (1980)

Leinwand, S.; Lamdan, T.: Models of Control at Register Transfer Level; in: Lavington, S. (Hrsg.): Information Processing 80, Proceedings of IFIP Congress 80, 6.-9.10.1980 in Tokyo und 14.-17.10.1980 in Melbourne, Amsterdam - New York - Oxford 1980, S. 163-168.

Liebowitz (1985)

Liebowitz, J.: Evaluation of Expert Systems: An Approach and Case Study; in: Weisbin, C.R. (Hrsg.): Artificial Intelligence Applications - The Engineering of Knowledge-Based Systems, Proceedings of the Second Conference, 11.-13.12.1985 in Miami Beach, Washington - Amsterdam 1985, S. 564-571.

Lien (1974a)

Lien, Y.E.: Termination and Finiteness Properties of Transition Systems, Technical Report TR-74-4, Department of Computer Science, University of Kansas, Lawrence o.J. (1974).

Lien (1976b)

Lien, Y.E.: Termination Properties of Generalized Petri Nets; in: SIAM Journal of Computing, Vol. 5 (1976), S. 251-265.

Lipp (1989a)

Lipp, H.-P.; Günther, R.; Sonntag, P.: Unscharfe Petri-Netze - Ein Basiskonzept für computerunterstützte Entscheidungsprozesse in komplexen Systemen, Wissenschaftliche Schriftenreihe der Technischen Universität Karl-Marx-Stadt, Nr. K 107/89, Karl-Marx-Stadt 1989.

Lipp (1990)

Lipp, H.P.: Flexible Fertigungsprozesse nach stückflußabhängigen und zeitabhängigen Kriterien Steuern; in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, 85. Jg. (1990), S. 652-655.

Lipp (1991)

Lipp, H.-P.: Einsatz von zeitbewerteten Fuzzy-Petri-Netzen in Expertensystemen zur operativen Führung komplexer Produktionssysteme; in: Hommel, G. (Hrsg.): Prozeßrechnungssysteme'91 - Automatisierungs- und Leitsysteme in den neunziger Jahren, 25.-27.02.1991 in Berlin, Proceedings, Informatik-Fachberichte 269, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991, S. 103-112.

Little, J. (1970)

Little, J.D.C.: Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus; in: Management Science, Vol. 16 (1970), S. B-466 - B-485.

Lockemann (1975)

Lockemann, P.C.: Information Systems: A Survey by Examples; in: Mühlbacher, J. (Hrsg.): GI - 5. Jahrestagung, 8.-10.10.1975 in Dortmund, Lecture Notes in Computer Science 34, Berlin - Heidelberg - New York 1975, S. 3-34.

Lockemann (1978)

Lockemann,P.C.; Mayr,H.C.: Rechnergestützte Informationssysteme, Berlin - Heidelberg - New York 1978.

Loos,U. (1989)

Loos,U.: Wirtschaftliche Auswirkungen der Fertigungssegmentierung; in: Wildemann,H.; Westkämper,E. (Hrsg.): Fabrikstrukturierung Europa'92, Tagungsbericht, 16.-17.11.1989 in Frankfurt, München 1989, S. 203-222.

Lovelace (1987)

Lovelace,R.F.: R&D Planning Techniques; in: R&D Management, Vol. 17 (1987), S. 241-251.

Luhmann (1988)

Luhmann,N.: Soziale Systeme - Grundriß einer allgemeinen Theorie, 2. Aufl., Frankfurt 1988.

Martinez (1982a)

Martinez,J.; Silva,M.: A Simple and Fast Algorithm to Obtain All Invariants of a Generalized Petri Net; in: Girault,C.; Reisig,W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 301-310.

Massachusetts Computer Associates (1975)

Massachusetts Computer Associates, Inc. (Hrsg.): Second Semi-Annual Technical Report (1 December 1973 - 31 March 1975) For the Project "Development of Theoretical Foundations for Description and Analysis of Discrete Information Systems", Wakefield 1975.

Mayer,U. (1981)

Mayer,U.; Riedemann,E.: Mathematische Modelle für MIMD-Rechner, Forschungsbericht Nr. 115, Abteilung Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1981.

Mayr,E. (1975)

Mayr,E.: Einige Sätze über Umformungen und verklemmungsfreie Führbarkeit bei bewerteten Petri-Netzen, Diplomarbeit am Institut für Informatik, Technische Universität München, München 1975.

Mayr,E. (1980a)

Mayr,E.W.: Ein Algorithmus für das allgemeine Erreichbarkeitsproblem bei Petrinetzen und damit zusammenhängende Probleme, Dissertation an der Technischen Universität München, München 1980.

Mayr,H. (1977)

Mayr,H.C.; Lockemann,P.C.: Formal Modelling of Discrete Dynamic Systems; in: Beilner,H.; Gelenbe,E. (Hrsg.): Measuring, Modelling and Evaluation Computer Systems, Proceedings of the Third International Symposium, 3.-5.10.1977 in Bonn, Bad Godesberg, Amsterdam - New York - Oxford 1977, S. 255-266.

McGoff (1990)

McGoff,C.; Hunt,A.; Vogel,D.; Nunamaker,J.: IBM's Experiences with GroupSystems; in: Interfaces, Vol. 20 (1990), No. 6, S. 39-52.

Mekly (1980)

Mekly,L.J.; Yau,S.S.: Software Design Representation Using Abstract Process Networks; in: IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. SE-6 (1980), S. 420-435.

Meldman (1971)

Meldman,J.A.; Holt,A.W.: Petri Nets and Legal Systems; in: Jurimetrics Journal, Vol. 12 (1971), S. 65-75.

Meldman (1977)

Meldman,J.A.: A New Technique for Modeling the Behavior of Man-Machine Information Systems; in: Sloan Management Review; vol. 18 (1977), No. 3, S. 29-46.

Mellerowicz (1981a)

Mellerowicz,K.: Betriebswirtschaftslehre der Industrie, Band I: Grundfragen und Führungsprobleme industrieller Betriebe, 7. Aufl., Freiburg 1981.

Memmi (1978c)

Memmi,G.: Applications of the Semiflow Notion to the Boundedness and Liveness Problems in the Petri Nets Theory; in: o.V.: Proceedings of the Annual Princeton Conference on Information Sciences and Systems, Vol. 12, Baltimore 1978, S. 505-509.

Memmi (1979)

Memmi,G.: Notion de Duality et de Symmetrie dans les Reseaux de Petri; in: Kahn,G. (Hrsg.): Semantics of Concurrent Computation, Proceedings of the International Symposium, 2.-4.07.1979 in Evian, Lecture Notes in Computer Science 70, Berlin - Heidelberg - New York 1979, S. 91-108.

Memmi (1983b)

Memmi,G.: A Graph Theoretical Property for Minimal Deadlock; in: Pagnoni,A.; Rozenberg,G. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the 3rd European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 27.-30.09.1982 in Varenna, Informatik-Fachberichte 66, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1983, S. 221-228.

Mertens (1991a)

Mertens,P.; Griese,J.: Integrierte Informationsverarbeitung 2 - Planungs- und Kontrollsysteme in der Industrie, 6. Aufl., Wiesbaden 1991.

Mertins (1985a)

Mertins,K.: Steuerung rechnergeführter Fertigungssysteme, München - Wien 1985.

Meta Software (1990a)

Meta Software Corporation (Hrsg.): Design/CPN Announcement, Cambridge (Massachusetts) 1990.

Meta Software (1990b)

Meta Software Corporation (Hrsg.): Design/CPN - New Release Version for the SUN - European Distribution CPN Tutorial, Cambridge 1990.

Meyer,Wi. (1972)

Meyer,Wi.: Wissenschaftstheorie und Erfahrung: Zur Überwindung des methodologischen Dogmatismus; in: Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie, Bd. 3 (1972), S. 267-284.

Meyer,Wo. (1990a)

Meyer,Wo.: Expert Systems in Factory Management - Knowledge-Based CIM, New York - London - Toronto ... 1990.

Meyer zu Selhausen (1980b)

Meyer zu Selhausen,H.: Wege zu einer verhaltensorientierten Methodik der Modellbildung und Modell-Implementierung, Teil II: Der scenario-bezogene OR-Prozeß; in: IHS-Journal, Vol. 4 (1980), S. 131-145.

Miller,R.E. (1972)

Miller,R.E.: Some Theoretical Studies of Parallel Computation; in: o.V.: Proceedings of the International Computing Symposium, 12.-14.04.1972 in Venedig, Venedig 1972, S. 456-472.

Miller,T. (1968)

Miller,T.T.: New-product Profiles; in: Heyel,C. (Hrsg.): Handbook of Industrial Research Management, 2. Aufl., New York - Amsterdam - London 1968, S. 232-235.

Mladineo (1989)

Mladineo,R.H.: Supercomputers and Global Optimization; in: Sharda,R.; Golden,B.L.; Wasil,E.; Balci,O.; Stewart,W. (Hrsg.): Impacts of Recent Computer Advances on Operations Research, New York - Amsterdam - London 1989, S. 92-105.

Moalla (1976b)

Moalla,M.: L'Approche Fonctionnelle dans la Verification des Systemes Informatiques. Proposition d'un Ensemble de Methodologies, Dissertation am Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble 1976.

Moalla (1977)

Moalla,M.; Sifakis,J.: A Design Methodology for Complex Logical Systems; in: o.V.: Proceedings of the 2nd IFAC International Symposium on Discrete Systems, im März 1977 in Dresden, o.O. 1977, S. 89-101.

Moalla (1978b)

Moalla,M.; Pulou,J.; Sifakis,J.: Synchronized Petri Nets: A Model for the Description of Non-autonomous Systems; in: Winkowski,J. (Hrsg.): Mathematical Foundations of Computer Science 1978, Proceedings of the 7th Symposium, 4.-8.09.1978 in Zakopane, Lecture Notes in Computer Science 64, Berlin - Heidelberg - New York 1978, S. 374-384.

Molloy (1982)

Molloy,M.K.: Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets; in: IEEE Transactions on Computers, Vol. C-31 (1982), S. 913-917.

Montel (1983a)

Montel,B.; Grissault,D.; Le Mer,E.; Robert,C.; Sivet,A.; Azema,P.; Bachmann,S.; Berthomieu, B.; Diaz,M.; Pradin,B.: OVIDE, a Software Package for the Validation of Systems Represented by Petri Net Based Models; in: o.V.: Papers presented at the 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-29.09.1983 in Toulouse, o.O. 1983, S. 292-308.

Mosner (1991)

Mosner,H.-M.; Heeg,G.: Visuelle interaktive Simulation und Modellierung mit dem objekt-orientierten Programmiersystem Smalltalk-80; in: Biethahn,J.; Hummeltenberg,W.; Schmidt,B. (Hrsg.): Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe, Band 2, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991, S. 137-145.

Müller,B. (1981)

Müller,B.: Einsatz von Petri-Netzen in der Software-Entwicklung; in: Fandel,G.; Fischer,D.; Pfohl,H.-C.; Schuster,K.-P.; Schwarze,J. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 1980, DGOR - Vorträge der Jahrestagung, Berlin - Heidelberg - New York 1981, S. 199-206.

Müller,H. (1980b)

Müller,H.: Decidability of Reachability in Persistent Vector Replacement Systems; in: Dembinski,P. (Hrsg.): Mathematical Foundations of Computer Science 1980, Proceedings of the 9th Symposium, 1.-5.09.1980 in Rydzyna, Lecture Notes in Computer Science 88, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 426-438.

Müller-Merbach (1973)

Müller-Merbach,H.: Operations Research - Methoden und Modelle der Optimalplanung, 3. Aufl., München 1973.

Müller-Schloer (1990)

Müller-Schloer,C.; Geiger,M.: The Euroworkstation Project and its Future Extensions; in: Commission of the European Communities (Hrsg.): ESPRIT'90, Proceedings of the Annual ESPRIT Conference, 12.-15.11.1990 in Brüssel, Dordrecht - Boston - London 1990, S. 718-731.

Müller-Silva (1984a)

Müller-Silva,K.: Strukturmodellierung - Methoden zur Problemformulierung, Entwurf eines Skriptums, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Betriebswirtschaftliche Planung, Universität Köln, Köln o.J. (1984).

Müller-Zantop (1991)

Müller-Zantop,S.: PC und Workstation - Vorbereitungen für die Zukunft; in: PC Magazin, o.Jg. (1991), Nr. 11, S. 153-157.

Muller,H. (1987)

Muller(-Malek),H.; de Samblanckx,S.; Matthys,D.: The expert system approach and the flexibility-complexity problem in scheduling production systems; in: International Journal of Production Research, Vol. 25 (1987), S. 1659-1670.

Murata,Ta. (1976c)

Murata,Ta.; Church,R.W.; Amin,A.T.: Matrix Equations for Petri Nets and Marked Graphs; in: o.V.: Conference Record of the 9th Annual Asilomar Conference on Circuits, Systems, and Computers, Pacific Grove (1976), S. 36-41.

Murata,Ta. (1977a)

Murata,Ta.: State Equation, Controllability, and Maximal Matchings of Petri Nets; in: IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-22 (1977), S. 412-416.

Murata,Ta. (1977c)

Murata,Ta.: petri nets, marked graphs, and circuit-system theory, a recent CAS application, Reprinted from: Circuits and Systems, Vol. 11 (1977), No. 3, S. 2-12.

Murata,Ta. (1979a)

Murata,Ta.: Synthesis of Marked Graph Computation Models for Prescribed Resources and Performance; in: o.V.: Conference Record of the 12th Asilomar Conference on Circuits, Systems, and Computers, im Jahr 1978, o.O. (New York) 1979, S. 807-812.

Murata,Ta. (1980a)

Murata,Ta.: Synthesis of Decision-Free Concurrent Systems for Prescribed Resources and Performance; in: IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. SE-6 (1980), S. 525-530.

Murata,Ta. (1980b)

Murata,Ta.: Relevance of Network Theory to Models of Distributed/Parallel Processing; in: Journal of the Franklin Institute, Vol. 310 (1980), S. 41-50.

Nastansky (1990b)

Nastansky,L.; Seidensticker,F.-J.: Anwendungen und Konzepte für Hypermedia-basiertes Informationsmanagement am netzintegrierten Managerarbeitsplatz; in: Wirtschaftsinformatik, 32. Jg. (1990), S. 519-537.

Nelson,R.A. (1982)

Nelson,R.A.; Haibt,L.M.; Sheridan,P.R.: Specification, Design, and Implementation Via Annotated Petri Nets, Report RC 9317, IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights 1982.

Neumann,G. (1991b)

Neumann,G.: Markt und Trends - Mehr Power für weniger Geld; in: PC Magazin, o.Jg. (1991), Nr. 16, S. 59-60.

Newell (1969)

Newell,A.: Heuristic Programming: Ill-Structured Problems; in: Aronofsky,J.S. (Hrsg.): Progress in Operations Research, Vol. III: Relationship between Operations Research and the Computer, New York - London - Sydney ... 1969, S. 361-414.

Noe (1971)

Noe,J.D.: A Petri Net Model of The CDC 6400; in: o.V.: Proceedings of the ACM/SIGOPS Workshop on System Performance Evaluation, Cambridge (Massachusetts) 1971, S. 362-378.

Noe (1975a)

Noe,J.D.: Pro-Nets: For Modeling Processes and Processors, Technical Report 75-07-15, Department of Computer Science, University of Washington, Seattle 1975.

Noe (1977)

Noe,J.D.: Abstraction Levels with Pro Nets: An Algorithm and Examples, Technical Report No. 77-03-01, Department of Computer Science, University of Washington, Seattle 1977.

Noe (1980a)

Noe,J.D.: Nets in Modeling and Simulation; in: Brauer,W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 347-368.

Noe (1980b)

Noe,J.D.: Abstractions of Net Models; in: Brauer,W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 369-388.

Noe (1980c)

Noe,J.D.: Applications of Net-Based Models; in: Brauer,W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 389-400.

Nunamaker (1988)

Nunamaker,J.F.; Applegate,L.M.; Kosynski,B.R.: Computer-Aided Deliberation: Model Management and Group Decision Support; in: Operations Research, Vol. 36 (1988), S. 826-848.

Nutt (1972b)

Nutt,G.J.: The Formulation and Application of Evaluation Nets, Dissertation, Computer Science Group, University of Washington, Seattle 1972.

Oberquelle (1979a)

Oberquelle,H.: Objektorientierte Informationsverarbeitung und benutzergerechtes Editieren, Teil 1: Grundlagen, Bericht Nr. 62, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Hamburg 1979.

Oberquelle (1980)

Oberquelle,H.: Nets as a Tool in Teaching and in Terminology Work; in: Brauer,W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 481-506.

Oberquelle (1981a)

Oberquelle,H.: Cover Picture Story; in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 9 (1981), S. 5-8.

Oberquelle (1981b)

Oberquelle,H.: Communication by Graphic Net Representations, Bericht Nr. 75, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Hamburg 1981.

Oberquelle (1982a)

Oberquelle,H.: Drawing of Nets (Continued); in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 11 (1982), S. 13-14.

Oberquelle (1982b)

Oberquelle,H.: Special Template for Petri Nets Available; in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 11 (1982), S. 25.

Oellers (1981)

Oellers,B.: Methodenorientierte Beurteilung der Leistungsfähigkeit mehrfach verwendbarer Terminplanungsprogramme, Dissertation, Universität Köln, Köln 1981.

Ojala (1983)

Ojala,L.; Lindquist,M.: Conference Report - 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, September 26-29, 1983, Toulouse, France; in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 15 (1983), S. 24-30.

Olderog (1990b)

Olderog,E.R.: Systematic Construction of Petri Nets from Terms and Formulas, Invited Talk, gehalten am 29.06.1990 in Paris anlässlich: 11th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, 27.-29.06.1990 in Paris.

Opp,K. (1976)

Opp,K.-D.: Methodologie der Sozialwissenschaften - Einführung in Probleme ihrer Theorienbildung, Neuausgabe, Reinbek 1976.

Opp,K. (1977)

Opp,K.-D.: Die verhaltenstheoretische Soziologie als sozialwissenschaftliches "Paradigma"; in: Lenk,H. (Hrsg.): Handlungstheorien interdisziplinär IV - Sozialwissenschaftliche Handlungstheorien und spezielle systemwissenschaftliche Ansätze, München 1977, S. 121-156.

o.V. (1979b)

o.V.: Report on the "Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems", Hamburg, October 8-19,1979; in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 3 (1979), S. 13-14.

o.V. (1983a)

o.V.: SYSECA - TEMPS REEL - OVIDE, Outil de Validation de Reseaux de Petri, Saint Cloud o.J. (1983).

o.V. (1983c)

o.V.: 4eme Seminaire Europeen sur la Theorie et les Applications des Reseaux de Petri, Toulouse, 26-29 Septembre 1983, Dossier de Presse, Toulouse 1983.

o.V. (1991b)

o.V.: Marktübersicht - Massenweise Rechenpower; in: PC Magazin, o.Jg. (1991), Nr. 16, S. 62-68.

Pagnoni (1990)

Pagnoni,A.: Project Engineering - Computer-Oriented Planning and Operational Decision Making, Berlin - Heidelberg - New York ... 1990.

Pakas-Skewes (1979)

Pakas-Skewes,E.: A Design Methodology for Digital Systems Using Petri Nets, Dissertation, University of Texas, Austin 1979.

Parker,R. (1982a)

Parker,R.G.; Rardin,R.L.: An Overview of Complexity Theory in Discrete Optimizations: Part I. Concepts; in: AIIE Transactions, Vol. 14 (1982), S. 3-10.

Parnas (1972)

Parnas,D.L.: On the Criteria To Be Used in Decomposing Systems into Modules; in: Communications of the ACM, Vol. 15 (1972), S. 1053-1058.

Passino (1988a)

Passino,K.M.; Antsaklis,P.J.: Artificial Intelligence Planning Problems in a Petri Net Framework; in: o.V.: Proceedings of the 1988 American Control Conference, Piscataway 1988, Vol. 1, S. 626-631.

Patil (1971)

Patil,S.S.: Limitations and Capabilities of Dijkstra's Semaphore Primitives for Coordination among Processes, Computation Structures Group Memo No. 57, Project MAC, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts) 1971.

Patil (1973)

Patil,S.S.; Dennis,J.B.: The Description and Realization of Digital Systems; in: Revue Francaise d'Automatique, Informatique, et Recherche Operationelle - Automatique, Vol. 7 (1973), S. 55-69.

Patil (1975b)

Patil,S.S.: Micro-Conrol for Parallel Asynchronous Computers; in: Hartenstein,R.W.; Zaks,R. (Hrsg.): Microarchitecture of Computer Systems, Proceedings of a Euromicro Workshop, Juli 1975 in Nizza, o.O. (Amsterdam) 1975, S. 17-24.

Paul,W. (1978)

Paul,W.J.: Komplexitätstheorie, Stuttgart 1978.

Peng,Y. (1986)

Peng,Y.; Reggia,J.A.: Plausibility of Diagnostic Hypotheses: The Nature of Simplicity; in: o.V.: proceedings aaai-86, fifth national conference on artificial intelligence, 11.-15.08.1986 in Philadelphia, Vol. 1: science, Los Altos 1986, S. 140-145.

Perl (1980)

Perl,J.: Übertragung des Markierungsbegriffs auf vergrößerte Petri-Netze, Osnabrücker Schriften zur Mathematik, Reihe M: Mathematische Manuskripte, Heft 3, Osnabrück 1980.

Perridon (1991)

Perridon,L.; Steiner,M.: Finanzwirtschaft der Unternehmung, 6. Aufl., München 1991.

Peterson,J. (1977)

Peterson,J.L.: Petri Nets; in: Computing Surveys, Vol. 9 (1977), S. 223-252.

Peterson,J. (1978a)

Peterson,J.L.: An Introduction to Petri Nets; in: Tranter,W.H. (Hrsg.): Proceedings of the National Electronics Conference, Vol. 32, 16.-18.10.1978 in Chicago, Oak Brook, S. 144-148.

Peterson,J. (1981)

Peterson,J.L.: Petri Net Theory and the Modeling of Systems, Englewood Cliffs 1981.

Petri,C. (1962a)

Petri,C.A.: Kommunikation mit Automaten, Dissertation (1961), Technische Hochschule Darmstadt, Schriften des Rheinisch-Westfälischen Institutes für Instrumentelle Mathematik an der Universität Bonn, Nr. 2, Köln - Opladen 1962.

Petri, C. (1963)

Petri, C.A.: Fundamentals of a Theory of Asynchronous Information Flow; in: Popplewell, C.M. (Hrsg.): Information Processing 1962, Proceedings of IFIP Congress 62, 27.08-1.09.1962 in München, Amsterdam 1963, S. 386-390.

Petri, C. (1967)

Petri, C.A.: Grundsätzliches zur Beschreibung diskreter Prozesse; in: Händler, W.; Peschl, E.; Unger, H. (Hrsg.): 3. Colloquium über Automatentheorie, 19.-22.10.1965 in Hannover, Basel 1967, S. 121-140. (Englische Übersetzung erschienen als Petri (1982b).)

Petri, C. (1973)

Petri, C.A.: Concepts of Net Theory; in: Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences; Computing Research Centre United Nations D.p. Bratislava (Hrsg.): mathematical foundations of computer science, proceedings of symposium and summer school, 3.-8.09.1973 in High Tatras, Bratislava 1973, S. 137-146.

Petri, C. (1976b)

Petri, C.A.: Interpretations of Net Theory, Interner Bericht 75-07, Paper präsentiert anlässlich: International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science MFCS'75, 1.-5.09.1975 in Marianske Lazne, 2. Aufl., Institut für Informationssystemforschung, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1976.

Petri, C. (1977a)

Petri, C.A.: General Net Theory; in: Shaw, B. (Hrsg.): Computing System Design: International Seminar on the Teaching of Computing Science, Proceedings of the Joint IBM University of Newcastle upon Tyne Seminar, im September 1876 in Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne 1977, S. 131-169.

Petri, C. (1979b)

Petri, C.A.: Kommunikationsdisziplinen; in: Petri, C.A. (Hrsg.): Ansätze zur Organisationstheorie Rechnergestützter Informationssysteme, Bericht Nr. 111, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, München - Wien 1979, S. 63-76.

Petri, C. (1979c)

Petri, C.A.: Über einige Anwendungen der Netztheorie; in: Böhling, K.H.; Spies, P.P. (Hrsg.): GI - 9. Jahrestagung, 01.-05.10.1979 in Bonn, Informatik-Fachberichte 19, Berlin - Heidelberg - New York 1979, S. 81-87.

Petri, C. (1980a)

Petri, C.A.: Introduction to General Net Theory; in: Brauer, W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 1-20.

Petri, C. (1980b)

Petri, C.A.: Concurrency; in: Brauer, W. (Hrsg.): Net Theory and Applications, Proceedings of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, 8.-19.10.1979 in Hamburg, Lecture Notes in Computer Science 84, Berlin - Heidelberg - New York 1980, S. 251-260.

Petri, C. (1983)

Petri, C.A.: Some Personal Views of Net Theory; in: Pagnoni, A.; Rozenberg, G. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the 3rd European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 27.-30.09.1982 in Varenna, Informatik-Fachberichte 66, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1983, S. 1-13.

Pfeiffer, W. (1989)

Pfeiffer, W.; Dögl, R.; Schneider, W.: Das Technologie-Portfolio-Konzept als Tool zur strategischen Vorsteuerung von Innovationsaktivitäten; in: Das Wirtschaftsstudium, 18. Jg. (1989), S. 485-492.

Pfohl (1977)

Pfohl, H.-C.: Problemorientierte Entscheidungsfindung in Organisationen, Berlin - New York 1977.

Pfohl (1981)

Pfohl, H.-C.; Braun, G.E.: Entscheidungstheorie - Normative und deskriptive Grundlagen des Entscheidens, Landsberg 1981.

Pichler, F. (1978)

Pichler, F.: Einige Anwendungen gerichteter Graphen in der mathematischen Systemtheorie; in: Mühlbacher, J. (Hrsg.): Datenstrukturen, Graphen, Algorithmen - Ergebnisse des Workshops WG 77, 3. Fachtagung über Graphentheoretische Konzepte der Informatik, 17.-19.06.1977 in Linz, München - Wien 1978, S. 17-36.

Picot (1988)

Picot, A.; Reichwald, R.; Nippa, M.: Zur Bedeutung der Entwicklungsaufgabe für die Entwicklungszeit - Ansätze für die Entwicklungszeitgestaltung; in: Brockhoff, K.; Picot, A.; Urban, C. (Hrsg.): Zeitmanagement in Forschung und Entwicklung, Sonderheft 23/1988, Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, Düsseldorf - Frankfurt 1988.

Pinci (1990b)

Pinci, V.O.: Diskussionsbeitrag zur Sektion "Methods in System Modelling", am 27.06.1990 in Paris anlässlich: 11th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, 27.-29.06.1990 in Paris.

Pnueli (1979)

Pnueli, A.: The Temporal Semantics of Concurrent Programs; in: Kahn, G. (Hrsg.): Semantics of Concurrent Computation, Proceedings of the International Symposium, 2.-4.07.1979 in Evian, Lecture Notes in Computer Science 70, Berlin - Heidelberg - New York 1979, S. 1-20.

Popper (1935a)

Popper, K.: Logik der Forschung - Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft, 1. Aufl., Wien 1935.

Popper (1965a)

Popper, K.R.: Conjectures and Refutations - The Growth of Scientific Knowledge, 2. Aufl., London 1965.

Popper (1965b)

Popper, K.R.: Was ist Dialektik?; in: Topitsch, E. (Hrsg.): Logik der Sozialwissenschaften, Köln - Berlin 1965, S. 262-290.

Popper (1966)

Popper, K.R.: Logik der Forschung, 2. Aufl., Tübingen 1966.

Popper (1972a)

Popper, K.R.: Die Zielsetzung der Erfahrungswissenschaft; in: Albert, H. (Hrsg.): Theorie und Realität - Ausgewählte Aufsätze zur Wissenschaftslehre der Sozialwissenschaften, 2. Aufl., Tübingen 1972, S. 29-41.

Popper (1984a)

Popper, K.R.: Logik der Forschung, 8. Aufl., Tübingen 1984.

Popper (1984b)

Popper, K.R.: Objektive Erkenntnis - Ein evolutionärer Entwurf, 4. Aufl., Hamburg 1984.

Pressmar (1982)

Pressmar, D.B.: Zur Akzeptanz von computergestützten Planungssystemen; in: Krallmann, H. (Hrsg.): Unternehmensplanung und -steuerung in den 80er Jahren - Eine Herausforderung an die Informatik, Anwendersgespräch, 24.-25.11.1981 in Hamburg, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 324-348.

Priese (1979)

Priese, L.: Asynchrone, Modulare Netze: Petri-Netze, Normierte Netze, APA-Netze, Habilitation an der Universität Dortmund, Forschungsbericht Nr. 94, Abteilung Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1979.

Priese (1983)

Priese, L.: Automata and Concurrency; in: Theoretical Computer Science, Vol. 25 (1983), S. 221-265.

Pritsker (1966b)

Pritsker, A.A.B.; Happ, W.W.: GERT: Graphical Evaluation and Review Technique, Part I. Fundamentals; in: The Journal of Industrial Engineering, Vol. 17 (1966), S. 267-274.

Putnam, H. (1982a)

Putnam, H.: Vernunft, Wahrheit und Geschichte, Frankfurt 1982.

Quäck (1978)

Quäck,L.; König,R.: Zur Realisierung zeitmarkierter Petri-Netze auf der Basis der Corexstruktur; in: Akademie der Wissenschaften der DDR - Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse (Hrsg.): ZKI-Information 1/78, Berlin (Ost) 1978, S. 77-80.

Quichaud (1987)

Quichaud,D.; Chretienne,P.: Performance Evaluation of Interpreted Bipolar Synchronization Schemes Using GERT; in: o.V.: Papers presented at the 8th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 24.-26.06.1987 in Zaragoza, o.O. 1987, S. 295-316.

Raju (1971)

Raju,G.V.S.: Sensitivity Analysis of GERT Networks; in: AIIE Transactions, Vol. 3 (1971), S. 133-141.

Ramamoorthy (1980)

Ramamoorthy,C.V.; Ho,G.S.: Performance Evaluation of Asynchronous Concurrent Systems Using Petri Nets; in: IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. SE-6 (1980), S. 440-449.

Ramöller (1976)

Ramöller,R.: Implementierung eines erweiterten Petrinetzmodells zur Simulation diskreter Systeme, Diplomarbeit an der Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1976.

Rardin (1982)

Rardin,R.L.; Lin,B.W.: Test Problems for Computational Experiments -- Issues and Techniques; in: Mulvey,J.M. (Hrsg.): Evaluating Mathematical Programming Techniques, Proceedings of a Conference, 05.-06.01.1981 in Boulder, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 199, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 8-15.

Raubold (1972)

Raubold,E.; Ullrich,G.: Graphenmodelle zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen asynchronen Prozessen; in: o.V.: NTG-GI-Fachtagung: Rechner- und Betriebssysteme - Analyse, Simulation und Entwurf, 12.-14.04.1972 in Darmstadt, Berlin 1972, S. 207-216.

Razouk (1985c)

Razouk,R.R.; Morgan,E.T.: The P-NUT System: An Environment for Modeling and Analyzing Concurrent Systems, Technical Report No. 85-10, Department of Information and Computer Science, University of California, Irvine 1985.

Read,M. (1991)

Read,M.; Gear,T.: Interactive Group Decision Support; in: Korhonen,P.; Lewandowski,A.; Wallenius,J. (Hrsg.): Multiple Criteria Decision Support, Proceedings of the International Workshop, 07.-11.08.1989 in Helsinki, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991, S. 360-368.

Reddi (1978)

Reddi,S.S.: A Modular Computer with Petri Net Array Control; in: o.V.: Proceedings of the ACM Annual Conference, Washington 1978, S. 79-85.

Reggia (1983)

Reggia,J.A.; Nau,D.S.; Wang,P.Y.: Diagnostic expert systems based on a set covering model; in: International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 19 (1983), S. 437-460.

Rehm (1991)

Rehm,M.: Computertechnik/ Host ade - Komplexe Simulationen lassen sich schon heute auf einer Workstation berechnen - Trend zu höherer Rechnerleistung am Arbeitsplatz; in: Handelsblatt, Ausgabe vom 03.04.1991 (Nr. 64), S. 27.

Reichwald (1990)

Reichwald,R.: Entwicklungszeiten als wettbewerbsentscheidender Faktor für den langfristigen Erfolg eines Industriebetriebes; in: Reichwald,R.; Schmelzer,H.J. (Hrsg.): Durchlaufzeiten in der Entwicklung - Praxis des industriellen F&E-Managements, München - Wien 1990, S. 9-25.

Reisig (1979a)

Reisig,W.: Zur Verwendung von Petrinetz-Morphismen bei der Systemkonstruktion; in: Mayr,H.C.; Meyer,B.E. (Hrsg.): Formale Modelle für Informationssysteme, GI-Fachtagung, 24.-26.05.1979 in Tutzing, Berlin - Heidelberg - New York 1979, S. 220-235.

Reisig (1982d)

Reisig,W.: A Note on the Drawing of Nets; in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 10 (1982), S. 6-9.

Reisig (1983a)

Reisig,W.: System Design Using Petri Nets; in: o.V.: Papers presented at the 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-29.09.1983 in Toulouse, o.O. 1983, S. 309-321. (Auch erschienen in: Hommel,G.; Krönig,D. (Hrsg.): Requirements Engineering, Arbeitstagung der GI, 12.-14.10.1983 in Friedrichshafen, Informatik-Fachberichte 74, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1983, S. 29-41.)

Rembold (1990)

Rembold,U.; Bien,A.; Fehrl,L.; Fischer,H.; Hörmann,K.; König,H.; Mally,K.; Rohmer,K. (und Mitarbeiter): CAM-Handbuch, Berlin - Heidelberg - New York ... 1990.

Rescher (1974)

Rescher,N.: Foundationalism, Coherentism, and the Idea of Cognitive Systematization; in: The Journal of Philosophy, Vol. 71 (1974), S. 695-708.

Rescher (1976a)

Rescher,N.: Plausible Reasoning - An Introduction to the Theory and Practice of Plausibilistic Inference, Assen 1976.

Rescher (1979)

Rescher,N.: Cognitive Systematization - A systems-theoretic approach to a coherentist theory of knowledge, Oxford 1979.

Rescher (1980a)

Rescher,N.: Scepticism - A critical reappraisal, Oxford 1980.

Rescher (1985a)

Rescher,N.: The Strife of Systems - An Essay on the Grounds and Implications of Philosophical Diversity, Pittsburgh 1985.

Rescher (1985b)

Rescher,N.: Die Grenzen der Wissenschaft, Stuttgart 1985.

Rescher (1987a)

Rescher,N.: Induktion - Zur Rechtfertigung induktiven Schließens, München - Wien 1987.

Rescher (1987b)

Rescher,N.: Scientific Realism - A Critical Reappraisal, Dordrecht - Boston - Lancaster ... 1987.

Richter,G. (1983b)

Richter,G.: Netzmodelle für die Bürokommunikation - Teil 1; in: Informatik-Spektrum, Bd. 6 (1983), S. 210-220.

Richter,G. (1985a)

Richter,G.; Voss,K.: Towards a Comprehensive Office Model Integrating Information and Resources; in: o.V.: Papers presented at the 6th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-28.06.1985 in Espoo/Helsinki, o.O. 1985, S. 17-34.

Richter,G. (1985c)

Richter,G.: Clocks and Their Use for Time Modeling; in: Sernadas,A.; Bubenko,J.; Olive,A. (Hrsg.): Information Systems: Theoretical and Formal Aspects, Proceedings of the IFIP WG 8.1 Working Conference, 16.-18.04.1985 in Siges/Barcelona, Amsterdam - New York - Oxford 1985, S. 49-66.

Rilling (1991)

Rilling,G.; Borkowski,V.: RATOUREX - Expertensystem zur Steuerung des Werkfernverkehrs, Teil 2: Aufgabenbereich "Umdisposition", Arbeitspapier Nr. 3/1991, Abteilung Wirtschaftsinformatik, Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg 1991.

Rivett (1980)

Rivett,P.: Model Building for Decision Analysis, Chichester - New York - Brisbane ... 1980.

Rosenstengel (1979)

Rosenstengel,B.; Winand,U.: Grundlagen eines interaktiven Modells zur ad hoc-Improvisation von Flugplänen, Arbeitsbericht Nr. 24, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Betriebswirtschaftliche Planung, Universität Köln, Köln 1979.

Rosenstengel (1982)

Rosenstengel,B.; Winand,U.: Petri-Netze - Eine anwendungsorientierte Einführung, Braunschweig - Wiesbaden 1982.

Rosenstengel (1983)

Persönliches Gespräch des Verf. mit Herrn B. Rosenstengel am 10.05.1983 in Köln.

Rosenstengel (1991)

Rosenstengel,B.; Winand,U.: Petri-Netze - Eine anwendungsorientierte Einführung, 4. Aufl., Braunschweig - Wiesbaden 1991. (Anmk. des Verf.: erheblich veränderte und überarbeitete Fassung von Rosenstengel (1982).)

Roucairol (1978)

Roucairol,G.: Contribution a l'etude des equivalences syntaxiques et transformations de programmes paralleles, Dissertation, Universite Pierre et Marie Curie Paris, Paris 1978.

Roucairol (1982a)

Roucairol,G.: Application of Nets To Real-Time System; in: Girault,C.; Reisig,W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 1-2.

Roy,A. (1982)

Roy,A.; De Falomir,E.E.; Lasdon,L.: An Optimization-Based Decision Support System for a Product Mix Problem; in: Interfaces, Vol. 12 (1982), No. 2, S. 26-33.

Russell,B. (1952)

Russell,B.: Das menschliche Wissen, Darmstadt o.J. (1952).

Russell,B. (1975)

Russell,B.: Philosophie des Abendlandes - Ihr Zusammenhang mit der politischen und der sozialen Entwicklung, Zürich - Wien 1975.

Salmon (1977)

Salmon,W.C.: Einleitung zur Gesamtausgabe - Hans Reichenbachs Leben und die Tragweite seiner Philosophie; in: Reichenbach,H.: Gesammelte Werke in 9 Bänden, Bd. 1: Der Aufstieg der wissenschaftlichen Philosophie, hrsg. von Kamlah,A.; Reichenbach,M., Braunschweig 1977, S. 5-81.

Sanders,M. (1987)

Sanders,M.: Quantitative Analyse Interner Kontrollsysteme - Modellbildung und empirische Anwendung, Berlin 1987.

Schaefer,R. (1985)

Schaefer,R.E.: Denken - Informationsverarbeitung, mathematische Modelle und Computersimulation, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1985.

Schanz (1973)

Schanz,G.: Pluralismus in der Betriebswirtschaftslehre: Bemerkungen zu gegenwärtigen Forschungsprogrammen; in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 25. Jg. (1973), S. 131-154.

Schanz (1988b)

Schanz,G.: Methodologie für Betriebswirte, 2. Aufl., Stuttgart 1988.

Scheer (1976)

Scheer,A.-W.: Produktionsplanung auf der Grundlage einer Datenbank des Fertigungsbereichs, München 1976.

Scheer (1983b)

Scheer,A.-W.: Stand und Trends der computergestützten Produktionsplanung und -steuerung (PPS) in der Bundesrepublik Deutschland; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 53. Jg. (1983), S. 138-155.

Scheer (1987a)

Scheer,A.-W.: EDV-orientierte Betriebswirtschaftslehre, 3. Aufl, Berlin - Heidelberg - New York ... 1987.

Scheer (1987b)

Scheer,A.-W.: Neue Architektur für EDV-Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung; in: Adam,D. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Produktions- und Investitionspolitik, Wiesbaden 1987, S. 153-176.

Scheer (1988a)

Scheer,A.-W.: Wirtschaftsinformatik - Informationssysteme im Industriebetrieb, 2. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York ... 1988.

Scheer (1989h)

Scheer,A.-W.: Betriebswirtschaftliche Konsequenzen von CIM; in: Didacticum, o.Jg. (1989), Nr. 7, S. 30-33.

Scheer (1991d)

Scheer,A.-W.: Architektur integrierter Informationssysteme - Grundlagen der Unternehmensmodellierung, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991.

Scheschonk (1977)

Scheschonk,G.: Eine einführende Zusammenfassung der Petri-Netz-Theorie, Bericht Nr. 77/22, Fachbereich 20 (Informatik), Technische Universität Berlin, Berlin 1977.

Scheschonk (1982a)

Scheschonk,G.: On the Construction of System Nets; in: Girault,C.; Reisig,W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 104-108.

Schiffers (1977)

Schiffers,M.: Behandlung eines Synchronisationsproblems mit gefärbten Petri-Netzen, Diplomarbeit, Mathematisches Institut, Universität Bonn, Bonn 1977.

Schittkowski (1980)

Schittkowski,N.: Nonlinear Programming Codes, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 183, Berlin - Heidelberg - New York 1980.

Schlegel (1975)

Schlegel,H.: Produktionsbewertungsmodelle; in: Wirtschaftswissenschaftliches Studium, 4. Jg. (1975), S. 464-471.

Schlick (1930a)

Schlick,M.: Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik.; in: Die Naturwissenschaften, 19. Jg. (1930), S. 145-162.

Schmelzer (1990)

Schmelzer,H.J.: Steigerung der Effektivität und Effizienz durch Verkürzung von Entwicklungszeiten; in: Reichwald,R.; Schmelzer,H.J. (Hrsg.): Durchlaufzeiten in der Entwicklung - Praxis des industriellen F&E-Managements, München - Wien 1990, S. 27-63.

Schmid,H. (1974)

Schmid,H.A.: An Approach to the Communication and Synchronisation of Processes; in: Günther,A.; Levrat,B.; Lipps,H. (Hrsg.): Proceedings of the International Computing Symposium 1973, 4.-7.09.1973 in Davos, Amsterdam - London - New York 1974, S. 165-171.

Schmidt,R.H. (1983)

Schmidt,R.H.: Lehren, Rationalität und Leitbilder; zu Dieter Schneiders "Geschichte betriebswirtschaftlicher Theorie"; in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 35. Jg. (1983), S. 503-525.

Schmitz,P. (1991)

Schmitz,P.; Nöcker,C.; Stelzer,D.: Sicherheit von Expertensystemen; in: Müller-Böling,D.; Seibt,D.; Winand,U. (Hrsg.): Innovations- und Technologiemanagement, Festschrift für Professor Dr. Norbert Szyperski zum 60. Geburtstag, Stuttgart 1991, S. 401-426.

Schnabel (1982)

Schnabel,R.B.: Comments on Evaluating Algorithms and Codes for Mathematical Programming; in: Mulvey,J.M. (Hrsg.): Evaluating Mathematical Programming Techniques, Proceedings of a Conference, 5.-6.01.1981 in Boulder, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 199, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 166-169.

Schneider,D. (1972)

Schneider,D.: "Flexible Planung als Lösung der Entscheidungsprobleme unter Ungewißheit?" in der Diskussion; in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 24. Jg. (1972), S. 456-479.

Schneider,H.-J. (1978)

Schneider,H.-J.: Möglichkeiten und Grenzen normativer Ansätze für die Gestaltung von Informationssystemen; in: Hansen,H.R. (Hrsg.): Entwicklungstendenzen der Systemanalyse, 5. Wirtschaftsinformatik-Symposium der IBM Deutschland GmbH, 10.-12.10.1978 in Bad Neuenahr, München - Wien 1978, S. 31-58.

Schnupp (1981)

Schnupp,P.: Methoden ohne Theorie; in: computer magazin, 10. Jg. (1981), Heft 12, S. 60-61.

Schopman (1986)

Schopman,J.: Negative Cross-fertilization; in: Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie, Bd. 17 (1986), S. 59-67.

Schröder,H. (1983)

Schröder,H.-H.; Peters,U.: Standard-Software-Pakete für Mikrocomputer in der Materialwirtschaft industrieller Klein- und Mittelbetriebe; in: Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, 32. Jg. (1983), S. 76-90.

Schroff (1974)

Schroff,R.: Vermeidung von totalen Verklemmungen in bewerteten Petrinetzen, Dissertation, Technische Universität München, München 1974.

Schumacher (1975)

Schumacher,F.: Simulation of Transport and Storage of Spent Nuclear Fuel; in: o.V.: Proceedings of the International Symposium on Course SIMULATION'75, im Juni 1975 in Zürich, o.O. 1975, S. 408-413.

Schumacher (1978)

Schumacher,F.: Beschreibung und Auswertung diskreter dynamischer Systeme, Bericht KfK 2635, Institut für Datenverarbeitung in der Technik, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung, Karlsruhe 1978.

Schweizerische Vereinigung Datenverarbeitung (1985)

Schweizerische Vereinigung für Datenverarbeitung (VD) (Hrsg.): Evaluation von Informatiklösungen - Verfahren, Methoden, Beispiele, Bern - Stuttgart 1985.

Seibt (1983)

Seibt,D.; Emde,W.: Planung der Anwendungs-Software; in: Fuchs,J.; Schwantag,K. (Hrsg.): agplan-Handbuch zur Unternehmensplanung, 5. Band, Stand: 27. Ergänzungslieferung 1983, Berlin 1970ff., Kennzahl 6202.

Shackel (1991a)

Shackel,B.; Richardson,S.J. (Hrsg.): Human Factors for Informatics Usability, Cambridge (Großbritannien) - New York - Port Chester ... 1991.

Shackel (1991b)

Shackel,B.: Usability - Context, Framework, Definition, Design and Evaluation; in: Shackel,B.; Richardson,S.J. (Hrsg.): Human Factors for Informatics Usability, Cambridge (Großbritannien) - New York - Port Chester ... 1991, S. 21-37.

Shapiro,R. (1972)

Shapiro,R.M.; Saint,H.; Presberg,D.L.: Concurrent Compiling, Vol. 1: Representation of Algorithms as Cyclic Partial Ordering, Final Technical Report RADC-TR-72-64, Applied Data Research, Inc., Wakefield 1972.

Shapiro,R. (1975b)

Shapiro,R.M.: System Modeling with Net Structures; in: Massachusetts Computer Associates, Inc. (Hrsg.): Second Semi-Annual Technical Report (1.12.1973-31.03.1975) for the Project "Development of Theoretical Foundations for Description and Analysis of Discrete Information Systems", Wakefield 1975, S. 95-147.

Shapiro,R. (1979)

Shapiro,R.M.: Towards a Design Methodology for Information Systems; in: Petri,C.A. (Hrsg.): Ansätze zur Organisationstheorie Rechnergestützter Informationssysteme, Bericht Nr. 111, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, München - Wien 1979, S. 107-118.

Sifakis (1977a)

Sifakis,J.: Use of Petri Nets for Performance Evaluation; in: Beilner,H.; Gelenbe,E. (Hrsg.): Measuring, Modelling and Evaluating Computer Systems, Amsterdam 1977, S. 75-93.

Sifakis (1977b)

Sifakis,J.: Homomorphisms of Petri Nets: Application to the Realization of Fault Tolerant Systems, Rapport de Recherche RR.90, Laboratoire associe au CNRS no. 7, Universite Scientifique et Medicale et Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble 1977.

Sifakis (1979b)

Sifakis,J.: Realization of Fault-Tolerant Systems by Coding Petri Nets; in: Journal of Design Automation and Fault-Tolerant Computing, Vol. 3 (1979), S. 93-107.

Sifakis (1982)

Sifakis,J.: A Unified Approach for Studying the Properties of Transition Systems; in: Theoretical Computer Science, Vol. 18 (1982), S. 227-258.

Sikora,K. (1986)

Sikora,K.: Systemgrenzen und Planung, Arbeitsbericht Nr. 71, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und betriebswirtschaftliche Planung, Universität Köln, Köln 1986.

Sikora,K. (1989)

Sikora,K.: Systemgrenzen und Planung; in: Szyperski,N.; Winand,U. (Hrsg.): Handwörterbuch der Planung, Stuttgart 1989, Sp. 1953-1970.

Silva,M. (1990b)

Silva,M.; Valette,R.: Flexible Manufacturing Systems and Petri nets, Tutorial am 26.06.1990 in Paris anlässlich: 11th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, 27.-29.06.1990 in Paris.

Simon,H. (1983a)

Simon,H.A.: Search and Reasoning in Problem Solving; in: Pearl,J. (Hrsg.): Search and Heuristics, Reprinted from the Journal of Artificial Intelligence, Volume 21, Numbers 1,2 , Amsterdam - New York - Oxford 1983, S. 7-29.

Simon,H. (1990)

Simon,H.A.: Prediction and Prescription in Systems Modeling; in: Operations Research, Vol. 38 (1990), S. 7-14.

Simon,He. (1989a)

Simon,He.: Die Zeit als strategischer Erfolgsfaktor; in: Hax,H.; Kern,W.; Schröder,H.-H. (Hrsg.): Zeitaspekte in betriebswirtschaftlicher Theorie und Praxis, 50. Wissenschaftliche Jahrestagung des Verbandes der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V., 24.-28.05.1988 in Köln, Stuttgart 1989, S. 117-130.

Sleeman (1981)

Sleeman,D.H.: A Rule-Based Task Generation system; in: Drinan,A. (Hrsg.): Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-81, 24.-28.08.1981 in Vancouver, o.O. (Menlo Park) 1981, Vol. II, S. 882-887.

Sonnenberg (1974)

Sonnenberg,W.: Zur Beschreibung der Ablaufstruktur von Programmen mit Petri-Netzen, Internbericht Nr. 10/74, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1974.

Souder (1972)

Souder, W.E.: A Scoring Methodology for Assessing the Suitability of Management Science Models; in: Management Science, Vol. 18 (1982), S. B-526 - B-543.

Srikanth (1987)

Srikanth, R.; Jarke, M.: Individual Negotiation Support in Group DSS; in: Bracchi, G.; Tschritzis, D. (Hrsg.): Office Systems: Methods and Tools, Proceedings of the IFIP TC 8/WG 8.4 Working Conference on Methods and Tools for Office Systems, 22.-24.10.1986 in Pisa, Amsterdam - New York - Oxford ... 1987, S. 301-324.

Stadtler (1983a)

Stadtler, H.: Interaktive Lösung schlecht-strukturierter Entscheidungsprobleme - Methoden und Erkenntnisse bei der Stauung von Chemikalientankern, Dissertation, Universität Hamburg, München 1983.

Stählin (1973)

Stählin, W.: Theoretische und technologische Forschung in der Betriebswirtschaftslehre, Stuttgart 1973.

Stahlknecht (1981)

Stahlknecht, P.; Nordhauf, R.: Fallstudie Methodik der Hardware- und Software-Auswahl in kleinen und mittleren Unternehmungen dargestellt am Beispiel eines Fachverlages, München - Wien 1981.

Stahlknecht (1982)

Stahlknecht, P.: Der Einzug der Mathematik in die Software-Entwicklung; in: Angewandte Informatik, 24. Jg. (1982), S. 115-125.

Stahlknecht (1989)

Stahlknecht, P.: Einführung in die Wirtschaftsinformatik, 4. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York ... 1989.

Stahlknecht (1991)

Stahlknecht, P.; Appelfeller, W.; Drasdo, A.; Meier, H.; Nieland, S.: Arbeitsbuch Wirtschaftsinformatik, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991.

Starke (1980)

Starke, P.H.: Petri-Netze - Grundlagen, Anwendungen, Theorie, Berlin (Ost) 1980.

Staudinger (1990)

Staudinger, R.: The Design of an Industrial LP Model; in: Operations Research-Spektrum, Bd. 12 (1990), S. 173-179.

Steffen (1991)

Steffen, R.: Verbindung computergestützter Erzeugniskonstruktion (CAD) mit der Kosten- und Erlösrechnung in CIM-Konzeptionen; in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 43. Jg. (1991), S. 359-375.

Stegmüller (1970a)

Stegmüller, W.: Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie, Bd. II: Theorie und Erfahrung (Erster Halbband), Berlin - Heidelberg - New York 1970.

Stegmüller (1976b)

Stegmüller, W.: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie - Eine kritische Einführung, Bd. 1, 6. Aufl., Stuttgart 1976.

Stegmüller (1986a)

Stegmüller, W.: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie - Eine kritische Einführung, Bd. II, 7. Aufl., Stuttgart 1986.

Steinke (1980)

Steinke, D.: Standard-Anwender-Software, Darstellung und Beurteilung kommerzieller Datenverarbeitungsprogramme aus organisatorischer Sicht, 2. Aufl., Münster 1980.

Stellmacher (1985)

Stellmacher, I.: Entwurfskriterien für Mensch-Maschine-Schnittstellen - Ein Leitfaden für die softwareergonomische Gestaltung der Mensch-Maschine-Kommunikation, Arbeitspapiere der GMD 140, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1985.

Stewen (1975)

Stewen, L.: Auswertungsnetze als Hilfsmittel zur Modellbildung - Probleme und deren Lösungen -; in: Mühlbacher, J. (Hrsg.): GI - 5. Jahrestagung, 8.-10.10.1975 in Dortmund, Lecture Notes in Computer Science 34, Berlin - Heidelberg - New York 1975, S. 462-474.

Strassert (1981)

Strassert, G.: Bewertungshokuspokus durch Nutzwertanalyse; in: Institut für Regionalwissenschaft der Universität Karlsruhe (Hrsg.): Kritik der Nutzwertanalyse, IfR Diskussionspapier Nr. 11, o.O. (Karlsruhe) 1981, S. 19-37.

Strebel (1969)

Strebel, H.: Scoring-Methoden als Entscheidungshilfen bei der Wahl von Forschungs- und Entwicklungsprojekten; in: Layer, M.; Strebel, H. (Hrsg.): Rechnungswesen und Betriebswirtschaftspolitik, Festschrift für Gerhard Krüger zu seinem 65. Geburtstag, Berlin 1969, S. 251-278.

Strebel (1975)

Strebel, H.: Forschungsplanung mit Scoring-Modellen, Baden-Baden 1975.

Suzuki, I. (1980a)

Suzuki, I.; Murata, T.: A Method for Hierarchically Representing Large Scale Petri Nets; in: o.V.: Papers of the IEEE 1980 International Conference on Circuits and Computers, Vol. 2, Portchester 1980, S. 620-623.

Symons (1980b)

Symons, F.J.W.: Introduction to Numerical Petri Nets, a General Graphical Model of Concurrent Processing Systems; in: Australian Telecommunication Research, Vol. 14 (1980), No. 1, S. 28-33.

Symons (1980c)

Symons, F.J.W.: The Verification of Communication Protocols Using Numerical Petri Nets; in: Australian Telecommunication Research, Vol. 14 (1980), No. 1, S. 34-38.

Szlanco (1978)

Szlanco, J.: Petri nets For Proving Some Correctness Properties of Parallel Programs; in: Smedema, C.H. (Hrsg.): Real Time Programming, Proceedings of the IFAC/IFIP Workshop, 20.-22.06.1977 in Eindhoven, Oxford - New York - Toronto ... 1978, S. 75-83.

Szyperski (1974)

Szyperski, N.; Winand, U.: Entscheidungstheorie - Eine Einführung unter besonderer Berücksichtigung spieltheoretischer Konzepte, Stuttgart 1974.

Szyperski (1978)

Szyperski, N.; Winand, U.: Zur Bewertung von Planungstechniken in Rahmen einer betriebswirtschaftlichen Unternehmungsplanung; in: Pfohl, H.-C.; Rürup, B.: Anwendungsprobleme moderner Planungs- und Entscheidungstechniken, Hanstein 1978, S. 195-218.

Szyperski (1979a)

Szyperski, N.; Behrens, L.; Höring, K.; Steinbrecher, W.; Wolff, M.: Betriebswirtschaftliche Entwicklungsplanung für Informations-Dienstleistungsbetriebe unter besonderer Berücksichtigung der Fachinformationssysteme (PID), Ergebnisbericht des Projektes PID, BIFOA-Arbeitspapier 79AP9, Köln 1979.

Szyperski (1980a)

Szyperski, N.; Winand, U.: Grundbegriffe der Unternehmungsplanung, Stuttgart 1980.

Szyperski (1983)

Szyperski, N.; Eul-Bischoff, M.: Interpretative Strukturmodellierung (ISM) - Stand der Forschung und Entwicklungsmöglichkeiten, Braunschweig - Wiesbaden 1983.

Taylor, B. (1982)

Taylor, B.W.; Moore, L.J.: Estimating Job Flow-Times in a Job Shop for Contractually Negotiated Due-Dates; in: The Journal of the Operational Research Society, Vol. 33 (1982), S. 845-854.

Tempelmeier, T. (1990)

Tempelmeier, T.: Eine Übersicht über die Software-Entwurfsmethode HOOD; in: Gerth, W.; Baacke, P. (Hrsg.): PEARL 90 - Workshop über Realzeitsysteme, 11. Fachtagung des PEARL-Vereins e.V., 29.-30.11.1990 in Boppard, Proceedings, Informatik-Fachberichte 262, Berlin - Heidelberg - New York ... 1990, S. 34-43.

Thesen (1976)

Thesen,A.: Heuristic Scheduling of Activities under Resource and Precedence Restrictions; in: Management Science, Vol. 23 (1976), S. 412-422.

Thiel,C. (1972)

Thiel,C.: Grundlagenkrise und Grundlagenstreit - Studie über das normative Fundament der Wissenschaften am Beispiel von Mathematik und Sozialwissenschaft, Habilitationsschrift, Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenheim 1972.

Thieler-Mevissen (1977)

Thieler-Mevissen,G.: The Petri Net Calculus of Predicate Logic, Interner Bericht ISF-76-09, Institut für Informationssystemforschung, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1977.

Thieler-Mevissen (1979)

Thieler-Mevissen,G.: Netze für Anfänger, Informatik-Kolleg, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Darmstadt 1979.

Thom (1987)

Thom,N.: Personalentwicklung als Instrument der Unternehmungsführung - Konzeptionelle Grundlagen und empirische Studien, Habilitationsschrift, Universität Köln 1984, Stuttgart 1987.

Thome,R. (1990)

Thome,R.: Wirtschaftliche Informationsverarbeitung, München 1990.

Törn (1981)

Törn,A.A.: Simulation Graphs: A General Tool for Modeling Simulation Design; in: Simulation, Vol. 39 (1981), Heft December, S. 187-194.

Tourres (1976)

Tourres,L.: Une methode nouvelle d'etude des systemes logiques et son application a la realisation d'automatismes programmes; in: Revue Generale d'Electricite, Tome 85 (1976), No. 3, S. 215-219.

Tremolieres (1979)

Tremolieres,R.: De Nouvelles Voies pour la Simulation - Initiation aux Reseaux de Petri; in: Informatique et Gestion, No. 105 (1979), S. 60-63.

Trier (1977)

Trier,B.: Die Theorie der parallelen Prozesse als Instrument zur Modellierung und Simulation soziotechnischer Systeme, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart 1977.

Tsichritzis (1971)

Tsichritzis,D.: Modular System Description, Technical Report No. 33, Department of Computer Science, University of Toronto, Toronto 1971.

Ullrich (1974)

Ullrich,G.; Wendt,S.: Petri-Netze zur Modellierung von Schaltwerkssystemen; in: o.V.: Nachrichtentechnische Fachberichte, Bd. 49: NTG-Fachtagung Entwurfsautomatisierung, Braunschweig 1974, S. 150-155.

Ullrich (1976)

Ullrich,G.: Der Entwurf von Steuerstrukturen für parallele Abläufe mit Hilfe von Petri-Netzen, Dissertation an der Universität Hamburg, Hamburg 1976. (Auch veröffentlicht als: Bericht Nr. 36, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Hamburg 1977.)

Ulrich,W. (1983)

Ulrich,W.: Critical Heuristics of Social Planning - A New Approach to Practical Philosophy, Bern - Stuttgart 1983.

Valette (1978a)

Valette,R.: etude comparative de deux outils de representation: Grafcet et reseaux de Petri; in: le nouvel Automatismes, Tome 23 (1978), S. 377-382.

Valette (1978b)

Valette,R.; Diaz,M.: Top-Down Formal Specification and Verification of Parallel Control Systems; in: Digital Processes, Vol. 4 (1978), S. 181-199.

Valette (1979a)

Valette,R.: Analysis of Petri Nets by Stepwise Refinements; in: Journal of Computer and System Sciences, Vol. 18 (1979), S. 35-46.

Valette (1979b)

Valette,R.; Diaz,M.: A Methodology for Easily Provable Implementation of Synchronization Mechanisms; in: Syre,H.J. (Hrsg.): 1st European Conference on Parallel and Distributed Processing, 14.-16.02.1979 in Toulouse, Toulouse 1979, S. 156-162.

Valette (1982a)

Valette,R.: Reliability and Recovery Issues; in: Girault,C.; Reisig,W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 208-211.

Valette (1982c)

Valette,R.: Verification des Specification d'un Automatsme; in: o.V.: Les Methodes Modernes d'Etudes et de Realisation des Automatismes, 2.-3.02.1978 in Gif-sur-Yvette, o.O. 1982, o.S.

Valette (1983)

Valette,R.; Courvoisier,M.; Mayeux,D.: Control of Flexible Production Systems and Petri Nets; in: Pagnoni,A.; Rozenberg,G. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the 3rd European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 27.-30.09.1982 in Varenna, Informatik-Fachberichte 66, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1983, S. 264-277.

Valk (1980)

Valk,R.: Concluding from Net Behaviour to Net Structure or A Necessary Condition for the Holding of a Fact; in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 4 (1980), S. 5-6.

Valk (1981a)

Valk,R.; Vidal-Naquet,G.: Petri Nets and Regular Languages; in: Journal of Computer and System Sciences, Vol. 23 (1981), S. 299-325.

Valk (1981b)

Valk,R.: Generalization of Petri Nets; in: Gruska,J.; Chytil,M.: Mathematical Foundations of Computer Science 1981, Proceedings, 10th Symposium, 31.08.-4.09.1981 in Strbske Pleso, Lecture Notes in Computer Science 118, Berlin - Heidelberg - New York 1981, S. 140-155.

Valk (1983b)

Valk,R.; Jantzen,M.: The Residue of Vector Sets with Applications to Decidability Problems in Petri Nets, Skript, präsentiert am 28.09.1983 in Toulouse anlässlich: 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets. (Anmk. des Verf.: erweiterte Fassung von Valk (1983c).)

Valk (1983c)

Valk,R.; Jantzen,M.: The Residue of Vector Sets with Applications to Decidability Problems in Petri Nets; in: o.V.: Papers presented at the 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-29.09.1983 in Toulouse, o.O. 1983, S. 342-363. (Anmk. des Verf.: Kurzfassung von Valk (1983b).)

Valk (1983d)

Valk,R.: Infinite Behaviour of Petri Nets; in: Theoretical Computer Science, Vol. 25 (1983), S. 311-341.

Vetschera (1990)

Vetschera,R.: Group Decision and Negotiation Support - A Methodological Survey; in: Operations Research-Spektrum, Bd. 12 (1990), S. 67-77.

Vetschera (1991a)

Vetschera,R.: GDSS-X: An Experimental Group Decision Support System for Program Planning; in: Korhonen,P.; Lewandowski,A.; Wallenius,J. (Hrsg.): Multiple Criteria Decision Support, Proceedings of the International Workshop, 07.-11.08.1989 in Helsinki, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991, S. 369-376.

Vidal-Naquet (1982b)

Vidal-Naquet,G.; Roucairaol,G.; Berthelot,G.; Memmi,G.; Sifakis,J.; Girault,C.: Extensions et Abreviations des Reseaux de Petri, D.E.A. de Systemes Informatiques, Institut de Programmation, Universite Pierre et Marie Curie Paris, Paris 1982.

Viefhues (1982)

Viefhues,D.: Mehrzielorientierte Projektplanung, Methodologie und Entscheidungskalküle zur Projektablauf- und -anpassungsplanung, Dissertation, Universität Köln 1980, Frankfurt - Bern 1982.

von Martial (1991a)

von Martial,F.; Victor,F.: Interaktive Planung von Bürovorgängen; in: Lutze,R.; Kohl,A. (Hrsg.): Wissensbasierte Systeme im Büro - Ergebnisse aus dem WISDOM-Verbundprojekt, München - Wien 1991, S. 313-324.

von Ockham (1984)

von Ockham,W.: Texte zur Theorie der Erkenntnis und der Wissenschaft, Stuttgart 1984.

von Weizsäcker (1985)

von Weizsäcker,C.F.: Aufbau der Physik, München - Wien 1985.

von Zimmermann (1990)

von Zimmermann,P.: Einsatz von objektorientierter Softwaretechnologie im Rechnungswesen; in: Scheer,A.-W. (Hrsg.): Rechnungswesen und EDV, 11. Saarbrücker Arbeitstagung 1990, Heidelberg 1990, S. 235-264.

Voss,K. (1983b)

Voss,K.: On the Notion of Interface in Condition/Event-Systems; in: Pagnoni,A.; Rozenberg,G. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the 3rd European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 27.-30.09.1982 in Varenna, Informatik-Fachberichte 66, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1983, S. 278-291.

Wand (1989)

Wand,Y.: A Proposal for a Formal Model of Objects; in: Kim,W.; Lachovsky,F.H. (Hrsg.): Object-Oriented Concepts, Databases, and Applications, New York - Reading - Menlo Park ... 1989, S. 537-559.

Weck (1991d)

Weck,M.; Lange,N.: COSMOS 2000, die modulare, offene Steuerungsarchitektur für flexible Fertigungssysteme; in: Pritschow,G.; Spur,G.; Weck,M. (Hrsg.): Leit- und Steuerungstechniken in flexiblen Produktionsanlagen, München - Wien 1991, S. 3-31.

Weck (1991e)

Weck,M.; Lopez,M.: Konfigurierbare Bedienoberflächen im Fertigungsbereich; in: Pritschow,G.; Spur,G.; Weck,M. (Hrsg.): Leit- und Steuerungstechniken in flexiblen Produktionsanlagen, München - Wien 1991, S. 115-130.

Wegner,E. (1982a)

Wegner,E.: Transforming nets along the syntactic production of programs; in: Girault,C.; Reisig,W. (Hrsg.): Application and Theory of Petri Nets, Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 23.-26.09.1980 in Strasbourg bzw. 28.-30.09.1981 in Bad Honnef, Informatik-Fachberichte 52, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 32-37.

Weinberg (1974)

Weinberg,P.: Axiomatisierung in der Betriebswirtschaftslehre; in: Grochla,E.; Wittmann,W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, 4. Aufl., Stuttgart 1974, Sp. 363-370.

Weller (1991)

Weller,F.: Expertensysteme in der Betriebswirtschaft - Plädoyer für eine realistischere Einschätzung der Leistungspotentiale von Expertensystemen; in: Information Management, 6. Jg. (1981), Heft 1, S. 18-23.

Wendt (1980b)

Wendt,S.: Modified Petri Nets as Flowcharts for Recursive Programs; in: Software - Practice and Experience, Vol. 10 (1980), S. 935-942.

Wendt (1989)

Wendt, S.: Nichtphysikalische Grundlagen der Informationstechnik - Interpretierte Formalismen, Berlin - Heidelberg - New York ... 1989.

Wenkel (1988)

Wenkel, C.: Strategisches Management in zersplitterten Branchen - Eine Anwendung der wettbewerbsstrategischen Absatzmarkttheorie von Michael E. Porter in metakritischer Absicht, Diplomarbeit, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und betriebswirtschaftliche Planung, Universität Köln, Köln 1988.

White, G. (1977)

White, G.M.: Modelling of Minicomputer I/O Devices by Petri Nets; in: o.V.: Proceedings of the International Symposium on Mini- and Microcomputers (IEEE), 8.-11.11.1976 in Montreal, New York 1977, S. 156-159.

Whitehouse (1973)

Whitehouse, G.E.: Systems Analysis and Design Using Network Techniques, Englewood Cliffs 1973.

Wiest (1973)

Wiest, J.D.: Toward a Man-Machine Interactive System for Project Scheduling; in: Elmaghraby, S.E. (Hrsg.): Symposium on the Theory of Scheduling and Its Applications, 15.-17.05.1972 in Raleigh, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 86, Berlin - Heidelberg - New York 1973, S. 109-126.

Wild (1966)

Wild, J.: Grundlagen und Probleme der betriebswirtschaftlichen Organisationslehre - Entwurf eines Wissenschaftsprogramms, Berlin 1966.

Wildemann (1988f)

Wildemann, H.: Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung, München 1988.

Wildemann (1990b)

Wildemann, H.: Integrierte Produktentwicklung XI / Höhere Zeiteffizienz von F+E, Produktion und Zulieferung - Neben Kosten und Qualität kann der Faktor Zeit im Wettbewerb zum entscheidenden Element werden; in: Handelsblatt, Nr. 195 (Ausgabe vom 09.10.1990), S. 26.

Wilkins (1984)

Wilkins, D.E.: Domain-independent Planning: Representation and Plan Generation; in: Artificial Intelligence, Vol. 22 (1984), S. 269-301.

Willenbacher (1991)

Willenbacher, K.: Was erwarten die Betriebe von der Zeitwirtschaft? - die Zeit als Wettbewerbsfaktor in den Unternehmen; in: Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, 40. Jg. (1991), S. 4-7.

Williams, H. (1985)

Williams, H.P.: Model Building in Mathematical Programming, 2. Aufl., Chichester - New York - Brisbane - Toronto - Singapore 1985.

Winand (1978)

Winand, U.: Spieltheorie und Unternehmungsplanung - Anwendungsbedingungen und konzeptionelle Erweiterungen spieltheoretischer Modelle und Lösungsmethoden für betriebswirtschaftliche Planungsprozesse, Dissertation (überarbeitete Fassung), Universität Köln 1976, Berlin 1978.

Winand (1980)

Winand, U.; Rosenstengel, B.: Interaktive Improvisation von Flugplänen auf der Basis der Petri-Netztheorie; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 50. Jg. (1980), S. 1229-1256.

Windisch (1979)

Windisch, I.: Zur Anwendung von Petri-Graphen beim rechnergestützten Entwurf digitaler Automaten, Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden 1979.

Winkowski (1976b)

Winkowski,J.: Formal theories of Petri nets and net simulation, Bericht Nr. 252, Centrum Obliczeniowe Polskiej Akademij Nauk (Computation Centre Polish Academy of Sciences), Warschau 1976.

Winkowski (1982)

Winkowski,J.: An Algebraic Description of System Behaviours; in: Theoretical Computer Science, Vol. 21 (1982), S. 315-340.

Winter,Ro. (1991)

Winter,Ro.: Mehrstufige Produktionsplanung in Abstraktionshierarchien auf der Basis relationaler Informationsstrukturen, Dissertation, Universität Frankfurt 1989, Berlin - Heidelberg - New York ... 1991.

Wittemann (1985)

Wittemann,N.: Produktionsplanung mit verdichteten Daten, Dissertation, Universität des Saarlandes in Saabrücken, Berlin - Heidelberg - New York ... 1985.

Wittgenstein (1921)

Wittgenstein,L.: Logisch-Philosophische Abhandlung.; in: Annalen der Naturphilosophie, Bd. 14. (1921), S. 185-262.

Wohlgemuth (1989a)

Wohlgemuth,A.C.: Die klippenreiche Suche nach den Erfolgsfaktoren - Vorschläge zur Meisterei der methodischen Herausforderungen; in: Die Unternehmung, 43. Jg. (1989), S. 89-111.

Wolf,S. (1991)

Wolf,S.; Setzer,R.: Wissensverarbeitung mit KEE - Einführung in die Erstellung von Expertensystemen, München - Wien 1991.

Wollnik (1977)

Wollnik,M.: Die explorative Verwendung systematischen Erfahrungswissens - Plädoyer für einen aufgeklärten Empirismus in der Betriebswirtschaftslehre; in: Köhler,R. (Hrsg.): Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre, Kommission Wissenschaftstheorie im Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V., Bericht über die Tagung in Aachen, März 1976, Stuttgart 1977, S. 37-64.

Wollnik (1986)

Wollnik,M.: Implementierung computergestützter Informationssysteme - Perspektive und Politik informationstechnologischer Gestaltung, Dissertation, Universität Köln, Berlin - New York 1986.

Wossidlo (1976)

Wossidlo,P.R.: Realtheorien in der Betriebswirtschaftslehre - gegen die Helotistischen Symptome erkenntnistheoretischen Diskussionen unseres Faches -; in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 28. Jg. (1976), S. 465-484.

Yoeli (1978)

Yoeli,M.; Ginzburg,A.: Petri Net Languages and Their Applications, Research Report CS-78-45, Department of Computer Science, Technion - Israel Institut of Technology, Haifa, veröffentlicht als: Report N2L 3G1, University of Waterloo, Waterloo 1978.

Yoeli (1982b)

Yoeli,M.: Behavioral Specifications of Control Structures, Interim Scientific Report No. 1, Computer Science Department, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa 1982.

Young,S. (1966)

Young,S.: Management - A System Analysis, Glennview 1966.

Yu,S. (1978)

Yu,S.H.; Murata,T.: PT-Marked Graphs: A Reduced Model of Petri Nets; in: o.V.: Proceedings of the 16th Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, New York 1978, S. 175-183.

Zachariades (1977)

Zachariades,M.: MAS. Realisation d'un langage d'aide a la description et a la conception des systemes logiques, Dissertation, Universität Grenoble, Grenoble 1977.

Zangemeister (1976)

Zangemeister,C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik, 4. Aufl., München 1976.

Zanzinger (1991)

Zanzinger,T.: Hardware/ PC werden immer leistungsfähiger - Lösungen für technisch-wissenschaftliche Anwendungen - Technologische Grenzen der Rechnerwelt sind fließend; in: Handelsblatt, Ausgabe vom 13.03.1991 (Nr. 51), S. B17.

Zave (1976)

Zave,P.: On the Formal Definition of Processes; in: o.V.: Proceedings of the International Conference on Parallel Processing, 24.-27.08.1976 in Waldenwoods, Waldenwoods 1976, S. 35-42.

Zelewski (1986a)

Zelewski,S.: Das Leistungspotential der Künstlichen Intelligenz - Eine informationstechnisch-betriebswirtschaftliche Analyse, Band 1, 2 und 3, Dissertation (unter dem Titel: Das Leistungspotential der Künstlichen Intelligenz - Bestandsaufnahme und Bewertungsansätze aus informationstechnisch-betriebswirtschaftlicher Perspektive unter besonderer Berücksichtigung produktionswirtschaftlicher Aspekte -), Universität Köln 1985, Witterschlick (Bonn) 1986.

Zelewski (1986e)

Zelewski,S.: Schnittstellen bei betrieblichen Informationssystemen - eine Darstellung aus systemtheoretischer und betriebswirtschaftlicher Sicht -, Arbeitsbericht Nr. 6, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1986.

Zelewski (1987b)

Zelewski,S.: Schnittstellen bei betrieblichen Informationssystemen; in: Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis, 39. Jg. (1987), S. 550-561.

Zelewski (1989a)

Zelewski,S.: Komplexitätstheorie - als Instrument zur Klassifizierung und Beurteilung von Problemen des Operations Research, Braunschweig - Wiesbaden 1989.

Zelewski (1989d)

Zelewski,S.: Einsatz von Expertensystemen in den Unternehmen - Anwendungsmöglichkeiten, Bewertungsaspekte und Probleme künstlicher Intelligenz, Ehningen - Stuttgart 1989.

Zentes (1976)

Zentes,J.: Die Optimalkomplexion von Entscheidungsmodellen - Ein Beitrag zur betriebswirtschaftlichen Meta-Entscheidungstheorie, Dissertation, Universität Saarbrücken 1976, Köln - Berlin - Bonn ... 1976.

Zervos (1977)

Zervos,C.R.; Irani,K.B.: Colored Petri Nets: Their Properties and Applications, Dissertation an der University of Michigan, Technical Report No. RADC-TR-77-246, Department of Electrical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor 1977.

Ziegler,J. (1990)

Ziegler,J.E.; Vossen,P.H.; Hoppe,H.U.: Cognitive Complexity of Human-Computer Interfaces: An Application and Evaluation of Cognitive Complexity Theory for Research on Direct Manipulation-Style Interaction; in: Falzon,P. (Hrsg.): Cognitive Ergonomics: Understanding, Learning and Designing Human-Computer Interaction, London - San Diego - New York ... 1990, S. 27-38.

Zisman (1977)

Zisman,M.D.: Representation, Specification and Automation of Office Procedures, Dissertation, Department of Decision Sciences, University of Pennsylvania, Philadelphia 1977.

Zuberek (1980)

Zuberek,W.M.: Timed Petri Nets and Preliminary Performance Evaluation; in: o.V.: Proceedings of the 7th Annual Symposium on Computer Architecture, 6.-8.05.1980 in La Baule, New York 1980, S. 88-96.

Zuse,K. (1980b)

Zuse,K.: Petri-Netze aus der Sicht des Ingenieurs, Braunschweig - Wiesbaden 1980.

Zuse,K. (1982)

Zuse,K.: Anwendungen von Petri-Netzen, Braunschweig - Wiesbaden 1982.

**Institut für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft
der Universität Leipzig**

Verzeichnis der Arbeitsberichte

- Nr. 1: ZELEWSKI, STEPHAN: Das Konzept technologischer Theorietransformationen - eine Analyse aus produktionswirtschaftlicher Perspektive, Leipzig 1994.
- Nr. 2: SIEDENTOPF, JUKKA: Anwendung und Beurteilung heuristischer Verbesserungsverfahren für die Maschinenbelegungsplanung - Ein exemplarischer Vergleich zwischen Neuronalen Netzen, Simulated Annealing und genetischen Algorithmen, Leipzig 1994.
- Nr. 3: ZELEWSKI, STEPHAN: Unternehmenskrisen und Konzepte zu ihrer Bewältigung, Leipzig 1994.
- Nr. 4: SIEDENTOPF, JUKKA: Ein effizienter Scheduling-Algorithmus auf Basis des Threshold Accepting, Leipzig 1995.
- Nr. 5: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 1: Exposition, Leipzig 1995.
- Nr. 6: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 2: Bezugsrahmen, Leipzig 1995.
- Nr. 7: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 3: Einführung in Stelle/Transition-Netze, Leipzig 1995.
- Nr. 8: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 4: Verfeinerungen von Stelle/Transition-Netzen, Leipzig 1995.
- Nr. 9: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 5: Einführung in Synthetische Netze, Teilband 5.1: Darstellung des Kernkonzepts, Leipzig 1995.
- Nr. 10: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 5: Einführung in Synthetische Netze, Teilband 5.2: Auswertungsmöglichkeiten, Leipzig 1995.
- Nr. 11: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 6: Erweiterungen von Synthetischen Netzen, Leipzig 1995.
- Nr. 12: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 7: Fallstudie, Leipzig 1995.
- Nr. 13: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 8: Charakterisierung des Petrinetz-Konzepts, Leipzig 1995.
- Nr. 14: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 9: Beurteilung des Petrinetz-Konzepts, Leipzig 1995.
- Nr. 15: ZELEWSKI, STEPHAN: Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme (Projekt PEMOPS), Band 10: Petrinetz-Literatur, Leipzig 1995.

Verzeichnis der Arbeitsberichte

- Nr. 16: SIEDENTOPF, JUKKA: An Efficient Scheduling Algorithm Based upon Threshold Accepting, Leipzig 1995.
- Nr. 17: SIEDENTOPF, JUKKA: The Threshold Waving Algorithm for Job Shop Scheduling, Leipzig 1995.
- Nr. 18: ZELEWSKI, STEPHAN: Diskussionspapier zum Text "Zur wirtschaftlichen und sozialen Lage in Deutschland" einer evangelisch-katholischen Arbeitsgruppe, Leipzig 1995.
- Nr. 19: SCHIMMEL, KATRIN; ZELEWSKI, STEPHAN: Untersuchung alternativer Auktionsformen hinsichtlich ihrer Eignung zur Koordination verteilter Agenten auf Elektronischen Märkten, Leipzig 1996.
- Nr. 20: SIEDENTOPF, JUKKA: Feinterminierung unter restriktiven Laufzeitanforderungen - Ein exemplarischer Vergleich lokaler Suchverfahren (Teil I), Leipzig 1996.
- Nr. 21: ZELEWSKI, STEPHAN: Strukturalistische Rekonstruktion von ökologisch induzierten Entwicklungen der produktionswirtschaftlichen Theoriebildung, Leipzig 1996.
- Nr. 22: RÖBLER, HENRIK; SCHIMMEL, KATRIN: Zur Animation und Simulation hierarchischer Petrinetze., Leipzig 1996.
- Nr. 23: RÖBLER, HENRIK; WURCH, MAIK: Implementierung des Modells eines Flexiblen Fertigungssystems, Teilbände 1-3, Leipzig 1996.
- Nr. 24: SCHIMMEL, KATRIN: Abstimmung der Implementierungssoftware INCOME/STAR. Bericht zu Phase 1 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1996/ 2. Auflage 1997.
- Nr. 25: WURCH, MAIK: Modellierung eines Flexiblen Fertigungssystems sowie von Produktionsaufträgen. Bericht zu den Phasen 2 und 3 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1996.
- Nr. 26: SCHIMMEL, KATRIN: Der Einsatz elektronischer Märkte zur Koordination in Flexiblen Fertigungssystemen, Leipzig 1996.
- Nr. 27: TÖPFER, ANDREAS: Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Windkraftanlagen im Raum Halle/Leipzig - Ergebniszusammenfassung, Leipzig 1996.
- Nr. 28: WURCH, MAIK: Implementierung von Vickrey-Auktionen mit Hilfe von Petrinetzen, Leipzig 1996.
- Nr. 29: WURCH, MAIK: Coordinating Electronic Markets by Auctions, Leipzig 1996.
- Nr. 30: SCHIMMEL, KATRIN; WURCH, MAIK: Simulation eines Koordinations-Moduls in einem Flexiblen Fertigungssystem, Leipzig 1996.
- Nr. 31: RÖBLER, HENRIK: XPNC - Auswahltool für parallele Schaltentscheidungen bei der Simulation von Petrinetzen, Leipzig 1997.
- Nr. 32: ZELEWSKI, STEPHAN: Handelsinformationssysteme - erweiterte Fassung einer Rezension, Leipzig 1997.

Verzeichnis der Arbeitsberichte

- Nr. 33: ZELEWSKI, STEPHAN: Erfahrungen mit Höheren Petrinetzen bei der Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen. Bericht zu Phase 7 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1997. [in Arbeit]
- Nr. 34: ZELEWSKI, STEPHAN: Optimierung in Petrinetz-Modellen - eine Analyse aus betriebswirtschaftlicher Sicht, Leipzig 1997. [in Arbeit]
- Nr. 35: WURCH, MAIK: Simulation von Koordinations-Modulen unter Berücksichtigung strategischen Agentenverhaltens, Leipzig 1997. [in Arbeit]
- Nr. 36: SCHIMMEL, KATRIN: Komponente für Erreichbarkeitsanalysen. Bericht zu Phase 6 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1997.
- Nr. 37: WURCH, MAIK: Modellierung der Prozeßkoordinierung. Bericht zu Phase 4 des Projekts PEMVEK, Leipzig 1997. [in Arbeit]
- Nr. 38: BODE, JÜRGEN; FUNG, RICHARD Y.K.: Integrating Cost Considerations in Quality Function Deployment, Leipzig 1997.