

UNIVERSITÄT LEIPZIG

**Institut für Produktionswirtschaft
und Industrielle Informationswirtschaft**

Marschnerstraße 31, 04109 Leipzig

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

Arbeitsbericht Nr. 13

**Petrinetzbasierte Modellierung
komplexer Produktionssysteme**

**Band 8: Charakterisierung
des Petrinetz-Konzepts**

von

Univ.-Prof. Dr. Stephan Zelewski

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

Leipzig 1995

Alle Rechte vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis zu Band 8

	Seite
8	Zusammenfassende Charakterisierung des Petrinetz-Konzepts 1
8.1	Überblick 1
8.2	Petrinetze als Ausprägungen verwandter Konzepte 14
8.2.1	Petrinetze in systemtheoretischer Sicht 14
8.2.2	Petrinetze in modelltheoretischer Sicht 19
8.2.3	Petrinetze in graphentheoretischer Sicht 23
8.3	Abgrenzung des Petrinetz-Konzepts von verwandten Konzepten . . 25
8.3.1	Gegenüberstellung von Petrinetz-Konzept und Netzplantechnik 25
8.3.1.1	Einführung 25
8.3.1.2	Definitorische Unterschiede zwischen Petrinetzen und Netzplänen 27
8.3.1.3	Pragmatische Unterschiede zwischen Petrinetzen und Netzplänen 32
8.3.1.3.1	Aspekte der Modellierungsfähigkeit 32
8.3.1.3.2	Aspekte der Modellierungsgüte 43
8.3.1.4	Resümee 62
8.3.2	Vergleich zwischen Petrinetzen und OR-Programmen 63
	Literaturverzeichnis zu Band 8 72

8 Zusammenfassende Charakterisierung des Petrinetz-Konzepts

8.1 Überblick

In den voranstehenden Ausführungen wurde dargelegt, wie sich das Petrinetz-Konzept für die Modellierung von Koordinierungsproblemen in komplexen Produktionssystemen nutzen läßt. Die dabei gesammelten Einsichten in charakteristische Eigenschaften des Petrinetz-Konzepts werden anschließend in einem Überblick verdichtet. Dabei wird das Petrinetz-Konzept einerseits in verwandte, bereits etablierte Konzepte eingebettet¹⁾. Andererseits erfährt es eine Abgrenzung von alternativen Konzepten²⁾, die bei produktionswirtschaftlichen Modellierungen von Prozeßkoordinierungen eine breite Akzeptanz genießen.

Die Positivcharakterisierung des Petrinetz-Konzepts beschränkt sich darauf, Netze aus system-, modell- und graphentheoretischer Sicht zu beleuchten. Für diese Auswahl spricht zunächst, daß sich der systemtheoretische Ansatz schon vielfach als Rahmenkonzept für die Einordnung betriebswirtschaftlicher Modellierungsprobleme bewährt hat³⁾. Die modelltheoretische Perspektive wird seitens der behandelten Thematik nahegelegt, sich mit der *Modellierung* von Koordinierungsproblemen zu befassen. Der graphentheoretische Schwerpunkt resultiert dagegen aus der Eigenart des Petrinetz-Konzepts, graphische Repräsentationen von Netzen zuzulassen. Zwar besteht eine Vielfalt weiterer Möglichkeiten, Petrinetze in verwandte Konzepte einzubetten⁴⁾. Beispielsweise läßt sich daran denken, Petrinetze als spezielle topologische Konstrukte zu charakterisieren⁵⁾. Doch wird auf solche weiterführenden Einordnungen verzichtet, weil sie keinen engen Zusammenhang mit der hier interessierenden produktionswirtschaftlichen Thematik erkennen lassen.

Für die Negativcharakterisierung des Petrinetz-Konzepts wird wiederum nur ein kleiner Ausschnitt aus dem Spektrum denkmöglicher alternativer Modellierungskonzepte⁶⁾ herausgegriffen⁷⁾. Es werden lediglich die Netzplantechnik und der Programmansatz des Operations Research betrachtet.

Eine Abgrenzung von der Netzplantechnik drängt sich unmittelbar auf. Denn es besteht - zumindest prima facie - eine große Ähnlichkeit zwischen Petrinetzen und Netzplänen. Sie resultiert einerseits aus der Möglichkeit, beide Arten von "Netzen" durch gerichtete Graphen zu repräsentieren. Andererseits stimmen Petrinetze und Netzpläne darin überein, die Modellierung nebenläufiger Prozeßausführungen zu gestatten⁸⁾. Zwar dominieren Netzpläne im Bereich der Projektplanung, während sie für Ablaufplanungen bei der Produktion von Stückgütern seltener gewürdigt werden. Doch existiert immerhin eine Reihe von Arbeiten, die sich mit dem Einsatz von Netzplänen für die Prozeßkoordinierung in Produktionssystemen befassen⁹⁾. Daher wird die Netzplantechnik auch hier zu den "breit akzeptierten" Modellierungskonzepten für prozeßbezogene Koordinierungsprobleme gerechnet.

Schließlich erfolgt auch eine Abgrenzung von OR-Programmen. Sie werden hier aus zwei Gründen zur abgrenzenden Charakterisierung des Petrinetz-Konzepts herangezogen. Einerseits gelangen OR-Programme bei der Modellierung von Prozeßkoordinierungen häufig zum Einsatz. Andererseits erlauben sie, einige Besonderheiten von Petrinetzen zu pointieren.

Über die vorgenannten Charakterisierungen hinaus läßt sich eine Fülle weiterer Ansätze vorstellen, um das Petrinetz-Konzept ein- und abzugrenzen. Als pars pro toto wird in den nachfolgenden Abb. 198 bis 205 lediglich eine Möglichkeit skizziert¹⁰⁾. Sie beruht auf der Vorstellung, daß alle Modellierungskonzepte auf einer konzeptspezifischen Repräsentation und Verarbeitung von modellierungsrelevantem Wissen beruhen. Abb. 198 zeigt ein allgemeines Strukturierungsschema für den Bereich der Wissensverarbeitung. Es erfaßt die wesentlichen Determinanten der Wissensrepräsentation und -anwendung¹¹⁾. Die anschließenden Abbildungen präsentieren alternative Spezialisierungen dieses Schemas für unterschiedliche Modellierungskonzepte¹²⁾.

Zuerst wird die Strukturierungsweise der Wissensverarbeitung aufgeführt, die für das Petrinetz-Konzept charakteristisch ist (Abb. 199)¹³. Es schließen sich schematische Übersichten an, die sich der Wissensverarbeitung bei sechs Modellierungskonzepten widmen, die im Rahmen dieser Ausarbeitung eine größere Rolle spielen: prädikatenlogische Formelsysteme (Abb. 200), Produktionsregelsysteme (Abb. 201)¹⁴, Netzplantechnik (Abb. 202), OR-Programme (Abb. 203)¹⁵, relationale Systeme (Abb. 204) und objektorientierte Systeme (Abb. 205)¹⁶. Dabei stimmen OR-Programme und relationale Systeme mit derjenigen Art der Wissensrepräsentation und -anwendung überein, die für die konventionelle Informationsverarbeitung typisch ist. Prädikatenlogische, produktionsregelbezogene und objektorientierte Systeme stellen dagegen herausragende Beispiele für nicht-konventionelle Varianten der Informationsverarbeitung dar. Die Netzplantechnik läßt sich dagegen überhaupt nicht in das Denkmuster der Informationsverarbeitung einordnen. Sie wird hier als spezifisch betriebswirtschaftlicher Modellierungsbeitrag berücksichtigt.

Aus dem Vergleich der allgemeinen und speziellen Strukturierungsschemata lassen sich vier wesentliche Erkenntnisse ziehen. Erstens werden die verschiedenen Aspekte der Wissensverarbeitung vom Petrinetz-Konzept und von objektorientierten Systemen am umfassendsten abgedeckt. Zweitens wird deutlich, daß das Petrinetz-Konzept die Möglichkeiten der Wissensrepräsentation von prädikatenlogischen Formelsystemen und von Produktionsregelsystemen in sich vereint. Ihr gemeinsames Repräsentationsvermögen wird sogar in dynamischer Hinsicht ausgebaut. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Repräsentation von prozeduralem Wissen¹⁷. Drittens bilden Netzplantechnik und objektorientierte Systeme die einzigen Modellierungskonzepte, deren Wissensstrukturierungen mit dem allgemeinen Strukturierungsschema der Wissensverarbeitung zumindest auf den obersten Strukturierungsebenen vollkommen harmonisieren. Das Petrinetz-Konzept¹⁸ vermengt dagegen Wissen über Komponenten und Wissen über Komponenten-zusammenhänge in der Gestalt von Stellen, denen mehrstellige Prädikatssymbole zugeordnet sind: Einerseits besitzen Stellen und Marken(kopien) die Qualität von atomaren Komponenten des repräsentierten Modellierungswissens. Andererseits drückt die aktuelle Markierung solcher Stellen auch Wissen darüber aus, welcher relationale Zusammenhang zwischen den involvierten Marken(kopien) besteht. Viertens besitzt das Petrinetz-Konzept im Vergleich mit dem Konzept der objektorientierten Systeme einen Differenzierungsvorteil. Denn nur das Petrinetz-Konzept erlaubt, zwischen aktiven und passiven Komponenten und - darüber hinaus - auch zwischen ortsfesten und beweglichen Komponenten zu unterscheiden. Der objektorientierte Ansatz kennt dagegen nur die eine Komponentenart "Objekt". Daneben läßt der objektorientierte Ansatz nur flache Komponentenstrukturen zu. Das Petrinetz-Konzept gestattet dagegen für Marken sowohl flache als auch tiefe Strukturierungen. Die dritte und vierte Erkenntnis zusammengenommen legen es nahe, das Petrinetz-Konzept und den objektorientierten Ansatz miteinander zu kombinieren. Einige Möglichkeiten einer solchen Integration wurden in dieser Arbeit bereits skizziert¹⁹.

Wissensverarbeitung

Wissensrepräsentation: Objektwissen		Wissensanwendung: Metawissen	
Komponenten		Zusammenhang zwischen den Komponenten	
statisch		statisch	
Identität	Attribute	tupelförmig	subjugatförmig
Komponenten= namen	Komponenten= eigen= schaften	z.B. Über-/Unter= ordnungs= beziehungen, Integritäts= bedingungen	z.B. bedingte Aktionen, Ursache/ Wirkung= Zusammen= hänge
Komponenten= zusam= mensel= zung	Komponenten= eigen= schaften	Beziehungs= zusammen= hang	Operations= zusammen= hang
Komponenten= veränd= rungen	Erzeugen/ Vernichten von Komponenten	relational	operational
Strukturveränd= rungen	Variation des Komponenten= aufbaus	deklarativ	prozedural
Identitätsveränd= rungen	Komponenten= veränd= rungen von Attribut= ausprä= gungen	subjugatförmig	prozeßförmig
Komponenten= namen	Komponenten= verhalten	Folgerungs= zusammen= hang	Prozeß= zusammen= hang
		z.B. logische - somit immer gültige -Abhängig= keiten	z.B. Zustands-/ Ereignis= folgen, Objekt= flüsse
		z.B. Kontrollwissen, Heuristiken, Inferenzregeln	
		Wissen darüber, wie das Objektwissen zweckbezogen - z.B. zur Bewältigung von Problemen - ausgewertet werden kann	

Abb. 198: Allgemeines Schema der Wissensverarbeitung

Petrinetz-Konzept

Wissensrepräsentation: Objektwissen									
Komponenten					Zusammenhang zwischen den Komponenten				
statisch		dynamisch			statisch		dynamisch		
Identität	Struktur	Attribute	Identitätsveränderungen	Strukturveränderungen	Veränderungen von	tupelförmig	subjugatförmig	subjugatförmig	prozeßförmig
Stellen=namen	nur bei Makro=stellen	z.B. Marken=kapazität			von Attribut=ausprägungen	relational	deklarativ	operational	prozedural
Transitions=namen	nur bei Makro=transitionen	z.B. Schalt=kosten			dynamische Schalt=prioritäten	Stellen mit mehr=stelligen Prädikats=symbolen	Transitionen mit inzidenten Stellen in deklarativen Netzmodellen	Transitionen mit inzidenten Stellen in operationalen Netzmodellen	Marken=flüsse (Markierungs-/Schaltfolgen als Netzprozesse)
Identifizierende Marken=attribute	Marken=struktur: flach und tief	nicht identifizierende Marken=attribute, Stellen mit einstelligen Prädikats=symbolen	Erzeugen/Vermichten von Marken=kopien		schaltbedingte Ausprägungsveränderung von Marken=attributen				
Stellen (passiv) , Transitionen (aktiv) Marken					Knoten-/Kantenzusammenhang Schaltakte von Transitionen Markierungsveränderungen				
Wissensanwendung: Metawissen									
obligatorisch: Schaltregel									
fakultativ: o Schaltstrategien o Suchstrategien in Erreichbarkeitsgraphen									
Erreichbarkeit									

Abb. 199: Spezielles Schema der Wissensverarbeitung beim Petrinetz-Konzept

Prädikatenlogische Formelsysteme

Wissensrepräsentation: Objektwissen				Wissensanwendung: Metawissen	
Komponenten		Zusammenhang zwischen den Komponenten			
statisch		dynamisch		statisch	
Identität	Struktur	Attribute	tupelförmig	subjugatformig	deklarativ
nur bei tiefen Prädikats=argumen=ten durch identifi=zierende Attribute	nur bei tiefen Prädikats=argumen=ten durch funktionale Termzu=sammen=setzung	einstellige Prädikate beitielen Prädikats=argumen=ten durch nicht identifi=zierende Attribute	mehrestellige Prädikate	subjunktive Prädikate=verknüpfung z.B. Horn=klauseln	Inferenzregeln z. B. ◦ Modus Ponens ◦ kombinierte Resolution und Unifizierung
Daten			"Logik"		

Abb. 200: Spezielles Schema der Wissensverarbeitung beim Konzept der prädikatenlogischen Formelsysteme

Produktionsregelsysteme

Wissensrepräsentation: Objektwissen				Wissensanwendung: Metawissen	
Komponenten		Zusammenhang zwischen den Komponenten			
statisch		dynamisch		dynamisch	
Identität	Struktur	Attribute	Veränderungen	tupelförmig	subjugatförmig
Identitätsveränderungen	Strukturveränderungen	Veränderungen von Attributausprägungen	Veränderung der Extensionen stelliger Prädikate	relational	operational
einstellige Prädikate	mehrstellige Prädikate	Produktionsregeln	Produktionsregeln	subjugatförmig	prozedural
Daten: "Fakten"		"Logik": Regeln			
z. B. Rete-Algorithmus					
"Kontrolle"					

Abb. 201: Spezielles Schema der Wissensverarbeitung beim Konzept der Produktionsregelsysteme

Netzplantechnik

Wissensrepräsentation: Objektwissen				Wissensanwendung: Metawissen	
Komponenten		Zusammenhang zwischen den Komponenten			
statisch		dynamisch		statisch	
Identität	Struktur	Attribute	tupelförmig	subjugatförmig	deklarativ
Vorgangs= namen	Vorgangs= dauer, Kapazitäts= Inanspruch= nahme, Vorgangs= kosten	Vorgangs= dauer, Kapazitäts= Inanspruch= nahme, Vorgangs= kosten	Anordnungs= beziehungen, Frist= beziehungen, Pufferzeit= beziehungen	Anordnungs= beziehungen, Frist= beziehungen, Pufferzeit= beziehungen	Anordnungs= beziehungen, Frist= beziehungen, Pufferzeit= beziehungen
Vorgänge			Vorgangszusammenhang		
Netzplanauswertung					

Abb. 202: Spezielles Schema der Wissensverarbeitung beim Konzept der Netzplantechnik

OR-Programme

Wissensrepräsentation: Objektwissen				Wissensanwendung: Metawissen	
Komponenten		Zusammenhang zwischen den Komponenten			
statisch		dynamisch		statisch	
Identität	Struktur	Attribute	tupelförmig	subjugatförmig	dynamisch
Konstan= ter- und Variablen= bezeich= nungen (Indizes)	 	Werte der Konstanten, Definitons= bereiche der Variablen	relational	deklarativ	
			Restriktionen Zielfunktion	nur mittels komplizierter Hilfskon= struktionen („logische Variablen“)	
Daten					
Algorithmen					

Abb. 203: Spezielles Schema der Wissensverarbeitung beim Konzept der OR-Programme

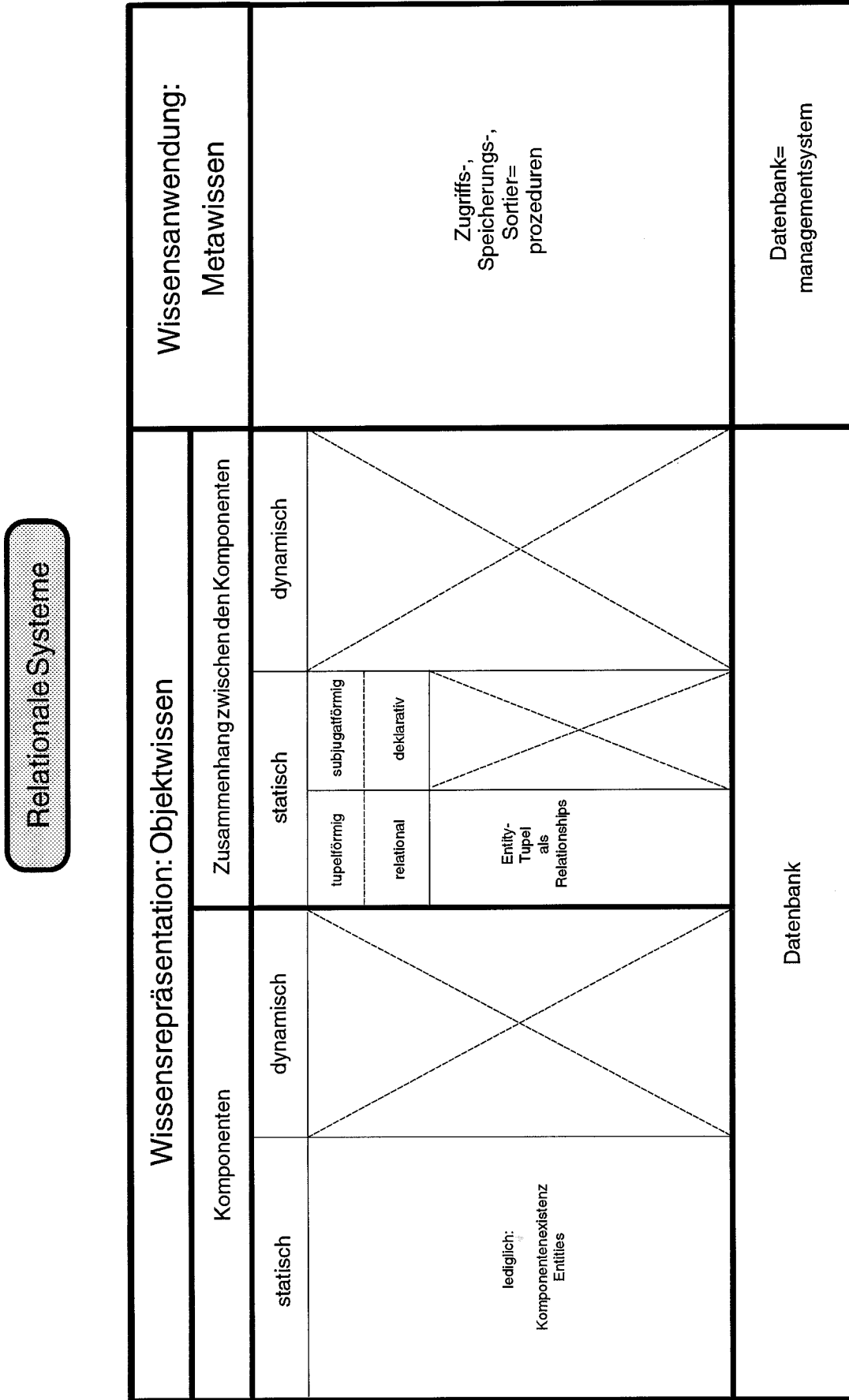


Abb. 204: Spezielles Schema der Wissensverarbeitung beim Konzept der relationalen Systeme

Objektorientierte Systeme

Wissensrepräsentation: Objektwissen		Wissensanwendung: Metawissen	
Komponenten		Zusammenhang zwischen den Komponenten	
statisch		statisch	
Identität	Attribute	tupelförmig	subjugatformig
Objekt=namen	flacher Slot=zusammenhang	relational	operational
Objekt= zieren von Objekten/ Löschen von Objekt= Instanzen	Objekt= slots	deklarativ	Kausal= zusammenhänge
Identitäts= veränderungen	Struktur= veränderungen	Übers-/Unterordnungen von Objekten Vererbungsmechanismen	Austausch von Nachrichten zwischen Objekten: Nachrichten=flüsse
Veränderungen von Attribut=ausprägungen	Veränderungen der Slot= werte durch Methoden, Trigger	Regelung des Absendens, Fortleitens, Empfangens von Nachrichten	
Objekte		Objektzusammenhang	
		"message passing"	

Abb. 205: Spezielles Schema der Wissensverarbeitung beim Konzept der objektorientierten Systeme

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Dies entspricht dem kohärentistischen Ansatz dieser Arbeit.

2) In dieser Hinsicht folgt der Verf. dem pleonastischen Diktum von RESCHER (1985a), S. 38: "'All determination is negation' (omnis affirmatio est negatio)." (kursive Hervorhebung des Originals hier unterlassen).

3) Vgl. dazu die umfangreiche systemtheoretische Konzeptualisierung der hier betrachteten Koordinierungsprobleme in der Rahmenlegung dieser Arbeit. Vgl. insbesondere auch die Quellen, die dort zum systemtheoretischen Strukturierungsparadigma angeführt wurden.

4) Einen Überblick über diese Einordnungsmöglichkeiten bietet ZELEWSKI (1987a), S. 26ff. Dort erfolgen auch Charakterisierungen des Petrinetz-Konzepts aus mengentheoretischer, topologischer, automatentheoretischer, kalkültheoretischer, produktorischer und semiotischer Sicht.

5) Auf topologische Behandlungen des Petrinetz-Konzepts wurde schon anlässlich der Einführung Allgemeiner Netze hingewiesen.

6) Vgl. zu Übersichten über Modellierungskonzepte, die auf Prozeßkoordinierungen bei Flexiblen Fertigungssystemen überwiegend angewendet werden, VAN LOOVEREN (1986), S. 14; HINTZ (1987), S. 60ff.

Beispielsweise wird nicht näher darauf eingegangen, Probleme bei der Koordinierung von Produktionsprozessen mit der Hilfe von Warteschlangensystemen zu modellieren. Diese Möglichkeit wurde schon kurz erörtert. Dabei wurde auch dargelegt, warum Warteschlangenmodelle in dieser Arbeit keine nähere Berücksichtigung erfahren. Ein weiterer Modellierungsansatz - die Anwendung von Simulationsmodellen - stellt dagegen keine Alternative zum Petrinetz-Konzept dar. Es wurde bereits erläutert, wie sich Netzmodelle in simulativer Weise auswerten lassen. In diesem Zusammenhang wurde auch herausgestellt, in welcher Weise sich Petrinetze gegenüber konventionellen Simulationssprachen auszeichnen.

7) Strenggenommen müßte das Petrinetz-Konzept mit allen Konzepten verglichen werden, die ebenso für die Modellierung von Prozeßkoordinierungen in komplexen Produktionssystemen in Betracht kommen. Dies erweist sich jedoch in zweifacher Hinsicht als problematisch.

Erstens wäre es erforderlich, die Eignung der Alternativkonzepte für die vorgenannte Modellierungsaufgabe zu beurteilen, bevor sie - gegebenenfalls - in die Negativcharakterisierung einbezogen werden. Die Urteilsfindung überstiege aber den Erkenntnisrahmen der vorliegenden Arbeit, der von vornherein auf das Petrinetz-Konzept beschränkt wurde. Daher wird hier ohne weitere Rechtfertigung vorausgesetzt, daß die betrachteten Alternativkonzepte für die hier interessierenden Modellierungsaufgaben grundsätzlich akzeptiert werden. Dies entspricht der einleitenden Festlegung, das Petrinetz-Konzept nicht durch einen Vergleich mit alternativen Modellierungskonzepten zu beurteilen. Die dort erfolgte Ausgrenzung alternativer Modellierungskonzepte erstreckte sich allerdings nur auf den Aspekt der *Beurteilung* des Petrinetz-Konzepts. Die anschließenden Ausführungen widmen sich dagegen nur einer *Beschreibung* von charakteristischen Eigenschaften des Petrinetz-Konzepts mittels einer Negativcharakterisierung. Daher gilt die vorgenannte Ausgrenzung von Alternativkonzepten nicht für die nachfolgenden Erläuterungen.

Zweitens ist die Anzahl geeigneter Alternativkonzepte recht groß (vgl. die voranstehende Anmerkung). Daher würde ihre vollständige Berücksichtigung abermals den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen. Daher begnügt sich der Verf. mit den nachstehend angeführten Alternativkonzepten. Eine Begründung dieser Auswahl setzte wiederum voraus, alle übrigen Alternativen zunächst ebenso zu betrachten und alsdann anhand entsprechender Beurteilungskriterien auszuschließen. Dies widerspräche jedoch der bereits erwähnten Rahmenlegung. Es bedeutete auch eine Beurteilung der relativen Vorteilhaftigkeit verschiedener Modellierungskonzepte, die hier nicht beabsichtigt ist. Darauf wird an späterer Stelle aus dem Blickwinkel konzeptexogener relativer Vorteilhaftigkeitsanalysen zurückgekommen. Deshalb wird abermals unterstellt, daß die erfolgte Auswahl Zustimmung findet. Plausibilitätsargumente, die diese Selektion unterstützen, werden nachfolgend im Zusammenhang mit den jeweils angeführten Alternativkonzepten angesprochen. Zwar äußern Hundt (1981), S. 67, und Kirsch (1984), S. 561ff., deutliche Vorbehalte gegenüber einer derart "eklektizistischen" Vorgehensweise. Doch wirkt sich der Eklektizismus hier nur hinsichtlich seines Selektionsaspekts aus. Darüber hinaus wird dieser Gesichtspunkt plausibel belegt. Der Aspekt der Unverknüpftheit, auf den sich KIRSCH bezieht, spielt dagegen in dieser Arbeit keine Rolle. Denn für eine Integration von alternativen Modellierungskonzepten besteht kein Anlaß, weil hier die *Gegenüberstellung* von Konzeptalternativen interessiert.

8) Diese Übereinstimmung wird besonders deutlich bei FREEDMAN (1988b), S. 333.

9) Vgl. zu Anwendungen der Netzplantechnik auf Prozeßkoordinierungen bei Werkstattfertigung, die auch als Maschinenbelegungs-, Terminplanungs- oder Ablaufplanungsprobleme bei Einzel- und Kleinserienfertigung behandelt werden, PÜTZ, W. (1973), S. 50 u. 54ff.; HAUKE (1973), S. 51ff.; STOMMEL, H. (1976), S. 155ff.; JUNGHANS (1978), S. 331ff.; SEELBACH (1979), Sp. 21f.; MICHAEL, R. (1980), S. 387 u. 391ff. (recht grob mit Schwergewicht auf Ablaufaspekten des Konstruktionsbereichs); VOLLMANN (1984), S. 405ff., insbesondere S. 435ff.; MÜLLER, A.

(1987), S. 235ff. u. 240ff.; HEIZER (1988), S. 675ff.; GROß,M. (1991c), S. 97ff.; DREXL (1990b), S. 60ff. i.V.m. S. 54ff.; DOMSCHKE (1991), S. 74 (nur ein knapper Hinweis).

Allerdings liegt das Schwergewicht der vorgenannten Quellen auf der *Terminvorgroßplanung* von Produktionsprozessen. Denn sie konzentrieren sich auf die Ablaufplanung für die Abwicklung von jeweils einem Auftrag. Darüber hinaus wird zumeist nur höchstens ein Potentialfaktor mit knapper Kapazität berücksichtigt. Daher wird der Komplexität von *Terminfeinplanungen*, die hier als kurzfristige Produktionsplanung und -steuerung vorausgesetzt wurden, nur ansatzweise entsprochen. Die Erfassung ihrer Koordinierungskomplexität würde zumindest erfordern, die Konkurrenz mehrerer Aufträge um mehrere knappe Personal- und Betriebsmittelkapazitäten zu berücksichtigen. Lediglich der Beitrag von HEIZER geht auf diese Kapazitätskonkurrenz detailliert ein. Darauf wird in einer späteren Anmerkung zurückgekommen. Darüber hinaus sehen auch GROß und MÜLLER explizit vor, Netzpläne im Werkstattbereich für sowohl Grob- als auch für Feinplanungen einzusetzen; vgl. GROß,M. (1991c), S. 100. Allerdings schenken sie der Ressourcenkonkurrenz mehrerer Aufträge keine größere Aufmerksamkeit.

10) Infolge des skizzenartigen Charakters wird darauf verzichtet, die Schemata im einzelnen zu erläutern. Ihr Inhalt kondensiert zum größten Teil die Ausführungen dieser Ausarbeitung. Darüber hinaus werden Grundkenntnisse über die angesprochenen Modellierungskonzepte vorausgesetzt, auf die hier nicht näher eingegangen wurde. Dies betrifft insbesondere die produktionsregelbezogenen und die objektorientierten Systeme. Diese präsupponierten Grundkenntnisse können aber den Quellen entnommen werden, die im Zusammenhang mit den Modellierungskonzepten angeführt wurden.

11) Die zweifache Gegenüberstellung von statischen und dynamischen Aspekten kann insofern kritisiert werden, als unter der Rubrik "dynamisch" oftmals nur kinetische Sachverhalte thematisiert werden. Um die Abb. 198 nicht zu überfrachten, wird jedoch nicht zwischen dynamischer und kinetischer Betrachtungsweise differenziert. Statt dessen wird ein sehr weit gefaßter Dynamikbegriff zugrundegelegt. Er umfaßt sowohl dynamische Aspekte im engeren Sinne als auch kinetische Sachverhalte.

Die Aufteilung des Komponentenzusammenhangs in vier Zusammenhangstypen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr umfaßt er nur diejenigen Zusammenhangsarten, die nach Erfahrung des Verf. ausreichen, um die oben angeführten Modellierungskonzepte im wesentlichen zu charakterisieren. Alle nicht aufgeführten Zusammenhangsaspekte erachtet der Verf. als unwesentlich (Demarkationsargument). Beispielsweise bleibt unberücksichtigt, daß in Selbstmodifizierenden Netzen der Zusammenhang zwischen Netzkomponenten verändert werden kann. Denn dort ist es nicht nur möglich, das Ausmaß von Knotenverknüpfungen durch Variationen von Kantengewichten zu modifizieren. Vielmehr kann sogar die Existenz von Knotenverknüpfungen zerstört werden, indem Kantengewichte auf Null gesetzt werden (*vice versa*). Solche Veränderungen des Komponentenzusammenhangs spielen aber für die hier interessierenden Modellierungen der kurzfristigen Prozeßkoordinierung in Produktionssystemen keine Rolle. Daher werden sie nicht weiter beachtet. Statt dessen wird bei der Wissensstrukturierung unterstellt, daß sich nur die Komponenten selbst verändern können. Der Zusammenhang zwischen den Komponenten bleibt dagegen konstant.

12) Die Strukturierungsschemata der speziellen Modellierungskonzepte werden jeweils durch eine besonders abgesetzte "Schlußzeile" ergänzt. In ihr werden schlagwortartig jene Konzeptaspekte hervorgehoben, die nach Einschätzung des Verf. die konzeptspezifische Wissensstrukturierung am treffendsten kennzeichnen.

13) Dabei wird unterstellt, daß die Ausdruckskraft der Synthetischen Netzen zur Verfügung steht.

14) Es wird vorausgesetzt, daß die Produktionsregelsysteme über die prädikatenlogische Formulierungsmöglichkeiten verfügen, aber auf flache Prädikatsargumente beschränkt bleiben. Dies entspricht der vorherrschenden Ausgestaltung von "anspruchsvolleren" Produktionsregelsystemen. Einfachere Varianten, die mit dem Ausdrucksvermögen der Aussagenlogik auskommen, werden hier nicht beachtet.

15) Bei OR-Programmen mag es irritieren, daß die Zielfunktionen als relationale Komponentenzusammenhänge klassifiziert werden. Dies ist jedoch zulässig. Denn jede K-stellige Funktion kann als eine K+1-stellige Relation aufgefaßt werden. Zu dieser Relation gehören alle K+1-Tupel aus jeweils einem K-stelligen Funktionsargument und einem 1-stelligen Funktionswert, welche die Abbildungsvorschrift der Funktion erfüllen. Vgl. dazu auch die zweistufige, über den Abbildungsbegriff vermittelte Rückführung des Funktionsbegriffs auf den Relationsbegriff bei STACHOWIAK (1973), S. 245 (mit Fn. 191 u. 192).

16) Die weitreichende Repräsentation von Wissen über Komponentenzusammenhänge in objektorientierten Systemen mag auf den ersten Blick überraschen. Denn in den meisten Beiträgen zum objektorientierten Ansatz werden nur die hierarchischen Objektüber- und -unterordnungen thematisiert, die den typischen Objektklassen und "Vererbungsmechanismen" zugrundeliegen. Tatsächlich können objektorientierte Systeme aber auch aufwendigere Mechanismen umfassen. Sie gestatten z.B. auch, deklarativ-definitorische Zusammenhänge (doppelte Subjugate) und operationale Ursache-/Wirkungszusammenhänge zu repräsentieren. Vgl. dazu beispielsweise WIEDERHOLD (1986b), S. 424ff. (definitorische Abhängigkeiten) und S. 438ff. (kausale Abhängigkeiten zwischen Objekten, die dort als "frames" und "nodes" thematisiert werden).

17) Daneben trifft es auch auf die Repräsentation von Wissen über Identitätsveränderungen zu.

18) Die nachfolgende Feststellung trifft auch auf andere Modellierungskonzepte zu. Besonders deutlich wird dies bei den Produktionsregelsystemen. Dort kann in den "Fakten" einerseits Wissen über die Eigenschaften einzelner Wissenskomponenten ausgedrückt werden. Dabei handelt es sich um einstellige Prädikate und Terme. Die Prädikate repräsentieren Eigenschaften von Komponenten, die durch Terme als Prädikatsargumente repräsentiert werden. Andererseits können die "Fakten" ebenso Wissen über den relationalen Zusammenhang zwischen mehreren Komponenten wiedergeben. Dies geschieht in der Gestalt von mehrstelligen Prädikaten. Die Terme aus den Prädikatsstellen repräsentieren dann die verknüpften Wissenskomponenten.

19) Vgl. dazu die Ausführungen zur objektorientierten Überlagerung des systemtheoretischen Strukturierungsrahmens. Vgl. ebenso den Hinweis auf das Selbсталtern von Marken(kopien).

8.2 Petrinetze als Ausprägungen verwandter Konzepte

8.2.1 Petrinetze in systemtheoretischer Sicht

Aus dem Blickwinkel der Systemtheorie lassen sich Petrinetze als eine spezielle Kategorie von Systemen auffassen¹⁾. Dabei werden die netzartigen Systeme durch folgende Merkmale ausgezeichnet²⁾:

- ❑ Es handelt sich um formale³⁾ Systeme.
- ❑ Die Struktur der Systeme ist diskret und endlich. Sie läßt sich durch endliche Mengen diskreter Objekte beschreiben: die Stellen, Transitionen und Marken⁴⁾.
- ❑ Das Systemverhalten manifestiert sich durch den Fluß beliebig - gegebenenfalls auch unendlich⁵⁾ - vieler Objekte⁶⁾: die Kopien von Marken⁷⁾.
- ❑ Die Systeme besitzen eine innere Dynamik. Sie wird durch Zustände und zustandstransformierende Ereignismengen⁸⁾ konstituiert.
- ❑ Es handelt sich um selbst-modifizierende Systeme. Denn jeder Systemzustand vermag sich aufgrund einer netzspezifischen Schaltregel aus sich selbst heraus zu verändern.
- ❑ Die zustandstransformierenden Ereignismengen bestehen entweder aus genau einem oder aber aus mehreren Ereignissen. Im ersten Fall geschieht das eine Ereignis als der Schalttakt einer Transition. Im zweiten Fall tritt eine Ereignismenge ein, indem mehrere Transitionen nebenläufig geschaltet werden.
- ❑ Jede alternierende Folge aus Systemzuständen und Geschehnissen von zustandstransformierenden Ereignismengen bildet einen Prozeß.
- ❑ Ereignisgeschehnisse brauchen in einem Prozeß keiner sequentiellen Vollordnung zu unterliegen. Statt dessen bilden sie nur eine Halbordnung, die das nebenläufige - kausal unabhängige, "parallele" oder "gleichzeitige" - Eintreten von Ereignissen zuläßt⁹⁾. Das Systemverhalten kann daher auch nonsequentielle Prozesse umfassen.
- ❑ Die Anordnung von Ereignisgeschehnissen in Prozessen und die Koordinierung von Prozessen erfolgen zunächst ausschließlich aufgrund von Kausalbeziehungen¹⁰⁾. Es existieren keine originären zeitlichen Anordnungsbeziehungen zwischen Ereignisgeschehnissen (atemporale Schaltregel)¹¹⁾. Nachträglich können jedoch zeitbezogene Präzedenzbeziehungen eingeführt werden¹²⁾.
- ❑ Die Koordinierung zwischen Prozessen kann nur mit der Hilfe lokaler Kausalbeziehungen erfolgen¹³⁾.
- ❑ Die Koordinierung von Systemverhaltensweisen erfolgt auf dezentrale Weise (asynchrone Schaltregel)¹⁴⁾. Das entspricht einer dezentralen oder nebenläufigen Systemkontrolle¹⁵⁾.
- ❑ Konflikte zwischen Geschehnissen unterschiedlicher Ereignisse und den Ausführungen verschiedener Prozesse lassen sich explizit darstellen¹⁶⁾.
- ❑ Die Systeme verhalten sich indeterministisch¹⁷⁾. Dies liegt zunächst darin begründet, daß zustandstransformierende Ereignisse zwar geschehen können, aber nicht müssen (permissive Schaltregel). Hinzu kommt die Möglichkeit, daß Ereignisgeschehnisse miteinander in Konflikt stehen. Sie führt ebenso zu indeterministischem Systemverhalten, falls die Systemkontrolle keine Informationen über die Art der Konfliktauflösung enthält.

Aus systemtheoretischer Sicht bemerkenswert ist, daß Petrinetze aufgrund ihrer hohen immanenten Komplexität die vorherrschende - allerdings unzulässig verkürzte - Systemdefinition

sprengen. Auf diese Weise tragen sie dazu bei, das tatsächliche Spektrum von Erkenntnisobjekten der Systemtheorie zu verdeutlichen.

Zumeist werden Systeme als Konstrukte aus Elementen und Beziehungen zwischen diesen Elementen definiert¹⁸). Des öfteren werden auch noch Eigenschaften von Elementen als dritte Konstituente ergänzt. Elemente - im Sinne von atomaren Objekten - stellen im Petrinetz-Konzept aber nur die Stellen, Transitionen und Marken dar. Eigenschaften dieser Elemente sind z.B. Markkapazitäten der Stellen und diverse Markenattribute dar. Beziehungen zwischen diesen Elementen finden ihren Ausdruck in den Elementen der Flußrelation, die als Netzkanten repräsentiert werden, und in der Ausgangsmarkierung, die den Stellen jeweils Anzahlen von Markkopien zuordnet.

Weitere Komponenten von Petrinetzen lassen sich jedoch nicht mehr erfassen, solange die einleitend referierte - vereinfachte - Systemdefinition zugrundeliegt. So stellen z.B. Kantengewichte Eigenschaften von Netzkanten, also Eigenschaften von Beziehungen zwischen Elementen (Stellen und Transitionen) dar. Die logischen Verknüpfungen der adjazenten Kanten einer Transition bedeuten Eigenschaften einer teilsystemartigen Systemkomponente. Sie besteht ihrerseits aus einem Element (der Transition) und Beziehungen (adjazenten Kanten) dieses Elements zu anderen Elementen (den inzidenten Stellen). Noch komplexere Verhältnisse liegen bei der Schaltregel vor: Sie umfaßt Beziehungen zwischen Elementen (Stellen, Transitionen und Markkopien), Eigenschaften dieser Elemente (Markkapazitäten der Stellen, Attributausprägungen von Markkopien), Eigenschaften von Beziehungen zwischen diesen Elementen (Kantengewichte) und Eigenschaften von Teilsystemen (logische Kantenverknüpfungen).

Diese - nicht erschöpfenden - Beispiele zeichnen Petrinetze als strukturell reichhaltige Systeme aus¹⁹). Sie bedürfen einer unverkürzten Systemdefinition. Eine solche Definition kann z.B. auf der Basis des objektorientierten Ansatzes erfolgen²⁰). Aus dieser Perspektive besteht ein System aus einer nicht-leeren, endlichen Menge von Objekten und einer ebenso nicht-leeren, endlichen Familie von Relationen über diesen Objekten. Alle Systemkomponenten - sowohl einzelne Elemente als auch beliebig komplexe Teilsysteme - lassen sich als Objekte behandeln. Alle Eigenschaften von und Beziehungen zwischen Systemkomponenten werden durch ein- bzw. mehrstellige Relationen über den zugehörigen Objekten erfaßt. Die Relationen können ihrerseits als Objekte angesehen werden, denen sich wiederum als Systemkomponenten Eigenschaften und Beziehungen zuordnen lassen²¹). Auf diese Weise ist es möglich, jede erwünschte Systemkomplexität zu erzeugen. Sie deckt auch die oben angeführten Beispiele für komplexe Netzkonstrukte.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Der Ansatz, Petrinetze als Systeme einzustufen, findet sich z.B. bei LAUTENBACH (1973), S. 1; HERZOG, O. (1973), S. 3f.; PETERSON, J. (1977), S. 226; SCHESCHONK (1977), S. 3f.; EGGERT (1978), S. 39; GENRICH (1979a), S. 124; PETRI, C. (1979c), S. 81; GENRICH (1981), S. 109; DE CINDIO (1983b), S. 41; GENRICH (1983a).

2) Infolge dieser Merkmale, die Petrinetze als eine besondere Systemklasse definieren, vermag sich der Verf. nicht der mitunter vorgetragenen Ansicht anzuschließen, das Petrinetz-Konzept stelle eine *allgemeine* Systemtheorie dar. Vgl. zu diesem Universalitätsanspruch HERZOG, O. (1973), S. 3; EGGERT (1978), S. 39; DE CINDIO (1983b), S. 41; THOME, R. (1990), Abschnitt K 3.4, S. 5f. Vgl. auch die Ausführungen zu den programmatischen Postulaten der Allgemeinen Netztheorie.

Darüber hinaus läßt sich gegen die Charakterisierung des Petrinetz-Konzepts als eine allgemeine Systemtheorie einwenden, daß Petrinetze nicht in der Lage sind, das allgemeine Systemkonzept von GOGUEN zu erfüllen. Darauf weist z.B. HINDERER (1982a), S. 142, hin. GOGUEN's Systemkonzept beruht auf der mathematischen Kategorientheorie. Kategorien lassen sich als eine formale Metasprache auffassen, die es erlaubt, eine mathematische Systemtheorie in sehr abstrakter, infolgedessen auch recht allgemeiner Weise zu formulieren; vgl. BANDLER (1978), S. 243. Dabei wird ein System als ein Konstrukt aus verknüpften Elementen eingeführt. Die Art der Verknüpfung wird in diesem abstrakten Systembegriff zunächst überhaupt nicht näher festgelegt; vgl. GOGUEN (1972), S. 43; GINALI (1978), S. 262. Die Elementeverknüpfung bleibt daher offen. Sie läßt sich beispielsweise durch Input/Output-Relationen, durch zustandsüberführende Transitionsrelationen oder durch kausale Zusammenhangsrelationen konkretisieren. Das Petrinetz-Konzept beruht dagegen von vornherein auf einer kausalen Zusammenhangsrelation und ihrem Komplement, der Nebenläufigkeitsrelation kausaler Unabhängigkeit. Daher erweist sich das Petrinetz-Konzept "nur" als eine spezielle Ausformung des allgemeinen Systemkonzepts von GOGUEN. Dementsprechend wurden (Petri-)Netze an anderer Stelle - im Zusammenhang mit Netzmorphismen - so behandelt, daß sie sich als eine spezielle Variante von mathematischen Kategorien auffassen lassen.

Vgl. zur ausführlicheren Darstellung des allgemeinen, auf Kategorien basierenden Systemkonzepts GOGUEN (1972), S. 44ff. Vgl. darüber hinaus zu seiner mathematischen Basis, der Kategorientheorie, BANDLER (1978), S. 243ff.; GINALI (1978), S. 258ff., sowie die Beiträge in dem Sammelwerk PITT (1989).

3) Die Schwierigkeiten, den Begriff "formal" zu präzisieren, wurden bereits erörtert. Siehe auch die dort zugrundegelegte Begriffsfestlegung. Auf den formalen Charakter von Petrinetzen wird später näher eingegangen, wenn die Formalisierung des Petrinetz-Konzepts beurteilt wird. Dort wird auch das formale, logisch-mathematische Fundament von Petrinetzen angesprochen.

4) Vgl. MASSACHUSETTS COMPUTER ASSOCIATES (1974c), S. 151; ROSENSTENGEL (1983).

5) Die Markierungen von Petrinetzen besitzen einen grundsätzlich ganzzahligen Charakter. Daher können mit der Hilfe von Markenkopien maximal abzählbar-unendlich viele Objekte erfaßt werden. Dann sind allerdings auch unbeschränkte Markenskapazitäten erforderlich. Überabzählbare Objekt-Mannigfaltigkeiten, wie sie im Rahmen rationaler oder reeller Zahlen auftreten würden, lassen sich dagegen nicht darstellen.

6) Solche Objekte können in der Regel als Ressourcen interpretiert werden. Exemplarische Konkretisierungen stellen materielle Objekte, Energiequanten oder Informationen dar. Im Falle logischer Systeme sind die Objekte abstrakterer Natur. Dort vermitteln sie die Gültigkeit logischer Formeln.

7) Vgl. NOE (1971), S. 370; PETRI, C. (1976b), S. 1; PETRI, C. (1977a), S. 140; SIFAKIS (1977a), S. 75; PETRI, C. (1980a), S. 1 u. 3.

8) Vgl. zur Ereignisorientierung des Petrinetz-Konzepts FIDELAK (1988b), S. 7.

9) Vgl. HERZOG, O. (1973), S. 3; DE CINDIO (1983b), S. 41; REISIG (1986a), S. 1.

Die Halbordnung von Ereignisgeschehnissen konstituiert eine interne oder eine externe Nebenläufigkeit der Ausführung jener Prozesse, zu denen die Ereignisse gehören. Die Prozeßausführungen verhalten sich intern oder extern nebenläufig je nachdem, ob es sich um nebenläufig Ereigniseintritte aus demselben Prozeß bzw. aus verschiedenen Prozessen handelt.

10) Vgl. zur kausalen Ausrichtung des Petrinetz-Konzepts MASSACHUSETTS COMPUTER ASSOCIATES (1975), S. 3; MELDMAN (1977), S. 45; FIDELAK (1988b), S. 7; PAGNONI (1990), S. 19, 119f., 122, 124, 134 u. 164; ABEL, D. (1990), S. 49.

11) Vgl. MASSACHUSETTS COMPUTER ASSOCIATES (1974c), S. 151; NUTT (1972b), S. 5.

12) Dies führt zu den Zeitnetzen, die bereits ausführlicher diskutiert wurden. Aber auch bei diesen Netzen werden die Anordnungen von Ereignisgeschehnissen und die Prozeßkoordinierung letztlich auf kausale Wirkungsbeziehungen zurückgeführt. Diese Kausalbeziehungen nehmen auf temporale Determinanten in gleicher Weise Bezug wie auf andere, jedoch atemporale Einflußgrößen.

13) Vgl. MURATA,TA. (1977a), S. 415.

14) Vgl. MURATA,TA. (1977a), S. 415. Globale Systemkontrollen werden im allgemeinen entweder durch einen systemeinheitlichen Zeitparameter oder aber durch einen systemweiten Arbeitstakt definiert. Der Arbeitstakt läßt sich als eine besondere Erscheinungsweise des systemeinheitlichen Zeitparameters auffassen. Daher kann jede globale Systemkontrolle letztlich auf eine systemübergreifende Uhr zurückgeführt werden. Ihre Uhrzeit wird durch einen Zeitparameter wiedergegeben. Ihre interne Arbeitsweise beruht auf einem Puls- oder Taktgenerator, dessen äquidistanten Signale als Arbeitstakte an das umgebende System weitergeleitet werden können. Das Petrinetz-Konzept kennt keine originär definierten zeitlichen Koordinierungsmechanismen. Insofern läßt es auch keine globalen Systemkontrollen zu.

Allerdings kann eine globale, zeitabhängige Systemkontrolle in derivativer Weise durch transitionen- oder stellenbezogene Zeitnetze verwirklicht werden. Es würde jedoch der grundsätzlichen Orientierung des Petrinetz-Konzepts an kausalen Wirkungsbeziehungen zuwiderlaufen, Petrinetzen eine solche zeitbezogene globale Systemkontrolle nachträglich aufzupropfen. Daher wird darauf in dieser Arbeit grundsätzlich verzichtet. Dem widerspricht auch nicht die zentrale "Systemuhr", die in markenbezogenen Zeitnetzen verwendet wird. Denn sie dient ausschließlich dem Zweck, zeitbezogene Präzedenzbeziehungen zwischen Ereignisgeschehnissen repräsentieren und anwenden zu können. Die Koordinierung der Ereignisgeschehnisse bleibt dabei weiterhin einer Schaltregel unterworfen, die auf rein *kausale* Weise erklärt ist. Eine originär definierte *zeitliche* Koordinierung der Schaltereignisse von Transitionen erfolgt daher in markenbezogenen Zeitnetzen nicht. Darüber hinaus wurde das Netzmodul für die zentrale Systemuhr so konstruiert, daß es nur über die Schnittstelle "Systemzeit" die anderen Komponenten eines Netzmodells zu beeinflussen vermag. Diese Beeinflussung erfolgt ausschließlich dadurch, daß Transitionen aus jenen Modellkomponenten die aktuelle Attributausprägung einer Kopie der Systemzeitmarke zur Kenntnis nehmen, die sich auf der Systemzeitstelle befindet. Daher besitzt diese Beeinflussung weiterhin einen rein *lokalen* Charakter. Folglich wäre es verfehlt, die zentrale Systemuhr als eine *globale* Systemkontrolle einzustufen. Dies äußert sich vor allem in der Eigentümlichkeit von markenbezogenen Zeitnetzen, daß die Gleichzeitigkeit und die Simultaneität von Schaltakten auseinanderfallen. Dies wurde in einer früheren Anmerkung dargelegt. Dort wurde gezeigt, daß mittels der zentralen Systemuhr zwar festgelegt werden kann, daß die Schaltakte zweier Transitionen zur gleichen Zeit erfolgen müssen. Aber dies bedeutet keineswegs, daß diese beiden Schaltakte auch simultan - im selben Schaltschritt - geschehen müssen. Vielmehr können sie sich in einem Schaltprozeß, dessen Ausführung keine Zeit verbraucht, nacheinander ereignen. Dabei ist es unbeachtlich, daß sich die Simultaneität der Schaltakte zweier Transitionen mit *anderen* Mitteln erzwingen läßt. Denn dies ist keine Leistung der zentralen Systemuhr, sondern ein Effekt von faktischen Transitionen. Schließlich verhindert die Modellierung einer zentralen Systemuhr ebensowenig, einzelne Transitionen weiterhin in zeitunabhängiger Weise - also asynchron - schalten zu lassen. Denn die Zeitabhängigkeit der Schaltakte gilt nur für solche Transitionen, die mit der Systemzeitstelle als Informationsstelle unmittelbar verknüpft sind. Für alle anderen Transitionen, die nicht zur Nachbarschaft der Systemzeitstelle gehören, bleibt es bei der gewöhnlichen Zeitunabhängigkeit ihrer Schaltakte.

15) Der hier verwendete systemtheoretische Kontrollbegriff ist vom betriebswirtschaftlichen Terminus "Kontrolle" zu unterscheiden. Die Kontrollstruktur eines Systems umfaßt sämtliche Konstrukte, mit deren Hilfe die Ausführung der systeminternen Prozesse koordiniert wird.

In der Regel wird die Ansicht vertreten, daß sich eine nebenläufige Systemkontrolle mit der Existenz einer zentralen Systemuhr nicht vereinbaren läßt; vgl. LAUER (1979), S. 151. Dies trifft aber auf markenbezogene Zeitnetze nicht zu. Denn ihre zentrale Systemuhr stellt wegen ihrer kausal erklärten, lokalen Funktionsweise keine globale Systemkontrolle dar. Vgl. dazu die Erläuterungen in der voranstehenden Anmerkung.

16) Vgl. MASSACHUSETTS COMPUTER ASSOCIATES (1974c), S. 151; NUTT (1972b), S. 5.

17) Das Systemverhalten nimmt nur dann einen deterministischen Charakter an, wenn drei Bedingungen erfüllt sind: Erstens müssen alle Ereignisse durch obligatorische Transitionen repräsentiert werden. Zweitens wird die permissive durch die obligatorische Schaltregel ersetzt. Drittens stehen in keinem Systemzustand mehrere Ereignisgeschehnisse zueinander in Konflikt.

18) Vgl. dazu die Entfaltung des systemtheoretischen Strukturierungsparadigmas.

19) Entgegengesetzter Ansicht scheint SHAPIRO,R. (1972), S. 3.28, zu sein. Die Hinweise auf die kleinstmögliche Anzahl elementarer Netzkomponenten und auf die Gleichförmigkeit der Schaltregel deuten darauf hin, daß Petrinetze als unkomplizierte Konstrukte aufgefaßt werden. Dies trifft jedoch allenfalls auf besonders einfach strukturierte Netze zu, wie z.B. auf Bedingung/Ereignis- oder Stelle/Transition-Netze.

20) Die objektorientierte Systemdefinition wurde bereits vorgestellt und anschließend entfaltet. Die dort vorgetragenen Sachverhalte werden hier nur noch einmal in der Art eines Kurzüberblicks zusammengefaßt. Er dient dazu, die Komplexion des Systembegriffs zu verdeutlichen, die von der systemtheoretischen Einbettung des Petrinetz-Konzepts ausgelöst wird.

21) So können z.B. Eigenschaften von Beziehungen (als Eigenschaften von Komponenten, die nur aus Beziehungen bestehen) ebenso erfaßt werden wie die Beziehungen zwischen Eigenschaften oder die Eigenschaften von Eigenschaften (als Beziehungen zwischen bzw. Eigenschaften von Komponenten, die nur aus Eigenschaften gebildet wurden).

8.2.2 Petrinetze in modelltheoretischer Sicht

Aus systemtheoretischer Sicht wurden Petrinetze als formale Konstrukte ohne Fremdbezug aufgefaßt. Diese enge Perspektive wird durch den modelltheoretischen Ansatz erweitert. Er stellt einerseits Bezüge zu anderen, von Petrinetzen verschiedenen Sachverhalten her (semantische Dimension). Andererseits verknüpft er Petrinetze mit ihren intendierten Anwendungen (pragmatische Dimension). Auf der syntaktischen Ebene wird allerdings im allgemeinen daran festgehalten, Petrinetze als spezielle Erscheinungsformen von Systemen anzusehen¹⁾. Unter diesen Voraussetzungen stellen Petrinetze Systeme (Modelle) dar, die andere Systeme (Modellierungsobjekte) repräsentieren²⁾. Die Modellierungsobjekte lassen sich durch folgende Merkmale charakterisieren³⁾:

- ❑ Es handelt sich um nonsequentielle Systeme, deren Verhalten durch "parallele" Prozesse mit interner oder externer Nebenläufigkeit geprägt wird⁴⁾.
- ❑ Die Systemstruktur besteht aus interagierenden Subsystemen⁵⁾. Sie sind durch den Austausch von Objekten⁶⁾ nur lose miteinander gekoppelt⁷⁾. Es liegen also verteilte Systeme mit dezentraler Subsystemkoordinierung vor⁸⁾.
- ❑ Prozesse und Subsysteme konkurrieren untereinander um knappe Ressourcen⁹⁾.

Die beiden erstgenannten Merkmalsgruppen lassen sich zu einem prägnanten Globalmerkmal verdichten: Bei den Modellierungsobjekten von Petrinetzen handelt es sich im allgemeinen um *komplexe* Systeme¹⁰⁾. Dabei liegt ein besonderes, dem Petrinetz-Konzept eigentümliches Komplexitätsverständnis zugrunde¹¹⁾. Ihm zufolge zeichnen sich komplexe Systeme durch zwei Charakteristika aus: Einerseits kann in ihnen eine Vielfalt von Teilprozessen ausgeführt werden. Andererseits unterliegen die prozeßkonstituierenden Ereignisse einer kausalen Halbordnung. Es bereitet keine großen Anstrengungen, sowohl das Vielfalts- als auch das Halbordnungsmerkmal in den beiden erstgenannten Merkmalsgruppen wiederzuerkennen. Dabei spiegelt sich die Teilprozeßvielfalt vor allem in den interagierenden Subsystemen wider. Die Halbordnungsprämisse liegt dagegen der Prozeßnebenläufigkeit und der dezentralen Subsystemkoordinierung zugrunde.

Der modelltheoretische Ansatz bleibt keineswegs auf die systemtheoretische Interpretation von Netzmodellen eingeschränkt. Vielmehr läßt er beliebige Interpretationen seiner Modellierungsobjekte zu. Da der Deutungsmannigfaltigkeit keine prinzipiellen Grenzen gesetzt sind, kann sie nur in exemplarischer Weise verdeutlicht werden. Zu diesem Zweck wird kurz auf zwei Interpretationsmöglichkeiten eingegangen, die im Bereich betriebswirtschaftlicher Modellbildung neben der systemtheoretischen Variante besonders interessant erscheinen¹²⁾. Sie erstrecken sich auf die entscheidungs- und auf die handlungstheoretische Deutung von Modellierungsobjekten¹³⁾.

Aus handlungstheoretischer Sicht stellen Petrinetze spezielle Handlungsmodelle dar. Solche Handlungsmodelle lassen mit einer charakteristische "Planstruktur" entwerfen¹⁴⁾:

- ❑ Komplexe¹⁵⁾ Handlungen werden als Pläne konzeptualisiert, die aus Bedingungen und atomaren Aktionen bestehen. Die Bedingungen und Aktionen werden durch die Stellen bzw. Transitionen eines Netzes repräsentiert.
- ❑ Die Aktionen können ausgeführt werden, wenn für sie spezifische Vorbedingungen erfüllt und ebenso spezifische Nachbedingungen (noch) nicht erfüllt sind. Die Erfüllungsstati der Bedingungen werden im Netz durch entsprechende Markierungen der betroffenen Stellen wiedergegeben.
- ❑ Wenn eine Aktion ausgeführt wird, ändern sie die Erfüllungsstati ihrer Vor- und ihrer Nachbedingungen jeweils in ihr Gegenteil. Der Aktionsausführung entspricht das Schalten der aktionsdarstellenden Transition.

Die Netzmodelle zeichnen sich wiederum durch die Nebenläufigkeit der repräsentierten Handlungskomplexe aus. Die Aktionen müssen nicht sequentiell aufeinander folgen. Statt dessen können sich die Aktionsausführungen auch beliebig überlappen oder sogar zeitgleich erfolgen. Sie müssen lediglich die Abhängigkeitsbeziehungen einhalten, die durch das Geflecht der Vor- und Nachbedingungen konstituiert werden.

Im Gegensatz zur relativ reichhaltigen Charakterisierung der Semantik von Petrinetzen, die zuvor aus handlungstheoretischer Perspektive skizziert wurde, erweist sich ihre entscheidungstheoretische Interpretation zunächst als überraschend inhaltsarm. Denn Petrinetze stellen in der Regel nur degenerierte Entscheidungsmodelle dar, die auf die Erfassung des Entscheidungsfelds reduziert sind¹⁶). Der Ziel- und Präferenzkomplex, der entscheidungsrelevante Aspekte eines Entscheidungsträgers wiedergibt, findet dagegen in den meisten Netzmodellen keine Beachtung¹⁷). Allerdings lassen sich Netzmodelle im Rahmen ihrer Erreichbarkeitsanalyse so erweitern, daß alle Entscheidungsziele und -präferenzen erfaßt werden. Dies wurde früher in zwei Hinsichten aufgezeigt: Einerseits dienen erwünschte Endmarkierungen der Modellierung von Sachzielen. Andererseits lassen Optimierungsnetze die Berücksichtigung von Formalzielen und Präferenzsystemen zu.

Die modelltheoretische Charakterisierung von Petrinetzen erstreckt sich vorrangig auf den semantischen Aspekt, die rein syntaktisch definierten Komponenten eines Petrinetzes auf entsprechende Komponenten eines modellierten Objekts zu beziehen. Dabei kann der Objektbezug einerseits dadurch hergestellt werden, daß ein Netzmodell in system-, handlungs- oder entscheidungsorientierter Weise gedeutet wird. In diesem Fall liegt eine globale Netzinterpretation vor. Andererseits sind auch lokale Netzinterpretationen möglich. Sie erfolgen, indem einzelnen Komponenten eines Netzmodells entsprechende Komponenten des Modellierungsobjekts als komponentenspezifische Designata zugeordnet werden. Für solche Zuordnungen kommen beliebige natürlichsprachliche Beschriftungen der betroffenen Netzkomponenten in Betracht. Die Erweiterung der formalsprachlichen Netzsyntax durch natürlichsprachliche Komponentenbeschriftungen begründet eine inhaltlich offene, an beliebige Modellierungsobjekte anpassungsfähige Netzsemantik.

Globale und lokale Netzinterpretationen entkräften den mitunter erhobenen Vorwurf, das Petrinetz-Konzept sei - jenseits seines formalen Selbstbezugs - gehaltlos. Diese Vorhaltung gründet auf der Behauptung, das Petrinetz-Konzept lasse nur "uninterpretierte Modelle" zu¹⁸). Ihre Stellen und Transitionen besäßen keine Bedeutung. Daher wäre es ausgeschlossen, "bedeutungs-" oder "sinnvolle" Informationen über Objekte zu gewinnen, die außerhalb des Petrinetz-Konzepts als reale Sachverhalte existieren. Folglich könnten mittels des Petrinetz-Konzepts nur "abstrakte" Erkenntnisse gewonnen werden, die bereits in der formalen Netzkonstitution implizit enthalten sind, aber nichts über die modellierten Objekte aussagen¹⁹). Behauptungen dieser Art erweisen sich jedoch als falsch. Denn die Interpretation von Netzmodellen als System-, Handlungs- oder Entscheidungsmodelle stellt den geforderten Bezug auf Objekte her, die außerhalb eines Netzmodells existieren und seinen Komponenten eine entsprechende Bedeutung verleihen. Die Erkenntnisse, die durch Anwendung des Petrinetz-Konzepts auf Modellierungsobjekte gewonnen werden, gelten daher auch für die modellierten Objekte. Dies trifft allerdings nur in dem Ausmaß zu, in dem die Validität der Netzmodelle akzeptiert wird²⁰).

Schließlich verweisen die handlungs- und entscheidungstheoretischen Interpretationen von Netzmodellen auch auf die pragmatische Dimension des Petrinetz-Konzepts. Denn jedes derart interpretierte Netzmodell kann mit der Absicht ausgewertet werden, jene Handlungen oder Entscheidungen zu erkennen, die vorgegebene Handlungs- bzw. Entscheidungsziele in der jeweils erwünschten Weise zu erreichen gestatten. Wie sich diese pragmatische Modellanwendung realisieren läßt, wurde als Erreichbarkeitsanalyse von Netzmodellen ausführlicher dargelegt.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Auf Ausnahmen von diesem Regelfall wird später im Hinblick auf Entscheidungs- und Handlungs-Modelle eingegangen.

2) Vgl. RAUBOLD (1972), S. 12; GENRICH (1973b), S. 1; SCHROFF (1974), S. 1; MASSACHUSETTS COMPUTER ASSOCIATES (1974c), S. 151; FERNANDEZ (1975), S. 1f.; HOLT,A. (1975c), S. 64; HOLT,A. (1975d), S. 157; GOSTELOW (1975), S. 345; MERLIN,P. (1976a), S. 615; PETRI,C. (1976b), S. 1; PETERSON,J. (1977), S. 223, 230 u. 234; KRIEG,B. (1977), S. 1; ZERVOS (1977), S. 6; GENRICH (1978a), S. 214; OBERQUELLE (1979a), S. A.1; GRIESE,W. (1979), S. 1; KIMM (1979), S. 169; JANICKI (1979), S. 110; STARKE (1980), S. 0; RAMAMOORTHY (1980), S. 441; GENRICH (1980a), S. 23; GENRICH (1980c), S. 698; JANICKI (1980a), S. 178; GENRICH (1981), S. 109; GOLTZ,U. (1982a), S. 96; HURA (1982c), S. 433.

3) Die ersten beiden der nachfolgend angeführten Merkmalsgruppen hängen inhaltlich eng miteinander zusammen. Denn interagierende Subsysteme mit dezentraler Subsystemkoordinierung führen in der Regel zu einem nebenläufigen Verhalten des Gesamtsystems. Die Umkehrung braucht jedoch nicht zuzutreffen. Daher werden die beiden Merkmalsgruppen getrennt dargestellt.

4) Vgl. HACK,M. (1972), S. 2; LAUTENBACH (1973), S. 1; GENRICH (1973b), S. 1; BEST,E. (1974), S. 1; SCHMID,H. (1974), S. 165; PATIL (1975a), S. 2; PETERSON,J. (1977), S. 226; GODBERSEN (1978), S. 46; KIMM (1979), S. 174; GENRICH (1980c), S. 698; MAYR,E. (1980a), S. 199; VALK (1981a), S. 299; HURA (1982c), S. 433; MIGLIOLI (1982), S. 311; MÜLLER-SILVA (1984a), S. 43.

5) Die Segmentierung eines verteilten Gesamtsystems in seine Subsysteme kann sowohl auf der räumlichen Separation der Subsysteme (vgl. z.B. PRINOTH (1983a), S. 199) als auch auf ihrer funktionalen Spezialisierung beruhen. Oftmals wird ein Gesamtsystem derart in seine Subsysteme aufgespalten, daß die Prozesse innerhalb desselben Subsystems rein sequentiellen Charakter besitzen. Jedes Subsystem stellt in diesem Fall ein konventionelles System mit sequentieller Verhaltensweise dar. Die nonsequentielle Qualität des Gesamtsystems manifestiert sich dann erst auf der obersten Modellierungsebene als externe Nebenläufigkeit von Prozessen, die zu unterschiedlichen Subsystemen gehören. Die immanente Parallelität des Systemverhaltens resultiert daher aus der "Vernetzung" der weiterhin sequentiell operierenden Subsysteme. Diese Art der Subsystembildung liegt vor allem dem Konzept der Automaten-netzwerke zugrunde. Dort bildet jeder Automat ein Subsystem, das seine Aktionen in sequentieller Weise ausführt. Die Automaten wirken aber in nebenläufiger Weise zusammen. Ihr Zusammenwirken wird durch das Netzwerk vermittelt, in das die einzelnen Automaten eingebettet sind.

6) Als solche Objekte kommen vor allem immaterielle Informationen in Betracht, die als "Nachrichten" zwischen den koordinierten Subsystemen ausgetauscht werden. Vgl. dazu die Ausführungen im Zusammenhang mit Kontrakt-netzen. Daneben ist auch eine Subsystemkoordinierung durch materielle Ressourcen möglich.

7) Der Begriff der losen Kopplung bezieht sich auf den Sachverhalt, daß kein Subsystem das Verhalten eines anderen Subsystems durch Erteilen von Anweisungen unmittelbar beeinflussen kann. Statt dessen bestimmen die Subsysteme ihre Aktionen autonom. Allerdings nehmen sie dabei auf Rahmenbedingungen Bezug, zu denen u.a. die aktuell verfügbaren Informationen oder Ressourcen rechnen. Daher können sich die Subsysteme mittelbar beeinflussen, indem sie durch das Erschaffen und Verbreiten oder durch das Verbrauchen von Informationen bzw. Ressourcen die Randbedingungen für die Aktionen von anderen Subsystemen verändern. Auf diese Weise koordinieren die Subsysteme ihre Verhaltensweisen wechselseitig, ohne einer zentralen Systemkontrolle zu unterliegen. Dieser Koordinierungsansatz wurde schon anhand von Kontrakt-netzen näher erläutert. In einer abstrakten Variante, die das Detaillierungsniveau der Kontrakt-netze bei weitem nicht erreicht, hat sich vor allem WEDDE mit der losen Kopplung von interagierenden Systemkomponenten auseinandergesetzt. Auf seine Beiträge zur Definition und Gestaltung von "lose gekoppelten Systemen" wurde bereits in einer früheren Anmerkung hingewiesen.

8) Vgl. DENNIS,J. (1973), S. 111f.; ULLRICH (1974), S. 150; FERNANDEZ (1975), S. 1; PRINOTH (1983a), S. 200ff.; DE CINDIO (1983b), S. 41.

9) Vgl. HOLT,A. (1968), S. 14; HOLT,R. (1972a), S. 186ff., dessen Ausführungen sich noch auf einen Vorläufer des Petrinetz-Konzepts beziehen; NOE (1974), S. 387; GOSTELOW (1975), S. 345; PETERSON,J. (1977), S. 234; AGERWALA (1979), S. 90; MÜLLER,B. (1981), S. 199; BAUER,F. (1981), S. 410 (nur bezüglich des Konkurrenz-Aspekts); JENSEN (1983a), S. 8.

10) Die Komplexität der Systeme, die mit Petrinetzen vorzugsweise modelliert werden, heben z.B. hervor: PETRI,C. (1963), S. 386; MELDMAN (1971), S. 65; HACK,M. (1972), S. 2; BAKER,H. (1973a), S. 1; DADDA (1976a), S. 38 u. 44; DADDA (1976c), S. 64; MURATA,TA. (1976c), S. 36; COURVOISIER (1977b), S. 139; AGERWALA (1978a), S. 149; HURA (1982c), S. 433; HACKMANN (1982), S. 85; GIRAULT (1982a), S. 14; YOELI (1982b), S. 8; KIEBLER (o.J.), S. 7. Auf die Komplexität der Modellierungsobjekte von Petrinetzen wird in vielfachen Varianten angespielt. Beispielsweise betont HOLT,A. (1975d), S. 162, Petrinetze eigneten sich zur Modellierung von Systemen beliebiger Komplexität. Also kommen sie auch für die Modellierung besonders komplexer Systeme in Betracht. Ebenso werden Petri-

netze als Instrumente gewürdigt, mit deren Hilfe sich die Komplexität der Modellierung umfangreicher und vielschichtiger Probleme bewältigen lasse; vgl. AGERWALA (1975), S. 221; TOURRES (1976), S. 217; KIEBLER (o.J.), S. 40. Von HACKMANN (1982), S. 22, wird die Komplexitätsbewältigung durch Petrinetze auf ihre netzartige Struktur zurückgeführt. Zugleich weist er darauf hin, daß die gleiche netzartige Struktur auch anderen, für die Modellierung komplexer Systemen ebenso geeigneten Konzepten zukommt. Das Motiv der Komplexitätsbewältigung schimmert des weiteren durch, wenn die Kompaktheit der Modellierung komplexer Systeme gelobt wird. Darauf wird im Zusammenhang mit der Benutzerfreundlichkeit des Petrinetz-Konzepts zurückgekommen.

Mitunter wird auch die entgegengesetzte Ansicht vertreten, Petrinetze erlaubten nur die Repräsentationen sehr einfacher, nahezu trivialer Modellierungsobjekte; vgl. HOLT, A. (1968), S. 202; KINNEY (1976), S. 616; DEVY (1979), S. 43; VALETTE (1979b), S. 156f.; SUZUKI, I. (1980a), S. 620; PETERSON, J. (1981), S. 190; NELSON, R. A. (1982), S. 4 u. 53; VALETTE (1982c), S. 8.

Die vorgenannten Quellen bleiben überwiegend in der Vorstellung von Netzmodellen verhaftet, die sich auf dem Niveau der Modellierungsfähigkeit von Bedingung/Ereignis- oder Stelle/Transition-Netzen bewegen. In diesem Rahmen lassen sich tatsächlich nur einfach konzeptualisierte Objekte modellieren. Aber es bleibt unberücksichtigt, daß die wesentlich größere Modellierungsfähigkeit von Höheren Netzen gestattet, weitaus komplexere Sachverhalte zu repräsentieren. Dies wurde schon anhand der Fallstudie verdeutlicht. Die Komplexität des dort modellierten Flexiblen Fertigungssystems lag deutlich oberhalb des Niveaus trivialer Modellierungsobjekte mit "Spielzeugcharakter". Vgl. auch den Hinweis bei GIRAULT (1982a), S. 14, daß fortentwickelte Netzklassen die Modellierung zunehmend komplexer Systeme ermöglichen.

11) Dies wurde anlässlich der systemtheoretischen Rahmenlegung näher dargelegt.

12) Eine weitere, "exotische" Variante der modelltheoretischen Charakterisierung von Petrinetzen begreift das Petrinetz-Konzept als "Signalmechanik" (PETRI, C. (1967), S. 123). Sie begreift Petrinetze als homomorphe Repräsentationen einer physikalischen Wirklichkeit, wie sie aus der Perspektive der Speziellen Relativitätstheorie wahrgenommen wird. Auf diese naturwissenschaftliche Interpretation von Petrinetzen wurde schon an früherer Stelle hingewiesen.

13) Vgl. dazu die Entfaltung von entscheidungstheoretischen Problemkonzeptualisierungen; vgl. ebenso die kurzen Anmerkungen zu handlungstheoretischen Konzeptualisierungsbeiträgen.

14) Dieser Ansatz beruht auf der Etablierung einer "Handlungslogik" mit der Hilfe von Netzen, die Handlungspläne repräsentieren. Er wurde maßgeblich von GENRICH ausgearbeitet und bereits in einer früheren Anmerkung erwähnt. In einer anderen Variante werden Petrinetze so gestaltet, daß sie Handlungsmöglichkeiten auf der Basis von "Rollen" und Aktionen modellieren.

Eine weitere Übereinstimmung zwischen Handlungstheorie und Petrinetz-Konzept zeigt sich anhand des handlungstheoretischen Entwurfs, der von BORRIES (1988), S. 10ff. u. 49ff., vorgelegt worden ist. Seine zentralen Entwurfskonstituenten, die Handlungen und Zustände, lassen sich mit den Transitionen bzw. den Markierungen von Netzen identifizieren.

15) Einfache Handlungen ohne innere Struktur liegen außerhalb des hier skizzierten Ansatzes. Dazu gehören vor allem Aktionen, die isoliert von anderen Aktionen betrachtet und an keine Bedingungen geknüpft sind.

16) Hinsichtlich des Entscheidungsfelds ist für Petrinetze auf die Charakteristika zu verweisen, die zuvor in bezug auf System- und Handlungsmodelle aufgezeigt wurden. Denn die Entscheidungstheorie ist gegenüber der Konzeptualisierungsart von Entscheidungsfeldern offen. Das umschließt sowohl die system- als auch die handlungstheoretische Feldstrukturierung. Diese Offenheit impliziert die Zulässigkeit beliebiger weiterer Konzeptualisierungsansätze. Sie entsprechen der prinzipiell unbegrenzten Mannigfaltigkeit von Interpretationen, die sich auf die Modellierungsobjekte von Netzmodellen anwenden lassen.

17) Eine Ausnahme stellen jene Netzmodelle dar, in denen Prioritätsregeln repräsentiert werden. Solche Regeln spiegeln Ausschnitte aus dem Ziel- und Präferenzsystem eines Entscheidungsträgers wider. Ein Beispiel für die Modellierung von Prioritätsregeln enthielt die früher präsentierte Fallstudie: Es betraf die Zuordnung zwischen Produktionsaufträgen und Bearbeitungsstationen.

18) Vgl. RAUBOLD (1972), S. 212; PETERSON, J. (1977), S. 230.

19) Vgl. PETERSON, J. (1977), S. 230.

20) Das Validitätsproblem, ob ein Modell das modellierte Objekt tatsächlich "adäquat" repräsentiert, wurde bereits an früherer Stelle angesprochen. Es wird hier keineswegs verkannt. Doch stellt es eine fundamentale Schwierigkeit dar, von der alle Modelle - nicht nur Netzmodelle - betroffen sind.

8.2.3 Petrinetze in graphentheoretischer Sicht

Der graphentheoretischen Perspektive unterliegen Petrinetze nicht unmittelbar. Sie lassen aber eine graphische Repräsentation zu, die bei der Einführung Allgemeiner Netze erstmals vorgestellt wurde. Die graphischen Netzrepräsentationen werden in diesem Kapitel mit den jeweils repräsentierten Petrinetzen gleichgesetzt, um eine unkomplizierte Diktion zu ermöglichen. Darüber hinaus werden nur die Kerne von Petrinetzen¹⁾ - die Netztopologien $(S,T;F)$ - unmittelbar als Graphen betrachtet. Alle darüber hinaus gehenden Netzkonstituenten erlangen dagegen lediglich mittelbare Bedeutung als Graphenerweiterungen. Unter diesen Voraussetzungen läßt sich ein Petrinetz als ein Graph $G=(S,T;F)$ auffassen, für den gilt:

- ❑ Der Graph ist bipartit²⁾ oder bichromatisch³⁾: Seine Knotenmenge $X = S \cup T$ ist in die zwei disjunkten und exhaustiven Teilmengen der Stellen (S) und Transitionen (T) zerlegt.
- ❑ Es liegt ein gerichteter Graph - ein "Digraph"⁴⁾ - vor⁵⁾: Seine Kanten aus der Menge F besitzen jeweils eine eindeutige Richtung.
- ❑ Der Graph besitzt einen finiten Charakter⁶⁾, weil sowohl seine Knoten- als auch seine Kantenmenge endlich sind.
- ❑ Der Graph gehört zur Klasse der Monographen, deren Kanten jeweils genau einen Kantensprung und genau eine Kantenspitze besitzen⁷⁾.
- ❑ Der Graph wird durch eine variable Beschriftung seiner stellenartigen Knoten erweitert⁸⁾. Sie liegt in der Gestalt von Markierungen vor, die sich durch das Schalten von Transitionen verändern.
- ❑ Weitere, aber konstante Beschriftungen können hinzukommen⁹⁾. Sie lassen sich im Prinzip jeder Komponente des Graphen zuordnen.

Während bei der system- und der modelltheoretischen Charakterisierung von Petrinetzen die Nebenläufigkeit von Ereignisgeschehnissen und Prozeßausführungen dominiert, steht die bipartite Knotenmenge im Vordergrund der graphentheoretischen Betrachtungsweise. Die Bipartitheit stellt im Rahmen der konventionellen Graphentheorie eine außergewöhnliche Erscheinung dar¹⁰⁾. Sie bildet das graphentheoretische Äquivalent einer Dualität, die das gesamte Petrinetz-Konzept durchzieht¹¹⁾. Diese Dualität¹²⁾ äußert sich in der Differenzierung zwischen passiven und aktiven Konzeptkomponenten¹³⁾: den Stellen bzw. Transitionen. Die passiven Stellen drücken statische Sachverhalte aus. Die aktiven Transitionen bewirken dagegen durch ihre Schaltakte, daß die vor genannten Sachverhalte verändert werden. Daneben spielen die vielfältigen Möglichkeiten, die Komponenten eines netzdarstellenden Graphen zu beschriften, eine herausragende Rolle¹⁴⁾.

Anmerkungen zum Kapitel:

- 1) Gemeint sind hier die Petrinetze i.w.S.; Petrinetze i.e.S. fallen dagegen mit den hier angesprochenen Netzkernen, den 3-Tupeln (S,T;F), zusammen.
- 2) Vgl. BAKER,H. (1973a), S. 1; JAFFE (1977), S. 8; RAMMIG (1979a), S. 20; FIDELAK (1988b), S. 8; PAGNONI (1990), S. 121; THOME,R. (1990), Abschnitt H 16.4, S. 4.
- 3) Vgl. HACK,M. (1972), S. 11; WINDISCH (1979), S. 9; PRIESE (1983), S. 224.
- 4) Digraph steht für: Directed Graph.
- 5) Vgl. HACK,M. (1972), S. 11; BAKER,H. (1972), S. 1; BYRN (1974), S. II-6; JAFFE (1977), S. 8; WINDISCH (1979), S. 9; PRIESE (1983), S. 224; THOME,R. (1990), Abschnitt H 16.4, S. 4.
- 6) Vgl. BYRN (1974), S. II-6; NELSON,R.A. (1982), S. 53.
- 7) Abweichender Ansicht ist BYRN (1974), S. II-6. Er rechnet Petrinetze zur Klasse der Multigraphen. Solche Graphen lassen Multikanten mit jeweils mehreren Kantenursprüngen oder -spitzen zu. Dies trifft auf Petrinetze jedoch nur dann zu, wenn ihre - originär bipartite - Knotenmenge durch Ausklammerung der Stellenmenge in eine monochrome Knotenmenge transformiert wird. Dann liegt ein Multigraph vor, falls mindestens eine Stelle im zugrundeliegenden Petrinetz mehrere Eingangs- oder mehrere Ausgangskanten besitzt. Denn in diesem Fall müssen die Eingangs- oder die Ausgangskanten der betroffenen Stelle zu einer Multikante mit entsprechend vielen Kantenursprüngen bzw. -spitzen zusammengefaßt werden. Da die Stellen des Petrinetzes unterdrückt worden sind, können seine Markenkopien nicht mehr auf stellenartigen Knoten abgelegt werden. Statt dessen werden nunmehr die Multikanten, in denen die Stellen verdeckt integriert wurden, mit den Markenkopien beschriftet. Dies hat in der Frühphase der Entwicklung des Petrinetz-Konzepts dazu geführt, Netze als "markierte Graphen" (marked graphs) mit monochromer Knotenmenge zu behandeln. Diesem Ansatz wird hier jedoch nicht weiter gefolgt, weil er wesentliche Aspekte des Petrinetz-Konzepts außer acht läßt. Dazu gehören vor allem die Erweiterung von Stellen um Markenzapazitäten und Prädikatssymbole.
- 8) Vgl. GENRICH (1971a), S. 13; LAUTENBACH (1973), S. 7; ROSENSTENGEL (1979), S. 10; GENRICH (1981), S. 111; ROSENSTENGEL (1991), S. 17f.
- 9) Vgl. BAKER,H. (1972), S. 1; GENRICH (1981), S. 109 u. 111; VALK (1981b), S. 141.
- 10) Beispielsweise gehen zahlreiche graphentheoretische Standardwerke auf bipartite Graphen überhaupt nicht ein. Bemerkenswert ist auch, daß PETRI in seiner Dissertation, die das historische Fundament des Petrinetz-Konzepts bildet, die Bipartitheit von Petrinetzen noch nicht erkannte, zumindest nicht explizit ansprach; vgl. PETRI,C. (1962a).
- 11) Vgl. HACK,M. (1975a), S. 22; SCHESCHONK (1977), S. 3.
- 12) An früherer Stelle wurde dargelegt, daß sich mehrere Dualitätsfacetten identifizieren lassen. Hier wird ausschließlich die Dualität zwischen aktiven und passiven Komponenten betrachtet. Sie stellt den "wesentlichen" Dualitätsaspekt dar.
- 13) Vgl. REISIG (1986a), S. 9.
Die gleiche fundamentale Dichotomie von passiven und aktiven Komponenten verfolgen - jedoch außerhalb des Petrinetz-Konzepts - TEMPELMEIER,T. (1990), S. 35; TREDE (1990), S. 13f. u. 16. Sie findet sich ebenso bei LUHMANN (1988), wieder. Allerdings wird sie dort durch die antipodischen Begriffspaare "Struktur und Prozeß" (vgl. S. 73 u. 388) sowie "Struktur und Ereignis" (vgl. S. 393f.) nur mittelbar angesprochen. Vgl. auch die antipodische Unterscheidung zwischen "state" und "transition" bei CUGINI (1989), S. 92.
- 14) Mitunter wird der graphen- mit dem system- und dem modelltheoretischen Ansatz in der Weise verknüpft, daß Petrinetze als graphische Modelle (Repräsentationen) von Systemen betrachtet werden; vgl. ROSENSTENGEL (1991), S. 5. Daran läßt sich der Anspruch knüpfen, alle Merkmale des modellierten Systems entweder unmittelbar als Knoten und Kanten des Graphen zu erfassen oder aber mittelbar durch Knoten- und Kantenbeschriftungen zu repräsentieren. Vgl. zu einem solchen universellen Repräsentationsanspruch VALK (1981b), S. 141. Da natürlichsprachliche Beschriftungen zugelassen sind, wird dieses Postulat zumindest bezüglich aller Systemmerkmale erfüllt, die sich in natürlicher Sprache beschreiben lassen. Daher spielt die Beschriftungsmöglichkeit hinsichtlich der Modellierungsfähigkeit von Petrinetzen eine herausragende Rolle.
In der vorliegenden Arbeit werden Sachverhalte, die keiner natürlichsprachlichen Beschreibung zugänglich sind, nicht weiter berücksichtigt. Allerdings kann die Existenz solcher Sachverhalte durchaus thematisiert werden. Dies zeigt sich in den Diskussionen über die "tacit knowledge"-These. Sie behauptet, es gebe "verschwiegendes", d.h. sprachlich nicht ausdrückbares, aber dennoch anwendbares Wissen. Vgl. zu dieser These POLANYI (1962), S. 49ff. u. 69ff.; SIMON,H. (1976c), S. 147ff.; DAISER (1984), S. 32 u. 69; HOB (1984), S. 15f.; POLANYI (1985), S. 14ff.; ZELEWSKI (1986a), S. 893ff. u. 1169; ZELEWSKI (1991b), S. 246.

8.3 Abgrenzung des Petrinetz-Konzepts von verwandten Konzepten

8.3.1 Gegenüberstellung von Petrinetz-Konzept und Netzplantechnik

8.3.1.1 Einführung

Netzplantechnik¹⁾ und Petrinetz-Konzept lassen sich auf zwei Ebenen voneinander abgrenzen²⁾. Erstens können Unterschiede in ihren Netzdefinitionen³⁾ herausgearbeitet werden. Zweitens ist es möglich, die pragmatische Relevanz solcher Unterschiede zu untersuchen. Dabei wird vor dem Hintergrund argumentiert, Netzpläne oder Petrinetze zu Modellierungszwecken einzusetzen.

Als Kriterien der pragmatischen Relevanz werden die Modellierungsfähigkeit und die Modellierungsgüte eines Konzepts betrachtet. Der Aspekt der Modellierungsfähigkeit wurde bereits als Ausdrucksmächtigkeit von Modellierungskonzepten mehrfach thematisiert⁴⁾. Er beleuchtet, welche Sachverhalte ein Modellierungskonzept grundsätzlich auszudrücken vermag⁵⁾. In dieser Hinsicht werden Unterschiede des Ausdrucksvermögens von Netzplänen und Petrinetzen untersucht. Der Gesichtspunkt der Modellierungsgüte betrifft dagegen solche Facetten eines Modellierungsobjekts, zu deren Repräsentation sowohl Netzpläne als auch Petrinetze fähig sind⁶⁾. Aus diesem Blickwinkel wird die qualitative Beschaffenheit der Repräsentationen eines Modellierungsobjekts studiert⁷⁾.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Die Netzplantechnik wird im folgenden als bekannt vorausgesetzt. Es werden nur solche Sachverhalte belegt, die in den Ausführungen eine spezielle Rolle spielen. Vgl. zu Einführungen in den Bereich der Netzplantechnik KERN,W. (1969b), S. 64ff.; KERN,N. (1969), S. 31ff.; SCHWARZE,J. (1970), S. 704ff.; ZIMMERMANN,H. (1971), S. 9ff.; WILLE (1972); GEWALD (1972); GEWALD (1974); HAX,H. (1974), S. 175ff.; NEUMANN,K. (1975b), S. 188ff.; KÜPPER,WI. (1975), S. 69ff.; GROBE-OETRINGHAUS (1977), S. 11ff.; ALTROGGE (1979), S. 9ff.; KÜPPER,WI. (1979), Sp. 1340ff.; MATTHES,W. (1979a), Sp. 1327ff.; SCHWARZE,J. (1983), S. 35ff.; VOLLMANN (1984), S. 405ff.; REFA (1985e), S. 7ff.; MEYER,M. (1985), S. 79ff.; RUNZHEIMER (1986), S. 159ff.; KERN,W. (1987), S. 90ff.; NEUMANN,K. (1989b), S. 165ff.; SCHWARZE,J. (1990), S. 11ff.; DOMSCHKE (1990), S. 73ff.; KERN,W. (1990a), S. 310ff.; CORSTEN (1990a), S. 377ff.; BIETHAHN (1990), S. 241ff.; PAGNONI (1990), S. 65ff.; HENNICKE (1991), S. 19ff.; RABETGE (1991), S. 93ff.

Der Einfachheit halber wird in dieser Arbeit nur von "der" Netzplantechnik gesprochen. Damit wird nicht verkannt, daß eine Vielzahl verschiedenartiger Netzpläne existiert. Daher spricht z.B. KERN,W. (1987), S. 90, im Plural von "Netzplantechniken". Die Unterschiede zwischen verschiedenartigen Netzplänen erlangen im folgenden jedoch zu meist keine besondere Bedeutung. Daher werden sie ohne nähere Differenzierung gemeinsam nur als "Netzpläne" thematisiert. Sofern in Sonderfällen die Charakteristika einzelner Netzplanarten von Interesse sind, wird darauf ausdrücklich hingewiesen. Darüber hinaus wird die Netzplantechnik als ein konzeptioneller Rahmen verstanden. Er umschließt einerseits Netzpläne und andererseits alle Methoden, die zur Gestaltung oder Untersuchung von Netzplänen eingesetzt werden können. Vgl. dazu auch die Charakterisierung der Netzplantechnik als ein zwar variantenreiches, aber strukturell homogenes Konzept bei SCHWARZE,J. (1970), S. 699; SCHWARZE,J. (1978), S. 174; SCHWARZE,J. (1983), Vorwort.

2) Weitere Beiträge, die sich der Abgrenzung zwischen Petrinetz-Konzept und Netzplantechnik widmen, finden sich bei ROSENSTENGEL (1982), S. 49; FREEDMAN (1988b), S. 333.

Da hier nur die *Eigenarten* des Petrinetz-Konzepts interessieren, wird ausschließlich auf die *Unterschiede* zwischen ihm und der Netzplantechnik eingegangen. Darüber hinaus existieren aber auch mehrere Ansätze, die von den Ähnlichkeiten zwischen Petrinetzen und Netzplänen ausgehen. Ihnen liegt das Vorhaben zugrunde, solche Ähnlichkeiten auszunutzen, um beide Modellierungskonzepte zwecks wechselseitiger Befruchtung miteinander zu kombinieren. Vgl. zu solchen Verschränkungen von Petrinetz-Konzept und Netzplantechnik QUICHAUD (1987), S. 295ff., insbesondere S. 301ff.

3) Im Rahmen des Vergleichs zwischen Netzplänen und Petrinetzen wird der Begriff "Netz" als Oberbegriff zu den beiden Unterbegriffen "Netzplan" und "Petrinetz" verwendet.

4) Modellierungsfähigkeit und Mächtigkeit eines Modellierungskonzepts werden daher als Synonyme verwendet.

5) Daher läßt sich aus entscheidungstheoretischer Perspektive die Ausdrucksmächtigkeit eines Modellierungskonzepts auch als das Ausmaß begreifen, in dem es gelingt, die Sachziele eines Modellierungsvorhabens zu erfüllen.

6) Zwei Modellierungskonzepte können hinsichtlich ihrer Modellierungsgüte also erst dann miteinander verglichen werden, wenn bereits festgestellt wurde, daß ihre Ausdrucksmächtigkeit für die untersuchten Objektfacetten ausreicht. Daher handelt es sich bei der Modellierungsgüte um ein nachrangiges Kriterium, das dem Kriterium der Modellierungsfähigkeit untergeordnet ist.

7) Die Modellierungsgüte kann auch aus einem entscheidungstheoretischen Blickwinkel interpretiert werden. Dann erstreckt sich die qualitative Beschaffenheit der Repräsentationen eines Modellierungsobjekts auf das Ausmaß, in dem die Formalziele eines Modellierungsvorhabens erfüllt werden.

8.3.1.2 Definitive Unterschiede zwischen Petrinetzen und Netzplänen

Prima facie erscheinen Netzpläne und Petrinetze als ähnliche Modellierungskonzepte. Denn beide Netzvarianten weisen eine graphische Repräsentation in der Gestalt von Graphen mit gerichteten Kanten auf. Doch bei näherem Hinsehen zeigt sich rasch, daß Netzpläne und Petrinetze auf deutlich verschiedene Weise definiert sind. Denn die graphischen Netzrepräsentationen unterscheiden sich in zwei Hinsichten grundsätzlich¹⁾. Diese Diskrepanzen betreffen einerseits die Knoten und andererseits die Beschriftungen der netzrepräsentierenden Graphen.

Netzpläne werden durch gewöhnliche monopartite gerichtete Graphen repräsentiert. Für diese Graphen ist nur eine Knotenart definiert²⁾. Die Graphen, die Petrinetze repräsentieren, besitzen dagegen einen bipartiten gerichteten Charakter. Sie bestehen aus zwei fundamental verschiedenen Knotenarten. Darüber hinaus verfügen Petrinetze über Marken, deren Kopien als bewegliche Objekte durch ein Netz "fließen" können. Diese Markenkopien werden im netzrepräsentierenden Graphen als veränderliche Beschriftungen der stellenartigen Knoten wiedergegeben. Für Netzpläne sind solche beweglichen Objekte dagegen überhaupt nicht vorgesehen. Folglich beruhen Netzpläne und Petrinetze - trotz ihrer scheinbaren graphischen Ähnlichkeit - auf Netzdefinitionen, die wesentlich voneinander abweichen.

Die definitive Unterschiedlichkeit von Netzplänen und Petrinetzen schlägt sich in zahlreichen weiteren Sachverhalten nieder. Auf ihre umfassende Erörterung wird jedoch aus zwei Gründen verzichtet. Erstens besitzen sie nicht den gleichen grundsätzlichen Charakter wie die beiden zuvor dargelegten Knoten- und Marken Aspekte. Zweitens wurde in der thematischen Rahmenlegung dieser Arbeit darauf verzichtet, das Petrinetz-Konzept mit anderen Modellierungskonzepten systematisch zu vergleichen. Daher werden im folgenden nur einige besonders auffällige Definitionsunterschiede zwischen Netzplänen und Petrinetzen angesprochen³⁾.

Netzplantechnik und Petrinetz-Konzept differieren bereits hinsichtlich der Intensität, mit der sie sich der formalen Definition ihrer Gestaltungs- und Untersuchungsobjekte widmen. Die formalen Definitionen für mehrere Petrinetzklassen wurden in dieser Arbeit ausführlicher gewürdigt⁴⁾. Im Rahmen der Netzplantechnik erfolgt dagegen zumeist⁵⁾ kein Versuch, eine *rein* formale Definition ihrer Erkenntnisobjekte vorzulegen. Vielmehr herrschen dort gemischte Definitionen vor⁶⁾: Einzelne Definitionsbestandteile werden zwar formal entfaltet⁷⁾. Andere werden jedoch nur natürlichsprachlich umschrieben⁸⁾ oder sogar überhaupt nicht explizit in die Netzdefinition aufgenommen⁹⁾. Diese Nachlässigkeit bei der formalen Definition von Netzplänen führt dazu, daß seitens der Netzplantechnik zwischen der formalen Netzdefinition einerseits und der graphischen Repräsentation eines Netzes andererseits zumeist nicht differenziert wird. Vielmehr wird der netzrepräsentierende Graph im allgemeinen mit dem Netz selbst identifiziert¹⁰⁾.

Um die Diktion zu vereinfachen, wird aber im folgenden zugelassen, zwischen einem Netz und seiner Repräsentation durch einen Graphen nicht mehr streng zu unterscheiden. Statt dessen wird erlaubt, ein Netz unmittelbar als einen Graphen anzusprechen¹¹⁾. Unter dieser Voraussetzung wird von den Knoten und Kanten eines Netzplans oder eines Petrinetzes geredet. Dabei wird der Frage nachgegangen, wie die qualitative Beschaffenheit von Knoten und Kanten festgelegt ist.

Im Rahmen der Netzplantechnik existiert keine homogene Qualifizierung der Kanten und Knoten, die allen Netzplänen gemeinsam zukommt. Vielmehr lassen sich mehrere Gruppen von Netzplanklassen bilden¹²⁾. Die Gruppen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Knoten- und Kanteninterpretationen. Knoten können Vorgänge¹³⁾, Ereignisse oder Komplexe aus Vorgängen und Ereignissen¹⁴⁾ darstellen. Kanten lassen sich entweder als Vorgänge oder aber als Anordnungsbeziehungen interpretieren. Das Petrinetz-Konzept zeichnet sich dagegen durch eine homogene

Qualifizierung seiner Knoten- und Kanten aus. Die Knoten eines Petrinetzes stellen immer entweder aktive oder aber passive Komponenten einer Objektmodellierung dar. Im ersten Fall handelt es sich um die transitionsartigen, im zweiten um die stellenartigen Knoten eines Netzes. Die Netzkanten geben wieder, wie sich die aktiven und passiven Komponenten wechselseitig beeinflussen können. Auf dieser abstrakten Betrachtungsebene stimmen die Knoten- und Kanteninterpretationen aller Petrinetze miteinander überein¹⁵⁾.

Die Netzplantechnik wird von der Differenzierung zwischen Knoten und Kanten beherrscht. Im Unterschied dazu steht beim Petrinetz-Konzept die Dualität von aktiven und passiven Knoten im Vordergrund. Die Kanten von Petrinetzen spielen dagegen nur eine untergeordnete Rolle¹⁶⁾. Darüber hinaus lassen sich nur die transitionsartigen Knoten von Petrinetzen als ähnliche Konstituenten von Netzplänen wiedererkennen. Denn die Transitionen von Petrinetzen entsprechen hinsichtlich ihrer aktiven Qualität den Vorgängen oder Ereignissen aus Netzplänen. Daher korrespondiert die eine, aktive Knotenart des Petrinetz-Konzepts sowohl mit den Vorgangs- oder Ereignisknoten als auch mit den Vorgangskanten der Netzplantechnik. Die andere, passive Knotenart des Petrinetz-Konzepts findet sich dagegen in der Netzplantechnik überhaupt nicht wieder¹⁷⁾. Dies stimmt mit dem eingangs konstatierten Sachverhalt überein, daß bewegliche Objekte wie die Markenkopien des Petrinetz-Konzepts seitens der Netzplantechnik unbekannt sind. Denn die passive Knotenart der "Stellen" dient in Petrinetzen dazu, diese beweglichen Objekte aufzunehmen, solange sie nicht entlang der Netzkanten fließen.

Der Umstand, daß die Netzplantechnik über keine äquivalenten Konstrukte für stellenartige Knoten und Markenkopien verfügt, zieht eine bemerkenswerte Konsequenz nach sich. Sie betrifft die Repräsentation von Zuständen der jeweils modellierten Objekte. Bei Petrinetzen drückt jede Netzmarkierung den aktuellen Objektzustand aus. Die Netzmarkierungen werden ihrerseits durch die stellenartigen Knoten und die stellenbelegenden Markenkopien konstituiert. Da die Netzplantechnik für eben diese Konstrukte keine Entsprechungen anzubieten vermag, lassen sich in einem Netzplan aktuelle Objektzustände nicht unmittelbar wiedergeben. In dieser Hinsicht zeigt sich, wie die Verschiedenartigkeit der Definitionen von Netzplänen und Petrinetzen auf ihre Modellierungsfähigkeit ausstrahlt. Die Ausdrucksmächtigkeit der beiden Modellierungskonzepte wird im anschließenden Kapitel näher gewürdigt.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Es könnte der Einwand erhoben werden, daß die graphische Repräsentation von Netzen nicht mit deren Definition gleichgesetzt werden dürfe. Eine solche Identifizierung erfolgt hier aber auch nicht. Statt dessen wird lediglich auf den Zusammenhang zurückgegriffen, daß die graphische Repräsentation eines Netzes dessen Definition reflektiert. Daher spiegeln sich in Unterschieden der graphischen Repräsentationen von Netzen ihre definitiorischen Diskrepanzen wider.

2) Zwar kann ein Netzplan durchaus unterschiedliche Komplexe aus adjazenten Knoten und Kanten besitzen. Dies ist vor allem bei den 6 Knotenein- und -ausgangskomplexen von GERT-Netzplänen der Fall. Auf GERT-Netzpläne wird unter dem Aspekt der Entscheidungsnetzpläne noch näher zurückgekommen. Vgl. speziell zu den 6 charakteristischen Knoten/Kanten-Komplexen von GERT-Netzplänen PRITSKER (1966b), S. 268; PRITSKER (1968a), S. 499; VÖLZGEN (1969), S. 529f.; ZIMMERMANN, H. (1971), S. 114f.; WILLE (1972), S. 76f.; WHITEHOUSE (1973), S. 244; NEUMANN, K. (1975b), S. 323ff., insbesondere Tab. 9.1 auf S. 325; NEUMANN, K. (1979), S. 20ff., insbesondere S. 22, Table 1.2.1; NEUMANN, K. (1990), S. 17ff.; PAGNONI (1990), S. 104ff., insbesondere Fig. 4.15 auf S. 106; SCHWARZE, J. (1990), S. 243; CORSTEN (1990a), S. 385ff., insbesondere Abb. 189 auf S. 387; HENNICKE (1991), S. 55f.

In der einschlägigen Literatur zur Netzplantechnik werden diese Komplexarten zwar zumeist als "Knotenarten" bezeichnet. Dies ist jedoch insofern irreführend, als die - angebliche - Unterschiedlichkeit der Knoten erst aus dem Rekurs auf verschiedene Verknüpfungen ihrer Ein- oder Ausgangskanten resultiert. Folglich kommt die Artverschiedenheit nicht Knoten an sich, sondern nur dem Verbund aus Knoten und adjazenten Kanten zu. Daher spricht z.B. CORSTEN (1990a), S. 387, zu Recht von "Knoteneingangs- und Knotenausgangskombinationen" (allerdings spricht er auf S. 386 noch von "Knotentypen"). Diesem Sachverhalt entspricht im Rahmen des Petrinetz-Konzepts, daß *dieselbe* Knotenart "Transition" auf unterschiedliche - z.B. konjunktive oder adjunktive - Weise mit adjazenten Kanten verknüpft sein kann. Die *Artverschiedenheit* von Stellen und Transitionen bezieht sich dagegen nicht auf solche Knoten/Kanten-Komplexe. Vielmehr kommt sie den Knoten allein als artdifferenzierendes Merkmal zu.

3) Zu den weniger offensichtlichen Unterschieden zählt beispielsweise das Ausmaß, in dem temporale Aspekte von Netzdefinitionen eingeschlossen werden. Die Definition eines Petrinetzes ist zunächst von allen zeitbezogenen Einflußgrößen frei. Zwar existieren nachträgliche Erweiterungen des Petrinetz-Konzepts, die es gestatten, in die Netzdefinition temporale Größen aufzunehmen. Dazu gehören z.B. Zeitnetze, in denen Transitionen mit Schaltdauern versehen werden. Der Verf. hat aber bei der Erweiterung Synthetischer Netze von dieser Option Abstand genommen. Statt dessen wird an der atemporalen Netzdefinition festgehalten. Zeitaspekte werden dabei *außerhalb* der Netzdefinition erfaßt. Dies geschieht durch ein spezielles Netzmodul, das eine zentrale Systemuhr repräsentiert, und durch zeitbezogene Markenattribute. Daher kann im Falle des Petrinetz-Konzepts von weitgehend atemporalen Netzdefinitionen gesprochen werden.

Die Netzplantechnik stellt dagegen von vornherein auf Netzdefinitionen ab, in denen die Erfassung von Zeitgrößen eine herausragende Rolle spielt. Dies gilt einerseits für die Ausführungsdauern von Vorgängen. Andererseits sind ebenso die Zeitabstände zwischen vorgangsbegrenzenden Anfangs- oder Endereignissen betroffen, die als Minimal- oder Maximalfristen berücksichtigt werden. Von der atemporalen Definition eines Netzplans kann allenfalls dann gesprochen werden, wenn sie weder Ausführungsdauern noch Fristen umfaßt. Eine solche zeitfreie Netzplandefinition läßt sich zwar vorstellen. Doch könnte ein derart definierter Netzplan ausschließlich im Rahmen einer Projektstrukturanalyse verwendet werden. Die "wesentlichen" Leistungen der Netzplantechnik, die sich auf Termin- und Kapazitätsanalysen erstrecken, blieben aber ausgeklammert. Daher wird der vorgenannte Sonderfall nicht zu den typischen Definitionen von Netzplänen gerechnet.

4) Vgl. dazu die formalen Definitionen von Allgemeinen Netzen, von Petrinetzen i.e.S., von Stelle/Transition-Netzen und von Synthetischen Netzen. Es wird eingeräumt, daß manche Definitionen in formaler Hinsicht unvollständig bleiben, weil wichtige Netzaspekte in den formalen Netzdefinitionen nicht enthalten sind. Dies wurde für Stelle/Transition-Netze hinsichtlich ihrer Schaltregel dargelegt. Allerdings wurde gezeigt, wie sich diese Lücken in der formalen Netzdefinition nachträglich schließen lassen. Darüber hinaus wurde die formale Definition Synthetischer Netze von vornherein so angelegt, daß sie die Vorschriften für das Schalten von Transitionen umfaßt.

5) Es soll allerdings nicht verkannt werden, daß vereinzelte Ansätze für die durchgängig formale Definition von Netzplänen existieren; vgl. z.B. SCHWARZE, J. (1970), S. 724ff.; STEINHARDT (1977), S. 11ff.; SCHWARZE, J. (1978), S. 175ff. i.V.m. S. 186 sowie S. 187ff.; SCHWARZE, J. (1983), S. 10ff., insbesondere S. 24ff. i.V.m. S. 36 sowie S. 37ff., 45ff., 61f. u. 87ff. Sie bleiben aber Ausnahmeerscheinungen. Darauf weist auch ausdrücklich SCHWARZE, J. (1983) in seinem Vorwort hin. Ein Ansatz zur formalen Netz(plan)definition findet sich auch bei THOME, R. (1990), Abschnitt H 16.4, S. 3f. Allerdings wird er nicht explizit auf Netzpläne, sondern auf "Netz-Graphen" und "Netze" bezogen (S. 3). Darüber hinaus leidet dieser Definitionsansatz unter Mängeln, die schon in einer früheren Anmerkung angesprochen wurden.

6) Vgl. zu dem Usus, lediglich Teilaspekte zu formalisieren und durch umfangreichere natürlichsprachliche Erläuterungen zu ergänzen, z.B. ZIMMERMANN, H. (1971), S. 12f.; HAX, H. (1974), S. 175ff.; DIN 69900 (1980), S. 340ff.

(bemerkenswert ist die rein natürlichsprachliche Basisdefinition eines Netzplans auf S. 341); REFA (1985e), S. 9ff.; NEUMANN, K. (1989b), S. 169ff.; RABETGE (1991), S. 100ff., insbesondere S. 101f. Dagegen finden sich bereits relativ weit reichende Formalisierungen von Netzplänen bei WILLE (1972), S. 178ff., und HÄSSIG (1979), S. 40ff. Von STEINHARDT (1977), S. 11ff., wurde sogar schon eine vollständig formalisierte Netzplandefinition vorgelegt. Allerdings hat sein Netzplan-8-Tupel in der Literatur zur Netzplantechnik bislang keine nennenswerte Rezeption erfahren.

7) Hierbei handelt es sich z.B. um zulässige Anordnungsbeziehungen oder Zeitabstände.

8) Beispielsweise werden die konjunktive oder adjunktive Kantenverknüpfungen in GERT-Netzplänen nicht formal definiert, sondern zunächst nur umgangssprachlich ausgedrückt; vgl. etwa NEUMANN, K. (1979), S. 20f.; NEUMANN, K. (1990), S. 17ff., oder CORSTEN (1990a), S. 387. Erst in den Auswertungsalgorithmen - für bereits definierte (!) - Netzpläne werden diese Beziehungen nachträglich in formaler Weise berücksichtigt. Lediglich bei NEUMANN, K. (1990), S. 19, findet sich ein früher Formalisierungsansatz. Allerdings bleibt er auf die Verknüpfungen von Ausgangskanten beschränkt und erfolgt erst im Anschluß an die natürlichsprachliche Verknüpfungsdefinition.

9) Z.B. wird bei Vorgangsknoten-Netzplänen oftmals nur die Knotenmenge explizit definiert. Dies geschieht in der Regel durch tabellarische Listen, deren Zeilen zu jeweils einem Vorgangsknoten gehören. Die Kanten dieser Netzpläne werden dagegen in den netzdefinierenden Listen überhaupt nicht aufgeführt. Statt dessen sind die Informationen über die Netzkanten nur implizit in Angaben über die unmittelbaren Vorgänger (oder Nachfolger) von Vorgangsknoten enthalten. Solche Angaben leisten keine explizite Definition der Netzkanten, weil sie sich zunächst nur auf Netzknoten beziehen. Vgl. dazu die exemplarische - aber typische - Definition eines Vorgangsknoten-Netzplans bei DOMSCHKE (1990), S. 80, Tab. 5.3 (netzplandefinierende Liste) und Abb. 5.4 (graphische Netzrepräsentation); vgl. ebenso REFA (1985e), S. 51; NEUMANN, K. (1989b), S. 219f.

10) Im Rahmen der Netzplantechnik wird das konzeptionelle Problem, ob - und gegebenenfalls wodurch - sie sich von der Graphentheorie abgrenze, im allgemeinen nicht thematisiert. Dies deutet darauf hin, daß Netzpläne und Graphen gewöhnlich als gleichartige Konstrukte behandelt werden. Allenfalls werden Netzpläne als spezielle Klasse von Graphen behandelt. Darauf wird im anschließenden Abschnitt näher eingegangen. Für Petrinetze wurde dagegen stets zwischen ihrer formalen Definition und ihrer graphischen Repräsentation differenziert. Vgl. dazu insbesondere die Ausführungen, die sich mit der unterschiedlichen konzeptionellen Qualität von Stelle/Transition-Netzen und Graphen auseinandersetzen. Dort wurde gezeigt, daß Petrinetze keineswegs eine spezielle Graphenklasse darstellen. Statt dessen handelt es sich bei einem einzelnen Netz um ein allgemeineres Konstrukt, das eine Vielzahl von Graphen als Repräsentationen von markierungsabhängigen Netzzuständen umgreift.

Dem Verf. sind nur einige wenige Quellen bekannt, in denen auf das Verhältnis zwischen Graphen und Netzplänen explizit eingegangen wird: NEUMANN, K. (1989a), S. 27, definiert Netzwerke - im Sinne von Netzplänen - als gerichtete Graphen (Digraphen), die bewertet sind und keine isolierten Knoten besitzen. An dieser Fundstelle erscheinen zwei Aspekte besonders interessant. Erstens wird die oben ausgesprochene These bestätigt, daß keine Unterscheidung zwischen der formalen Netzdefinition und der graphischen Netzrepräsentation erfolgt. Statt dessen werden Netzpläne mit einer weit gefaßten Klasse von Graphen gleichgesetzt. Zweitens thematisiert NEUMANN in seinem o.a. Aufsatz vorrangig Aspekte der Graphentheorie. Es handelt sich also um keinen "typischen" Beitrag zur Netzplantechnik. Dies unterstreicht die einleitende Bemerkung, daß im Rahmen der Netzplantechnik selbst kaum auf ihr Verhältnis zur Graphentheorie eingegangen werde. In ähnlicher Weise legt sich HÄSSIG (1979), S. 40 u. 51, fest: Er definiert Netzpläne als gerichtete Graphen, die er mitunter noch als zusammenhängende und schleifenfreie (CPM-Netzpläne, S. 40) oder als bewertete Graphen (MPM-Netzpläne, S. 51) präzisiert. Wiederum werden Netzpläne mit einer Klasse von Graphen identifiziert. Das trifft auch auf die Ausführungen von HENNICKE (1991), S. 19, zu. Er betrachtet Netzpläne als gerichtete, vollständige und zyklusfreie Graphen. Dabei definiert HENNICKE (1991), S. 18, die Vollständigkeit eines Graphen so, daß es sich um einen zusammenhängenden Graphen handeln muß. Die Zyklusfreiheit fällt dagegen mit der Schleifenfreiheit eines Graphen zusammen. Allerdings trifft HENNICKE's Netzplandefinition, die er selbst für eine "allgemein gültige" Definition hält (S. 19), tatsächlich nicht auf alle Netzplan-Klassen zu. Beispielsweise dürfen MPM-Netzpläne durchaus Zyklen enthalten, sofern sie nur eine nicht-negative Bewertung aufweisen.

11) Dies gilt allerdings nur so lange, wie aus dem Argumentationskontext ersichtlich ist, ob jeweils die graphische Netzrepräsentation oder die formale Netzdefinition gemeint ist.

12) Vgl. KERN, W. (1987), S. 91; NEUMANN, K. (1989b), S. 173f.; DOMSCHKE (1990), S. 75, Abb. 5.2; CORSTEN (1990a), S. 378; HENNICKE (1991), S. 22.

13) Diese Vorgänge werden oftmals auch als Aktionen oder Aktivitäten bezeichnet; vgl. z.B. WEBER, K. (1968), S. 236; MATTHES, W. (1979a), Sp. 1328; NEUMANN, K. (1990), S. 10. Hierdurch läßt sich verdeutlichen, daß primär solche Vorgänge interessieren, die jeweils eine Veränderung des aktuellen Zustands des modellierten Systems bewirken. Diese Vorgangsinterpretation wird später im Zusammenhang mit der Modellierungsfähigkeit der Netzplantechnik Bedeutung erlangen.

14) Solche Komplexe liegen vor allem bei CPM-Netzplänen vor (CPM steht für: Critical Path Method). In einem Knoten aus einem CPM-Netzplan werden die Anfangs- und Endereignisse aller adjazenten Kanten zusammengefaßt. Jede dieser Kanten repräsentiert einen - relativ zum betrachteten Knoten - nachfolgenden bzw. vorangehenden Vorgang. Daher fallen im CPM-Knoten sowohl Ereignis- als auch Vorgangsaspekte zusammen. Allerdings erstaunt, daß im Rahmen der Netzplantechnik diese gemischte Knoteninterpretation nicht thematisiert, a fortiori auch nicht problematisiert wird. Lediglich wird mitunter eingeräumt, daß ein Knoten aus einem CPM-Netzplan kein reines Ereignis darstellen muß, sondern auch einen Komplex aus mehreren Ereignissen repräsentieren kann. Vgl. dazu die "Sammelereignisse" bei SCHWARZE, J. (1990), S. 56f., für den Fall, daß in einem Knoten mindestens drei Vorgangskanten zusammenstoßen.

15) Abweichungen treten allerdings auf, wenn diese abstrakte Betrachtungsebene verlassen wird, um den Charakter der "Aktivität" oder "Passivität" von Knoten und des "Beeinflussungszusammenhangs" von Kanten zu konkretisieren. Beispielsweise lassen sich die Kanten eines Petri-Netzes einerseits als Flußkanten und andererseits als Kausal-kanten auffassen. Hinsichtlich unterschiedlicher Knotenkonkretisierungen wird auf Kanal/Instanz-Netze einerseits und Synthetische Netze andererseits verwiesen. Bei den erstgenannten lassen sich die stellenartigen Knoten z.B. als Speicherplätze für Objekte interpretieren. Bei Synthetischen Netzen werden die stellenartigen Knoten dagegen durch die Zuordnung von Prädikatssymbolen als Potentiale aller Formeln qualifiziert, die sich aus den zugehörigen Prädikatssymbolen ableiten lassen.

16) Dies wird besonders deutlich bei der Spezifizierung Synthetischer Netze durch ihre Netzlegenden oder bei der Implementierung von Prädikat/Transition-Netzen durch das Softwarepaket PASIPP. In beiden Fällen werden Stellen und Transitionen durch grundverschiedene Legenden- bzw. Implementierungssegmente erfaßt. Die Netzkanten gehen jedoch als untergeordnete Bestandteile in die Spezifizierungen der Transitionen ein. Vgl. dazu die formale Definition Synthetischer Netze.

17) Umgekehrt kennt das Petri-Netz-Konzept keine Entsprechungen für die Knoten, die in manchen Netzplänen Komplexe aus Vorgängen und Ereignissen darstellen. Darin sieht der Verf. aber kein Defizit, sondern einen Vorzug des Petri-Netz-Konzepts. Denn Vorgang/Ereignis-Komplexe gehören zu den "artifizialen" Konstrukten, deren Problematik in anderem Zusammenhang schon ausführlicher diskutiert wurde. Solche Artefakte gehören nicht zur "natürlichen" Repräsentation eines Modellierungsobjekts. Damit offenbaren sie eine gravierende konzeptionelle Unzulänglichkeit aller Netzpläne, die auf Komplexknoten beruhen. Dazu gehört vor allem die Klasse der CPM-Netzpläne. Bei CPM-Netzplänen äußern sich Mängel bei der natürlichen Repräsentation von Modellierungsobjekten noch in einer zweiten Hinsicht: Es handelt sich um die Kanten für Scheinvorgänge. Diese Scheinvorgänge repräsentieren keine realen Vorgänge aus dem jeweils modellierten Realitätsausschnitt. Vielmehr stellen sie Artefakte dar, die nur aus "modellierungstechnischen" Gründen erforderlich sind. Darauf wird noch zurückgekommen.

8.3.1.3 Pragmatische Unterschiede zwischen Petrinetzen und Netzplänen

8.3.1.3.1 Aspekte der Modellierungsfähigkeit

Autoren, die sich mit den Modellierungsfähigkeiten von Petrinetzen und Netzplänen befassen, gehen kaum auf Unterschiede ihrer Ausdrucksmächtigkeit ein. Vielmehr wird im allgemeinen nur darauf hingewiesen, daß mit der Hilfe von Petrinetzen alle Sachverhalte modelliert werden können, die sich auch durch Netzpläne darstellen lassen¹⁾. Diesem Urteil schließt sich der Verf. grundsätzlich an. Allerdings erweist es sich in dreifacher Hinsicht als ergänzungsbedürftig.

Erstens fällt auf, daß kein strenger Beweis für die Behauptung erfolgt, das Petrinetz-Konzept verfüge mindestens über die gleiche Modellierungsfähigkeit wie die Netzplantechnik. Statt dessen wird zumeist an die Zustimmung des Lesers appelliert oder auf die "offensichtliche" Richtigkeit des Urteils vertraut. Mitunter wird auch eine simple, aber nicht stringente Zuordnung der Komponenten von Netzplänen und Petrinetzen vorgenommen²⁾. Zweitens bleibt oftmals die weitergehende Frage unbeantwortet, ob Sachverhalte existieren, die sich zwar durch Petrinetze, nicht aber durch Netzpläne modellieren lassen³⁾. Drittens werden keine expliziten Aussagen darüber getroffen, ob Netzplantechnik und Petrinetz-Konzept hinsichtlich derjenigen Sachverhalte, die sie gemeinsam zu repräsentieren vermögen, die gleiche Modellierungsgüte besitzen. Dieser letzte Aspekt wird erst im nächsten Kapitel beleuchtet. Die beiden ersten Gesichtspunkte werden anschließend ausführlicher erörtert.

Der Nachweis, daß das Petrinetz-Konzept tatsächlich mindestens so ausdrucksmächtig ist wie die Netzplantechnik, wird durch zwei Umstände erschwert. Einerseits existieren zahlreiche unterschiedliche Varianten der Netzplantechnik. Daher müßte die Ausdrucksmächtigkeit des Petrinetz-Konzepts an jeder dieser Varianten gemessen werden. Darauf könnte nur dann verzichtet werden, wenn sich eine dominante Variante der Netzplantechnik identifizieren ließe, die mindestens so ausdrucksmächtig wie *alle* anderen Varianten ist. Leider trifft dies nicht zu. Daher müßte das Petrinetz-Konzept zumindest mit allen nicht-dominierten⁴⁾ Varianten der Netzplantechnik verglichen werden. Es ist aber nicht das Anliegen dieser Arbeit, erschöpfend zu untersuchen, welche Varianten der Netzplantechnik hinsichtlich ihrer Ausdrucksmächtigkeit nicht dominiert werden⁵⁾. Andererseits verfügen die Varianten der Netzplantechnik zumeist über keine vollständig formalisierte Netzdefinition. Darauf wurde schon hingewiesen. Ein exakter Vergleich der Ausdrucksmächtigkeiten von Modellierungskonzepten läßt sich aber im allgemeinen nur dann ohne größere Schwierigkeiten durchführen, wenn auf vollständige Konzeptformalisierungen zurückgegriffen werden kann. Informale Konzeptbeschreibungen bilden dagegen oftmals keine präzise Vergleichsgrundlage. Dies gilt vor allem⁶⁾ hinsichtlich der Interpretationsspielräume umgangssprachlicher Formulierungen. Ein Beispiel für diese natürlichsprachliche Ungenauigkeit liefern die sogenannten "Entscheidungs"-Netzpläne⁷⁾. Auf ihre Problematik wird später ausführlicher eingegangen. Um solche Ungenauigkeiten auszuschließen, müßten die betrachteten Varianten der Netzplantechnik zunächst einer vollständigen Formalisierung unterzogen werden. Auch dies liegt außerhalb des Erkenntnisinteresses der hier vorgelegten Ausarbeitung.

Aufgrund der vorgenannten Probleme wird darauf verzichtet, einen präzisen Nachweis für das oben angeführte Mächtigkeitsurteil zu führen⁸⁾. Immerhin wird angedeutet, in welcher Weise ein solcher Nachweis grundsätzlich erfolgen kann. Dabei wird auf zwei nicht-dominierte Varianten der Netzplantechnik zurückgegriffen: die Klassen der GERT-⁹⁾ und der PPS-Netzpläne¹⁰⁾. GERT-Netzpläne zeichnen sich im Vergleich mit allen anderen Netzplänen dadurch aus, daß sie die ausdrucksmächtigsten Komplexe aus Knoten und adjazenten Kanten umfassen¹¹⁾. PPS-Netzpläne decken dagegen alle Anordnungsbeziehungen und Fristen ab, die seitens der Netzplantechnik Beachtung finden¹²⁾. Zwar ist dem Verf. keine dominante Variante der Netzplantechnik

bekannt, die sowohl alle Knoten/Kanten-Komplexe von GERT-Netzplänen als auch alle Anordnungsbeziehungen und Fristen von PPS-Netzplänen umfassen würde. Doch reicht die Gesamtheit aller Knoten/Kanten-Komplexe, Anordnungsbeziehungen und Fristen aus GERT- und PPS-Netzplänen aus, um die bekanntesten Varianten der Netzplantechnik als Spezialfälle zu überdecken. Dazu gehören vor allem CPM-¹³⁾, MPM-¹⁴⁾ und PERT-Netzpläne¹⁵⁾. Daher läge ein starkes Indiz für die oben behauptete Ausdrucksmächtigkeit des Petrinetz-Konzepts vor, wenn es gelänge aufzuzeigen, daß sich innerhalb eines Petrinetzes alle vorgenannten Knoten/Kanten-Komplexe, Anordnungsbeziehungen und Fristen wiedergeben lassen. Der entsprechende Nachweis wird im folgenden skizziert¹⁶⁾.

Zunächst wird auf die sechs charakteristischen Komplexe aus Knoten und adjazenten Kanten von GERT-Netzplänen eingegangen. Sie betreffen einerseits Knoten mit mehreren Eingangskanten, die untereinander entweder in konjunktiver oder aber in adjunktiver oder aber in disjunktiver Weise verknüpft sind. Solche Knoten lassen sich in Petrinetzen durch transitionsartige Knoten wiedergeben, deren Eingangskanten in kon-, ad- bzw. disjunktiver Weise verknüpft sind. Bei der konjunktiven Verknüpfung der Eingangskanten handelt es sich um den Standardfall operationaler Netzmodelle. Ad- und disjunktiv verknüpfte Eingangskanten werden durch diejenigen Netzkonstrukte ermöglicht, die anlässlich der Erweiterung Synthetischer Netze vorgestellt wurden. Andererseits erlauben GERT-Netzpläne Knoten, die entweder einen deterministischen oder aber einen stochastischen Knotenausgang besitzen. Falls diese Knoten mehrere Ausgangskanten aufweisen, entsprechen ihre vorgenannten Knotenausgänge einer konjunktiven bzw. disjunktiven Verknüpfung der Ausgangskanten. Diese Knoten werden in Petrinetzen durch transitionsartige Knoten erfaßt, deren Ausgangskanten in kon- bzw. disjunktiver Weise zusammenhängen. Konjunktiv verknüpfte Ausgangskanten bilden wiederum den Standardfall operationaler Netzmodelle. Disjunktiv verknüpfte Ausgangskanten lassen sich abermals durch ein Netzkonstrukt berücksichtigen, das bei der Erweiterung Synthetischer Netze besprochen wurde. Folglich ist es möglich, *jeden* Komplex aus einem Knoten und adjazenten Ein- oder Ausgangskanten, der für GERT-Netzpläne definiert ist, in einem Petrinetz durch ein äquivalentes Konstrukt auszudrücken.

Die Anordnungsbeziehungen und Fristen aus PPS-Netzplänen lassen sich in Petrinetzen ebenso wiedergeben. Zu diesem Zweck wird auf die Erweiterung Synthetischer Netze um die Repräsentation temporaler Einflußgrößen zurückgegriffen. Jeder Vorgang wird in einem PPS-Netzplan als ein Knoten dargestellt. Ihm entspricht im Petrinetz dasjenige Teilnetz, das für die Repräsentation eines atomaren Prozesses konstruiert wurde¹⁷⁾. Die Start- und die Schlußtransition dieses Netzkonstrukts korrespondieren mit dem Anfangs- bzw. mit dem Endzeitpunkt der Vorgangsausführung im PPS-Netzplan. Alle Anordnungsbeziehungen zwischen zwei Vorgängen eines PPS-Netzplans stellen Präzedenzbeziehungen zwischen den Anfangs- oder Endzeitpunkten der Vorgangsausführungen dar. Jede dieser Präzedenzbeziehungen kann in einem Petrinetz durch eines derjenigen Netzkonstrukte ausgedrückt werden, die für die Repräsentation von Minimal- oder Maximalfristen eingeführt wurden. Dabei reicht es aus, im Petrinetz die Start- oder Schlußtransitionen, die mit den Anfangs- bzw. Endzeitpunkten der Vorgangsausführungen im PPS-Netzplan korrespondieren, durch die fristrepräsentierenden Netzkonstrukte miteinander zu verbinden. Zugleich decken diese Konstruktionen die Minimal- und Maximalfristen ab, die für PPS-Netzpläne vorgesehen sind. Daher gestatten Petrinetze, *alle* Anordnungsbeziehungen und Fristen von PPS-Netzplänen durch gleichwertige Netzkonstrukte auszudrücken.

Voranstehend wurde aufgezeigt, daß sich grundsätzlich alle Sachverhalte, die in GERT- oder PPS-Netzplänen durch Knoten/Kanten-Komplexe, Anordnungsbeziehungen und Fristen erfaßt werden, ebenso in Petrinetzen modelliert werden können. Für die erforderlichen Transformationen von Konstrukten aus Netzplänen in entsprechende Konstrukte aus Petrinetzen reichen die früher präsentierten Erweiterungen Synthetischer Netze aus. Abschließend wird anhand eines

Beispiels verdeutlicht, wie bei der Transformation eines Netzplans in ein netzplanrepräsentierendes Petrinetz vorgegangen werden kann.

Der Übersichtlichkeit halber werden nur einfache Netzpläne betrachtet. Dabei wird ein Netzplan als einfach klassifiziert, wenn sechs Bedingungen erfüllt sind. Erstens besitzen alle Knoten eine rein konjunktive Verknüpfungslogik. Zweitens werden Normalfolgen als einzige Anordnungsbeziehungen zugelassen. Drittens geben diese Normalfolgen ausschließlich Minimalfristen der Dauer Null wieder¹⁸⁾. Viertens sind alle Ausführungsdauern von Vorgängen in deterministischer Weise fest vorgegeben. Fünftens muß jeder Vorgang genau einmal ausgeführt werden. Sechstens existieren nur genau ein Start- und genau ein Zielvorgang. Zu solchen einfachen Netzplänen gehören z.B. CPM-Netzpläne. Aufgrund ihrer Einfachheit können diese Netzpläne in Petrinetze transformiert werden, ohne die oben vorgestellten Netzkonstrukte aus erweiterten Synthetischen Netzen verwenden zu müssen. Statt dessen reichen Stelle/Transition-Netze aus. Allerdings heben sie sich von konventionellen Stelle/Transition-Netzen durch zwei Besonderheiten ab, die in dieser Arbeit ebenso schon vorgestellt wurden. Es handelt sich einerseits um skalare Schaltwerte $sw(t_n)$ für Transitionen. Andererseits wird eine nicht-leere Endmarkierungsmenge EM berücksichtigt. Für die Transformation eines einfachen Netzplans in sein äquivalentes Stelle/Transition-Netz gelten folgende Regeln¹⁹⁾:

- Der eine Startvorgang des Netzplans wird durch eine Transition (Starttransition) t_1 mit genau einer Eingangsstelle (Startstelle) s_1 repräsentiert. Die Starttransition besitzt genau so viele Ausgangsstellen, wie der Startvorgang im zugrundeliegenden Netzplan Nachfolgevorgänge aufweist.
- Der eine Zielvorgang des Netzplans wird durch eine Transition (Zieltransition) t_N mit genau einer Ausgangsstelle (Zielstelle) s_M repräsentiert. Die Zieltransition weist genau so viele Eingangsstellen auf, wie der Zielvorgang im zugrundeliegenden Netzplan Vorgängervorgänge besitzt.
- Jeder Vorgang des Netzplans, der weder den Start- noch den Zielvorgang darstellt, wird durch genau eine Transition t_n mit $n \in \{2, \dots, N-1\}$ repräsentiert. Diese Transition besitzt genau so viele Ein- und Ausgangsstellen s_m mit $m \in \{2, \dots, M-1\}$, wie der repräsentierte Vorgang im Netzplan Vorgänger- bzw. Nachfolgevorgänge aufweist.
- Andere Stellen oder Transitionen als die voranstehend eingeführten besitzt das Netz nicht. Seine Stellen- und seine Transitionenmenge sind daher durch $S = \{s_m; m=1, \dots, M\}$ bzw. $T = \{t_n; n=1, \dots, N\}$ festgelegt. Ebenso existieren keine anderen Kanten als diejenigen, welche die Transitionen aufgrund der o.a. Vereinbarungen mit ihren Ein- und Ausgangsstellen verknüpfen. Daher ist auch die Flußrelation F des Netzes eindeutig bestimmt.
- Alle Kanten aus der Flußrelation F erhalten das universelle Einheitsgewicht. Daher gilt für die Gewichtungsfunktion $W: S \rightarrow \{0,1\}$ mit $W(kn_x, kn_y) = 1$ für alle Kanten $(kn_x, kn_y) \in F$ und $W(kn_x, kn_y) = 0$ für alle Knotenpaare $(kn_x, kn_y) \notin F$.
- Allen Stellen s_m wird die universelle Einheitskapazität $K(s_m) = 1$ zugeordnet. Folglich nimmt die Kapazitätsfunktion die Gestalt $K: S \rightarrow \{1\}$ an.
- Unter der Ausgangsmarkierung M_0 ist die Startstelle s_1 mit genau einer Marke belegt, während alle anderen Stellen unmarkiert bleiben. Es gilt also $M_0: S \rightarrow \{0,1\}$ mit $M_0(s_1) = 1$ und $M_0(s_m) = 0$ für alle $s_m \in (S - \{s_1\})$.
- Jeder Transition t_n wird der skalare Schaltwert $sw(t_n)$ zugeordnet. Er beträgt genau die Dauer desjenigen Vorgangs, der durch die Transition t_n repräsentiert wird.
- Das Netz besitzt genau eine erwünschte Endmarkierung $M_{E,1} = M_E$. Unter ihr weist die Zielstelle s_M genau eine Marke auf, während alle anderen Stellen unmarkiert sind. Dadurch wird eine Endmarkierungsmenge $EM = \{M_E\}$ mit $M_E(s_M) = 1$ und $M_E(s_m) = 0$ für alle $s_m \in (S - \{s_M\})$ definiert.

Diese Transformationsregeln führen dazu, daß jeder Vorgang des Netzplans im Stelle/Transition-Netz durch genau eine vorgangsspezifische Transition t_n mit $t_n \in T$ wiedergegeben wird²⁰). Jeder Anordnungsbeziehung des Netzplans, die als Normalfolge zwischen dem Endzeitpunkt eines früheren und dem Startzeitpunkt eines späteren Vorgangs eine Minimalfrist der Dauer Null konstituiert, entspricht im Stelle/Transition-Netz genau eine normalfolgenspezifische Stelle s_m mit $s_m \in (S - \{s_1, s_M\})$. Grob gesprochen korrespondieren also Vorgänge mit Transitionen und Anordnungsbeziehungen mit Stellen.

Da die Vorgangsdauern des Netzplans im Stelle/Transition-Netz nicht als Schaltdauern, sondern nur als Schaltwerte von Transitionen berücksichtigt werden, liegt *kein* Zeitnetz vor. Deshalb wird die aufwendige Behandlung des Zeitaspekts, wie sie für Synthetische Netze entfaltet wurde, von vornherein vermieden²¹). Darüber hinaus gehört das Stelle/Transition-Netz, das einen einfachen Netzplan abbildet, qua Transformationsvorschrift zur Klasse der Synchronisationsnetze. Denn in dem Stelle/Transition-Netz besitzt jede Stelle höchstens eine Ein- und höchstens eine Ausgangstransition. Solche Synchronisationsnetze lassen sich durch Analysetechniken des Petrinetz-Konzepts besonders einfach auswerten²²).

Eine spezielle Auswertungstechnik für Synchronisationsnetze, die jeweils eine ausgezeichnete Endmarkierung und skalare Schaltwerte für alle ihre Transitionen besitzen²³), hat LOWAS präsentiert²⁴). Sie gestattet es, in jedem solchen Netz mindestens einen optimalen Schaltprozeß zu ermitteln, der die Ausführungsdauer des gesamten Projekts minimiert²⁵). Auf diese Weise zeigt sich abermals, daß das Petrinetz-Konzept durchaus in der Lage ist, Optimierungsaufgaben zu bewältigen²⁶). Dabei braucht noch nicht einmal auf die aufwendige Untersuchung von Erreichbarkeitsgraphen zurückgegriffen zu werden. Darüber hinaus wird deutlich, daß das allgemeine Effizienzproblem der Erreichbarkeitsanalyse in speziellen Analysesituationen seine Bedeutung verlieren kann. Diese Situationen liegen vor allem dann vor, wenn es gelingt, Analyseaufgaben so zu formulieren, daß sie sich ohne eine Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen erfüllen lassen. Genau dies ist für die oben beschriebene Transformation einfacher Netzpläne der Fall.

Darüber hinaus berücksichtigt der Optimierungsansatz von LOWAS Ressourcen, die zur Ausführung der Vorgänge eines Projekts erforderlich sind²⁷). Entsprechend zur Einfachheit der Netzpläne wird auch eine einfache Ressourcensituation vorausgesetzt: Es wird nur eine Ressourcenart berücksichtigt, von der genau K identische Einheiten mit $K \in (\mathcal{N} \cup \{\omega\})$ ²⁸) zur Verfügung stehen. Jeder Vorgang nimmt zu Beginn seiner Ausführung genau eine Ressourceneinheit in Anspruch, die dann für andere Vorgangsausführungen temporär nicht mehr zur Verfügung steht. Der Vorgang gibt die Ressourceneinheit am Ende seiner Ausführung wieder frei. Diese Art der Ressourcennutzung wird bei zahlreichen Aufgabenstellungen aus dem Bereich des Operations Research unterstellt. Sie trifft auch auf einfache Maschinenbelegungsplanungen zu, die sich mit Hilfe der Netzplantechnik im Rahmen einer Kapazitätsplanung ausführen lassen. Dabei müssen die einfachen Maschinenbelegungsplanungen zwei Voraussetzungen erfüllen. Erstens wird jeder Arbeitsgang (Vorgang) auf genau einer Maschine (Ressourceneinheit) ausgeführt. Zweitens stehen insgesamt K Maschinen bereit, die hinsichtlich ihrer Belegung mit Arbeitsgängen als identisch behandelt werden²⁹). Für die voranstehend skizzierte einfache Ressourcensituation erlaubt es die Auswertungstechnik von LOWAS, die Vorgangsausführungen den verfügbaren Ressourceneinheiten so zuzuordnen, daß das jeweils betrachtete Gesamtprojekt in der kürzest möglichen Zeit durchgeführt wird.

Bisher wurde gezeigt, daß Petrinetze mindestens die gleiche Ausdrucksmächtigkeit wie Netzpläne besitzen. Dies läßt aber die weitergehende Frage offen, ob Sachverhalte existieren, die sich mit der Hilfe von Petrinetzen, nicht aber durch Netzpläne repräsentieren lassen. Im folgenden wird dargelegt, daß das Petrinetz-Konzept tatsächlich eine größere Modellierungsfähigkeit als die Netzplantechnik besitzt³⁰).

Eine größere Modellierungsfähigkeit scheint bereits vorzuliegen, wenn Kapazitätsplanungen betrachtet werden, die sich auf *mehrere* knappe Ressourcenarten erstrecken. Denn die Algorithmen zur kapazitätsbezogenen Auswertung von Netzplänen gehen im Regelfall von der Annahme aus, es müßten Zugriffskonflikte auf nur eine Ressourcenart gelöst werden³¹⁾. Das Petrinetz-Konzept erlaubt dagegen, beliebig viele Ressourcenarten zu berücksichtigen. Denn jede Ressourcenart kann in einem Synthetischen Netz durch eine eigene Markenart repräsentiert werden³²⁾. Die Kopien einer Markenart stellen dann Einheiten derselben Ressourcenart dar. Dennoch besitzt das Petrinetz-Konzept in dieser Ressourcen Hinsicht nur scheinbar eine größere Ausdrucksmächtigkeit als die Netzplantechnik. Denn die Auswertungsalgorithmen für Netzpläne lassen sich ohne größere Schwierigkeiten auf die Berücksichtigung mehrerer Ressourcenarten erweitern³³⁾. Daher handelt es sich bei der üblichen Beschränkung auf nur eine Ressourcenart lediglich um eine unvollständige Explizierung, nicht aber um ein echtes Defizit der Ausdrucksmächtigkeit von Netzplänen³⁴⁾.

Eine tatsächlich geringere Modellierungsfähigkeit der Netzplantechnik liegt jedoch im Rahmen der Kostenerfassung vor. Denn seitens der Netzplantechnik werden nur solche Kosten gewürdigt, die durch Ausführen von Vorgängen verursacht werden. Das schließt auch beschleunigte oder verzögerte Vorgangsausführungen ein. In der Realität können jedoch durchaus Kosten eine wichtige Rolle spielen, die zu keiner der vorgenannten Kategorien zählen. Dies gilt insbesondere für kalkulatorische Zinskosten, die für die Kapitalbindung in einem Werkstück anfallen, während an dem Werkstück *kein* Bearbeitungsvorgang³⁵⁾ ausgeführt wird. Kapitalbindungskosten, die in solchen bearbeitungsfreien Wartezeiten durch reinen Zeitablauf verursacht werden, lassen sich in Netzplänen grundsätzlich nicht berücksichtigen³⁶⁾.

Im Rahmen des Petrinetz-Konzepts ist es dagegen möglich, wartende Werkstücke durch die Kopien einer Werkstückmarke zu modellieren. Dies wurde im Rahmen der früher präsentierten Fallstudie ausführlicher dargelegt. Insbesondere kann eine solche Werkstückmarkenkopie auf einer Stelle verharren, während die Systemzeit des modellierten Produktionssystems voranschreitet. Diese Wartezeit läßt sich exakt messen. Entsprechend ist es möglich, der Werkstückmarkenkopie den wartezeitbedingten Zuwachs der Kapitalbindungskosten für das betroffene Werkstück zuzuordnen. Auch dies wurde in der Fallstudie detailliert beschrieben. Folglich besitzen Petrinetze zumindest im Hinblick auf kalkulatorische Zinskosten eine größere Modellierungsfähigkeit als Netzpläne³⁷⁾. Tatsächlich stellt die Repräsentation dieser Zinskosten nur eine Facette aus einem viel umfassenderen Modellierungsbereich dar. Er erstreckt sich auf alle Aspekte eines Modellierungsobjekts, die vom *unveränderten* Objektzustand abhängen. Ein solcher Objektzustand läßt sich in einem Petrinetz stets durch eine objektrepräsentierende Markenkopie darstellen, die so lange auf einer Stelle ruht, wie der Zustand des betroffenen Objekts sich nicht verändert. In einem Netzplan lassen sich dagegen Objektzustände überhaupt nicht unmittelbar wiedergeben. Darauf wurde schon hingewiesen. A fortiori ist es auch nicht möglich, einen Modellierungsaspekt wiederzugeben, der einen unveränderten Objektzustand voraussetzt.

Die Ausdrucksmächtigkeit des Petrinetz-Konzepts übertrifft die der Netzplantechnik des weiteren in bezug auf Deadlock-Situationen³⁸⁾. Solche Situationen können immer dann eintreten, wenn mehrere Vorgänge bei ihrer Ausführung um knappe Ressourcen konkurrieren. Dabei droht die Gefahr, daß sich die Vorgänge beim Ressourcenzugriff gegenseitig blockieren. Dann läßt sich keine der Vorgangsausführungen fortsetzen. Das betrachtete Produktionssystem ist in eine "Sackgasse" geraten, in der die knappen Ressourcen in Anspruch genommen worden sind, sich aber nicht wieder freigeben lassen. Es liegt eine Deadlock-Situation vor, in der im Produktionssystem überhaupt kein Vorgang mehr ausgeführt werden kann. Solche Deadlock-Situationen sind in der gesamten Literatur zur Netzplantechnik unbekannt. Es besteht auch keine Aussicht, sie nachträglich zu berücksichtigen. Denn in Netzplänen werden die beiden Sachverhalte, daß ein Vorgang auf Ressourcen zugreift oder sie wieder freigibt, nicht explizit modelliert. Statt dessen wird der Ressourcenbedarf von Vorgangsausführungen nur implizit in den Auswertungsalgorithmen der Netzplantechnik erfaßt. Dabei werden aber auch nicht die einzelnen Akte eines Res-

sourcenzugriffs oder einer Ressourcenfreigabe gewürdigt. Vielmehr werden nur die benötigten Ressourceneinheiten gezählt. Auf diese Weise ist es nicht möglich, die wechselseitige Blockierung von Ressourcenzugriffen zu modellieren³⁹⁾.

Im Rahmen des Petrinetz-Konzepts können hingegen Deadlock-Situationen ohne Schwierigkeiten modelliert werden. Dies wurde an früherer Stelle als Deadlockanalyse von Netzmodellen ausführlicher thematisiert. Ausschlaggebend für diese zusätzliche Modellierungsfähigkeit des Petrinetz-Konzepts ist seine charakteristische Verwendung von Marken⁴⁰⁾. Die Schaltakte von Transitionen ziehen von ihren Eingangsstellen Markenkopien ab oder legen auf ihren Ausgangstellen Markenkopien ab. Die Markenkopien können ihrerseits die Einheiten einer Ressource repräsentieren. Auf diese Weise lassen sich Ressourcenzugriffe und -freigaben durch Schaltakte von Transitionen wiedergeben, bei denen entsprechende Markenkopien abgezogen bzw. abgelegt werden.

Schließlich weist das Petrinetz-Konzept eine größere Modellierungsfähigkeit in bezug auf einen Sachverhalt auf, der prima facie nur theoretische Bedeutung besitzt. Es handelt sich um die Möglichkeit, negativ-bedingte Aktionsanweisungen auszudrücken. Die Netzplantechnik ist grundsätzlich nicht in der Lage, solche Aktionsanweisungen zu erfassen. Denn in Netzplänen existiert kein Konstrukt, daß die Funktion einer logischen Negation erfüllen könnte. Petrinetze lassen sich dagegen mit der Hilfe von Inhibitoranten so erweitern, daß die Repräsentation von negativ-bedingten Aktionsanweisungen keine Schwierigkeiten bereitet. Das wurde schon an früherer Stelle dargelegt.

Die Fähigkeit zur Wiedergabe negativ-bedingter Aktionsanweisungen ist erforderlich, um die Ausdrucksmächtigkeit von TURING-Automaten zu erlangen. Daraus folgt zunächst eine theoretisch interessante Einsicht: Das Konzept der TURING-Automaten bildet eine scharfe Trennlinie zwischen der ausdrucksärmeren Netzplantechnik und dem ausdrucksreicheren Petrinetz-Konzept. Darüber hinaus zieht diese Erkenntnis aber auch praktisch bedeutsame Konsequenzen nach sich. Denn die Modellierungsfähigkeit von TURING-Automaten ist u.a.⁴¹⁾ erforderlich, um beliebige Prioritätsordnungen erfassen zu können. Dies spielt beispielsweise eine große Rolle, wenn Arbeitsgänge an Bearbeitungsstationen nach der Maßgabe von Prioritätsregeln eingelastet werden sollen. Solche prioritätsabhängigen Aspekte entziehen sich der Modellierungsfähigkeit von Netzplänen, weil ihnen die erforderliche TURING-Mächtigkeit fehlt. Bei Petrinetzen stößt dagegen die Modellierung von Prioritätsordnungen, insbesondere auch von Prioritätsregeln, auf keine Hindernisse. Dies wurde bereits nachgewiesen.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. ROSENSTENGEL (1982), S. 49f., in bezug auf die Klasse aller deterministischen Netzpläne; PAGNONI (1985a), S. 135, hinsichtlich der GERT-Netzpläne (aus der Klasse der stochastischen Netzpläne). Auf beide Beiträge wird in den nachfolgenden Anmerkungen noch mehrfach zurückgekommen.

2) Vgl. ROSENSTENGEL (1982), S. 49. Dort ordnen ROSENSTENGEL und WINAND die Knoten eines Netzplans zu den Transitionen ("Ereignissen") eines Petrinetzes und die Kanten eines Netzplans den Stellen ("Zuständen") eines Petrinetzes zu. Diese Zuordnung vermag aus mehreren Gründen nicht zu überzeugen. Erstens bleibt sie explizit auf deterministische Netzpläne beschränkt. Daher fehlt ihr die erwünschte universelle Gültigkeit für alle Netzpläne. Zweitens werden die Kanten von Petrinetzen in keiner Weise berücksichtigt. Drittens unterbleibt die Thematisierung unterschiedlicher Anordnungsbeziehungen in Netzplänen. Viertens ist es nicht korrekt, die Stellen eines Petrinetzes als "Zustände" zu behandeln. Fünftens erweist sich die Zuordnung als inkonsistent, wenn sie auf Netzpläne mit Vorgangskanten angewendet wird. Denn die Abbildung von Vorgangskanten aus einem Netzplan auf die Stellen eines Petrinetzes widerspricht der früher vorgetragenen Feststellung, daß die stellenartigen Knoten von Petrinetzen grundsätzlich als passive Komponenten interpretiert werden. Daher trifft die oben erwähnte Zuordnung - wenn von den anderen Kritikpunkten abgesehen wird - strenggenommen noch nicht einmal auf alle deterministischen Netzpläne zu. Vielmehr gilt sie allenfalls für deterministische Vorgangsknoten-Netzpläne.

3) Zwar weist ROSENSTENGEL (1982), S. 49, darauf hin, daß sich nicht alle Petrinetze aus der Klasse der Synchronisationsnetze in Netzpläne transformieren ließen. Außerdem würden diese Petrinetze "eine wesentlich umfangreichere Klasse denkbarer Strukturen" abdecken. Doch wird einerseits in keiner Weise konkretisiert, *welche* Aspekte von Synchronisationsnetzen einer Transformation in Netzpläne unzugänglich sein sollen. Die behauptete Transformationsunmöglichkeit kann daher nicht nachgeprüft werden. Andererseits bleibt die besonders interessante Frage unbeantwortet, *welche* "Strukturen" Petrinetze zu modellieren vermögen, ohne daß die gleiche Modellierungsfähigkeit von Netzplänen erreicht wird. Für Urteile über die Ausdrucksmächtigkeit von Modellierungskonzepten wäre es aber wünschenswert zu wissen, welche Aspekte ("Strukturen") von Modellierungsobjekten durch die Konzepte nicht repräsentiert werden können.

4) Eine Variante heißt hier nicht-dominiert, wenn keine Alternative existiert, deren Ausdrucksmächtigkeit die Modellierungsfähigkeit der betrachteten Variante echt übertrifft. Eine solche nicht-dominierte Variante braucht ex definitione - wie es bei der Netzplantechnik der Fall ist - keinesfalls dominant zu sein.

5) Zwei nicht-dominierte Varianten werden in Kürze als GERT- und als PPS-Netzpläne vorgestellt.

6) Ein anderer Präzisionsmangel, der nicht auf natürlichsprachlicher Vagheit beruht, wird an anderer Stelle angesprochen. Dort geht es um die Frage, welche Qualität der Endzeitpunkt einer Vorgangsausführung besitzen soll.

7) Entscheidungsnetzpläne drücken keine Entscheidungen im Sinne der formal präzise definierten Entscheidungstheorie aus. Statt dessen umfassen sie lediglich stochastisch bedingte Ablaufvarianten bei der Abwicklung eines Projekts. Eine korrekte Formalisierung des Entscheidungsbegriffs würde dieses Mißverständnis aufdecken.

8) Schon in der einführenden Rahmenlegung wurde die Aufgabe ausgegrenzt, das Petrinetz-Konzept mit alternativen Modellierungskonzepten detailliert und systematisch zu vergleichen.

9) GERT steht - wie bereits festgestellt wurde - für: Graphical Evaluation and Review Technique. Vgl. zu GERT-Netzplänen und ihren fortentwickelten Varianten, wie z.B. Q-GERT- und GERTS-Netzplänen, PRITSKER (1966a); PRITSKER (1966b), S. 267ff.; PRITSKER (1966c), S. 293ff.; PRITSKER (1968a), S. 499ff.; WHITEHOUSE (1969), S. 45ff.; VÖLZGEN (1969), S. 520ff.; ZIMMERMANN, H. (1971), S. 114ff.; WILLE (1972), S. 76ff.; WHITEHOUSE (1973), S. 242ff., 302ff. u. 434ff.; CZERANOWSKY (1974), S. 120ff.; PHILLIPS, D. (1975), S. 223ff.; NEUMANN, K. (1975b), S. 320ff., insbesondere S. 325ff.; MOORE, L. (1976), S. 51ff.; PRITSKER (1977), S. 3ff.; ELMAGHRABY (1977), S. 337ff.; NEUMANN, K. (1979), S. 18ff.; WOLFE (1980), S. 72ff.; NEUMANN, K. (1990), S. 11ff.; PAGNONI (1990), S. 14ff. u. 103ff.; HENNICKE (1991), S. 55ff.

10) PPS(-System) steht für: Projektplanungs- und -steuerungssystem. Vgl. zu PPS-Netzplänen SCHWARZE, J. (1970), S. 720f. u. 723 DER BUNDESMINISTER DER VERTEIDIGUNG (1975); ALTROGGE (1979), S. 11 u. 125ff.; RABETGE (1991), S. 123f.; HENNICKE (1991), S. 42.

11) Die meisten Varianten der Netzplantechnik lassen nur Netzpläne zu, deren Knoten eine rein konjunktive Verknüpfungslogik besitzen. Die Verknüpfungslogik eines Knotens läßt sich in seine Eingangs- und seine Ausgangslogik aufspalten. Die Eingangslogik eines Knotens heißt konjunktiv (adjunktiv/disjunktiv), wenn zwei Bedingungen erfüllt sind. Erstens muß der Knoten mehrere Eingangskanten besitzen. Zweitens darf der Knoten bei einer Netzplanauswertung nur dann benutzt werden, wenn *alle* seine Eingangskanten (*mindestens eine/genau eine* seiner Eingangskanten) eine netzplanspezifische Anforderung erfüllen. Die Anforderung besteht z.B. für einen Vorgangskanten-Netzplan darin, daß die Ausführung desjenigen Vorgangs, der von einer Eingangskante repräsentiert wird, abgeschlossen ist. Falls ein Knoten nur höchstens eine Eingangskante aufweist, kann seine Eingangslogik beliebig

als kon-, ad-, disjunktiv oder als undefiniert betrachtet werden. Die Ausgangslogik eines Knotens heißt dagegen konjunktiv (adjunktiv/disjunktiv), wenn zwei analoge Bedingungen zutreffen. Erstens muß der Knoten mehrere Ausgangskanten aufweisen. Zweitens führt eine Anwendung des Knotens bei einer Netzplanauswertung dazu, daß für *alle* seine Ausgangskanten (*mindestens eine/genau eine* seiner Ausgangskanten) eine netzplanspezifische Eigenschaft zutrifft. Die Eigenschaft erstreckt sich z.B. für einen Vorgangskanten-Netzplan darauf, daß die Ausführung desjenigen Vorgangs, der von einer Ausgangskante repräsentiert wird, begonnen werden kann. Falls ein Knoten nur höchstens eine Ausgangskante besitzt, läßt sich seine Ausgangslogik wiederum beliebig als kon-, ad-, disjunktiv oder als undefiniert festsetzen. Die Knoten eines Netzplans zeichnen sich durch eine rein konjunktive Verknüpfungslogik aus, wenn sowohl ihre Eingangs- als auch ihre Ausgangslogik einen konjunktiven Charakter trägt. Dies ist für die meisten Varianten der Netzplantechnik der Fall.

GERT-Netzpläne lassen dagegen kon-, ad- und disjunktive Eingangs- sowie kon- und disjunktive Ausgangslogiken ihrer Knoten zu. Allerdings werden in der Literatur zu GERT-Netzplänen die kon- und disjunktive Ausgangslogik eines Knotens zumeist als deterministischer bzw. stochastischer Knotenausgang thematisiert. Dies ändert aber nichts an der logischen Qualität, die der Kantenverknüpfung am Knotenausgang zugrundeliegt. Vielmehr verdeutlicht die abweichende Bezeichnungsweise nur die Eigenart von GERT-Netzplänen, daß konjunktiv (disjunktiv) verknüpfte Ausgangskanten eines Knotens Vorgänge mit deterministischen (stochastischen) Vorgangsdauern repräsentieren. In GERT-Netzplänen brauchen die Eingangs- und die Ausgangslogik desselben Knotens nicht übereinzustimmen. Daher lassen sich insgesamt 6 Knoten/Kanten-Komplexe mit verschiedener Verknüpfungslogik bilden. Diese 6 Kombinationsmöglichkeiten wurden bereits in einer früheren Anmerkung kurz angesprochen.

Bei CORSTEN (1990a), Abb. 189 auf S. 387, finden sich sogar 9 Kombinationen für die Eingangs- und Ausgangslogiken von Knoten/Kanten-Komplexen. Denn er läßt für GERT-Netzpläne auch Knoten mit adjunktiver Ausgangslogik zu. Solche Knoten berücksichtigt ebenso MATTHES, W. (1979a), Sp. 1336, Fall (b), zweiter Subfall. Er bezieht sich aber nicht auf GERT-Netzpläne. Tatsächlich sind im Rahmen von GERT-Netzplänen *keine* Knoten mit adjunktiver Ausgangslogik vorgesehen. Dies wird besonders deutlich bei PATZAK (1975), S. 231. Er regt an, stochastische Knoten mit adjunktiv verknüpften Ausgangskanten als eine *Erweiterung* von GERT-Netzplänen einzuführen. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten, die den Ausgangskanten zugeordnet sind, erweisen sich dann allerdings als stochastisch abhängig. Daher lassen sich derart "bereicherte" GERT-Netzpläne nur schwer auswerten. Auf eine analoge Schwierigkeit wurde schon aufmerksam gemacht: In Petrinetzen bereitet der Umgang mit Knoten, die adjunktiv verknüpfte Ausgangskanten besitzen, wegen der Unbestimmtheit der logischen Adjunktion erhebliche Schwierigkeiten. Denn es ist nur bekannt, daß eine knotenbezogene Eigenschaft für *mindestens* eine seiner Ausgangskanten zutrifft. *Wie viele* Kanten dies tatsächlich sind, legt die adjunktive Ausgangslogik aber nicht fest. Einen mittelbaren Hinweis auf die Probleme adjunktiver Ausgangslogik liefert auch INTELLICORP (1989), S. 14. Dort wird für Produktionsregeln zwar eine adjunktive Verknüpfung ihrer Voraussetzungs-, aber keine adjunktive Verknüpfung ihrer Wirkungsformeln zugelassen. Aufgrund der zuvor skizzierten Probleme wird im folgenden an der konventionellen Definition von GERT-Netzplänen festgehalten, die nur deterministische und stochastische Knoten mit kon- bzw. disjunktiver Ausgangslogik zuläßt.

12) Es handelt sich um die Anordnungsbeziehungen der Normal-, der Anfangs-, der End- und der Sprungfolgen sowie um Minimal- und Maximalfristen. Vgl. zu ihrer Erfassung durch PPS-Netzpläne DER BUNDESMINISTER DER VERTEIDIGUNG (1975), S. 1-7ff. u. 1-15 (Anordnungsbeziehungen) bzw. S. 1-11 u. 1-16ff. (Fristen); weniger deutlich auch ALTROGGE (1979), S. 125f.

Vgl. darüber hinaus zu den vorgenannten 4 Anordnungsbeziehungen und 2 Fristarten für beliebige Netzpläne SCHWARZE, J. (1983), S. 17(f.) u. 19(f.); REFA (1985e), S. 52ff. u. 57ff.; NEUMANN, K. (1989b), S. 171 (nur Anordnungsbeziehungen); SCHWARZE, J. (1990), S. 83ff., insbesondere Abb. 8.13 auf S. 94f. und Abb. 8.14 auf S. 96f.; DOMSCHKE (1990), S. 78; HENNICKE (1991), S. 31 (nur Anordnungsbeziehungen).

13) CPM steht für: Critical Path Method. Vgl. zu CPM-Netzplänen WEBER, K. (1968), S. 236ff.; ZIMMERMANN, H. (1971), S. 14ff.; WILLE (1972), S. 35ff. u. 117ff.; HAX, H. (1974), S. 179ff.; NEUMANN, K. (1975b), S. 191ff., insbesondere S. 196ff.; ALTROGGE (1979), S. 18ff.; HÄSSIG (1979), S. 40ff.; NEUMANN, K. (1989b), S. 174ff.; DOMSCHKE (1990), S. 87ff. (dort als Vorgangspfeil-Netzpläne thematisiert); PAGNONI (1990), S. 8ff. u. 65ff.; HENNICKE (1991), S. 40f. i.V.m. S. 23ff.

CPM-Netzpläne lassen sich als GERT-Netzpläne mit deterministischen Vorgangsdauern, konjunktiver Knoteneingangs- und deterministischer Knotenausgangslogik auffassen.

14) MPM steht für: Metra-Potential-Methode. Vgl. zu MPM-Netzplänen ZIMMERMANN, H. (1971), S. 36ff.; WILLE (1972), S. 60ff. u. 130ff.; NEUMANN, K. (1975b), S. 234ff.; ALTROGGE (1979), S. 101ff.; HÄSSIG (1979), S. 49ff.; MEYER, M. (1985), S. 81ff.; NEUMANN, K. (1989b), S. 212ff.; DOMSCHKE (1990), S. 76ff. (dort als Vorgangsknoten-Netzpläne thematisiert); HENNICKE (1991), S. 41f. i.V.m. S. 30ff.

MPM-Netzpläne stellen Sonderfälle der PPS-Netzpläne dar, in denen ausschließlich Anfangsfolgen als Anordnungsbeziehungen zwischen Vorgängen erlaubt sind. Allerdings wird des öfteren auch dann von MPM-Netzplänen gesprochen, wenn in einem Vorgangsknoten-Netzplan alle 4 Anordnungsbeziehungen (und 2 Fristarten) erlaubt sind. Vgl. dazu DOMSCHKE (1991), S. 64. dann fallen MPM-Netzpläne mit den PPS-Netzplänen im wesentlichen zusammen.

15) PERT steht für: Program Evaluation and Review Technique. Vgl. zu PERT-Netzplänen ZIMMERMANN, H. (1971), S. 27ff.; WILLE (1972), S. 48ff. u. 123ff.; NEUMANN, K. (1975b), S. 210ff.; HÄSSIG (1979), S. 44ff.; NEUMANN, K. (1989b), S. 192ff.; PAGNONI (1990), S. 87ff.; HENNICKE (1991), S. 46ff. i.V.m. S. 28ff.

PERT-Netzpläne können in GERT-Netzpläne mit stochastischen Vorgangsdauern, konjunktiver Knoteneingangs- und deterministischer Knotenausgangslogik transformiert werden. Allerdings wird für die stochastischen Vorgangsdauern eine spezielle Verteilungsfunktion (Beta-Verteilung) vorausgesetzt.

16) In PAGNONI (1985a), S. 135f., findet sich ein Algorithmus, der angeblich GERT-Netzplänen in Petrinetze zu übersetzen vermag, die zur Klasse der Prädikat/Transition-Netze gehören. Die dort vorgelegten Transformationen reichen aber nicht aus, um nachzuweisen, daß Petrinetze alle Knoten/Kanten-Komplexe aus GERT-Netzplänen erfassen können. Denn es erfolgt - ohne dies explizit als Prämisse anzuführen - eine Einschränkung auf STEOR-Netzpläne (STEOR steht für: Stochastic Exclusive Or). STEOR-Netzpläne stellen eine vereinfachte Version von GERT-Netzplänen dar. Sie lassen nur Knoten mit rein disjunktiver Verknüpfungslogik zu: Wenn ein Knoten eines STEOR-Netzplans mehrere Eingangskanten besitzt, so müssen diese in disjunktiver Weise ("exclusive or") verknüpft sein. Ebenso besitzt jeder Knoten mit mehreren Ausgangskanten eine disjunktive - "stochastische" - Ausgangslogik. Ausführlichere Erörterungen von STEOR-Netzplänen bieten PRITSKER (1966a), S. 20ff.; PRITSKER (1966b), S. 269ff.; PRITSKER (1966c), S. 293ff.; ZIMMERMANN, H. (1971), S. 116ff.; WHITEHOUSE (1973), S. 249ff.; NEUMANN, K. (1975b), S. 332ff. (dort als "STEO-Netzpläne" bezeichnet); NEUMANN, K. (1979), S. 45ff.; DELIVORIAS (1984), S. 68ff.; NEUMANN, K. (1990), S. 20, 56, 62ff., 80ff., 90ff. u. 176ff.; PAGNONI (1990), S. 110ff.

Da sich PAGNONI ausschließlich mit STEOR-Netzplänen befaßt, liegt kein Nachweis für ihre Behauptung vor, mit der Hilfe von Petrinetzen lasse sich jeder Sachverhalt ausdrücken, der durch einen GERT-Netzplan modelliert werden kann. Darüber hinaus handelt es sich bei STEOR-Netzplänen um eine der einfachsten Varianten der GERT-Netzpläne, die sich gerade noch mit konventionellen mathematischen Instrumenten beherrschen läßt. Die komplexeren, relativ schwer auszuwertenden GERT-Netzpläne, die keine STEOR-Netzpläne darstellen, werden von PAGNONI dagegen überhaupt nicht erfaßt.

Vgl. zur relativen Einfachheit von STEOR-Netzplänen PRITSKER (1966b), S. 269 i.V.m. S. 272f.; NEUMANN, K. (1975b), S. 332; ELMAGHRABY (1977), S. 329; NEUMANN, K. (1990), S. 56 u. 95. Umgekehrt läßt sich die Schwierigkeit, allgemeine GERT-Netzpläne zu untersuchen, an den aufwendigen Algorithmen ablesen, die von NEUMANN, K. (1979), S. 172ff., und NEUMANN, K. (1990), S. 53f. u. 111ff., erörtert werden. Sie dienen der Analyse von GERT-Netzplänen ohne spezielle STEOR-Charakteristik. In diese Richtung weisen auch die Anmerkungen bei ZIMMERMANN, H. (1971), S. 116; WHITEHOUSE (1973), S. 286; PATZAK (1975), S. 232; MOORE, L. (1976), S. 37; NEUMANN, K. (1979), S. 172 u. 233; PAGNONI (1985a), S. 133; QUICHAUD (1987), S. 308; NEUMANN, K. (1990), S. 114; DOMSCHKE (1990), S. 200; PAGNONI (1990), S. 16, 103 u. 117: Ihnen zufolge lassen sich allgemeinste GERT-Netzpläne meistens nicht mehr mit praktisch akzeptablem Ressourceneinsatz "analytisch" auswerten, sondern nur noch simulativ erforschen. Vgl. auch QUICHAUD (1987), S. 308ff. Dort wird ein neuartiger Algorithmus vorgestellt, der zwar noch nicht gestattet, allgemeine GERT-Netzpläne auszuwerten. Aber er ist auch nicht mehr auf die Auswertung der einfachen STEOR-Netzpläne beschränkt. Dieser Algorithmus erweitert STEOR-Netzpläne um Knoten mit konjunktiv verknüpften Eingangs- und deterministischen Ausgangskanten. Bemerkenswert ist vor allem, daß bereits dieser bescheidene Zuwachs an Ausdrucksmächtigkeit die Lösungsgarantie des Auswertungsalgorithmus untergehen läßt. Denn seine Anwendung führt nur noch in den meisten, aber nicht mehr notwendig in allen Fällen zur Lösung der vorgegebenen Auswertungsprobleme; vgl. QUICHAUD (1987), S. 308 u. 315. Vgl. schließlich die komplexitätstheoretisch basierten Anmerkungen zur analytischen Auswertung allgemeiner GERT-Netzpläne bei HARTMANN (1983), S. 269.

17) Strenggenommen wurden dort mehrere Konstruktionen für die Repräsentation eines atomaren Prozesses vorgelegt. Sie unterschieden sich vor allem dadurch, daß der Endzeitpunkt der Prozeßausführung entweder als frühest zulässiger oder aber als tatsächlicher Endzeitpunkt behandelt wird. In Netzplänen wird diese Unterscheidung überhaupt nicht vorgenommen. Dies unterstreicht nochmals die oben erfolgte Feststellung, daß die üblichen Netzplandefinitionen unvollständig sind. Aus der Anwendung von Netzplänen läßt sich jedoch entnehmen, daß Ausführungsverzögerungen oder -unterbrechungen von Vorgängen, die einmal begonnen worden sind, nicht zugelassen werden. Daher spielen für die Wiedergabe von (PPS-)Netzplänen nur jene Netzkonstruktionen für Petrinetze eine Rolle, in denen die tatsächlichen Endzeitpunkte der Prozeßausführungen modelliert werden.

18) Minimalfristen, deren Dauer größer als Null ist, lassen sich allerdings durch entsprechende Scheinvorgänge erfassen.

19) Die nachfolgenden Ausführungen beruhen auf LOWAS (1986b), S. 1693f. Allerdings erfolgt dort kein expliziter Bezug auf Netzpläne.

20) In einem Synthetischen Netz würde jede dieser Transitionen t_n als eine Makrotransition behandelt. Diese Makrotransition ließe sich durch ein Subnetz verfeinern, das den jeweils betroffenen Vorgang aus dem Netzplan als einen atomaren Prozeß repräsentiert. Der skalare Schaltwert $sw(t_n)$ der Transition t_n würde in der Schaltvorschrift derjenigen Starttransition berücksichtigt, die im Subnetz den Anfangszeitpunkt der Vorgangsausführung wiedergibt.

- 21) Der Preis dieser Vereinfachung liegt allerdings darin, daß die Anschauungsform "Zeit" - im Gegensatz zu Zeitnetzen - nur in bezug auf Normalfolgen erfaßt werden kann. Maximalfristen oder von Null verschiedene Minimalfristen zwischen dem Ausführungsende eines Vorgangs und dem Ausführungsbeginn eines seiner Folgevorgänge lassen sich daher ebensowenig berücksichtigen wie alle Präzedenzbeziehungen, die keine Normalfolgen darstellen. Es ist jedoch auch keiner dieser Zeitaspekte erforderlich, um die oben vorausgesetzten einfachen Netzpläne vollständig wiederzugeben. Andere Netzpläne, in denen diese Zeitaspekte eine Rolle spielen, werden dagegen durch die zuvor beschriebenen Netzkonstrukte aus erweiterten Synthetischen Netzen abgedeckt.
- 22) Dies gilt übrigens auch dann noch, wenn die Vorgangsdauern des zugrundeliegenden Netzplans nicht - wie es oben der Fall war - auf Schaltwerte, sondern auf Schaltdauern der vorgangsrepräsentierenden Transitionen abgebildet werden.
- 23) Darüber hinaus wird stets vorausgesetzt, daß das netzplanrepräsentierende Netz sachlich und formal konsistent ist. Auf diese Weise ist sichergestellt, daß mindestens ein optimaler Schaltprozeß existiert.
- 24) Vgl. LOWAS (1986b), S. 1693f.
- 25) Es handelt sich um einen finalen, (sachlich und) formal zulässigen, nicht-dominierten Schaltprozeß. Da das hier berücksichtigte Formalzielsystem nur aus genau einem Formalziel - der zu minimierenden Projektdauer - besteht, fällt dieser nicht-dominierte Schaltprozeß mit einem projektdauerminimierenden Schaltprozeß zusammen. Vgl. zur Optimierungsqualität der oben angesprochenen Auswertungstechnik LOWAS (1986b), S. 1694.
- 26) Vgl. zu den Möglichkeiten, im Rahmen des Petrinetz-Konzepts Optimierungsaufgaben zu erfüllen, die Erläuterungen zur sw*-Finalität von Netzmodellen. Vgl. ebenso die Ausführungen zur Konstruktion und Auswertung von Optimierungsnetzen.
- 27) In der Ergänzung des Ressourcenaspekts liegt keine Einschränkung der Möglichkeit, einfache Netzpläne in Stelle/Transition-Netze zu transformieren. Falls für einen Netzplan überhaupt keine Ressourcen berücksichtigt worden sind, so entspricht dies einer Ressourcensituation, in der keine Ressourcenart knapp ist. Diese Situation läßt sich dadurch erfassen, daß eine beliebige Ressourcenart als eine "Dummy-Ressource" eingeführt wird. Von ihr stehen unbeschränkt viele Einheiten zur Verfügung.
- 28) Der Fall $K = \omega$ dient der Erfassung solcher Ressourcensituationen, in denen keine Ressourcenart knapp ist. Vgl. dazu die voranstehende Anmerkung.
- 29) Die gleiche Ressourcensituation liegt auch im Bereich der Automatischen Informationsverarbeitung vor, wenn es gilt, Verarbeitungsjobs (Vorgänge) auf einem Multiprozessorsystem mit K Prozessoren so einzuplanen, daß jeder Prozessor zu jedem Zeitpunkt höchstens einen Job ausführt. Auf diese Planungsaufgabe hat sich auch LOWAS (1986b), S. 1692ff., bezogen. Eine ausführliche und vertiefende Behandlung dieses Zuordnungsproblems findet sich bei DREXL (1990a), S. 345ff.
- 30) Auf eine größere Modellierungsfähigkeit des Petrinetz-Konzepts weist auch ROSENSTENGEL (1982), S. 49, in allgemeiner Weise hin: Es existierten Petrinetze (Synchronisationsnetze), die nicht in Netzpläne "transformiert" werden könnten. Darauf wurde bereits in einer früheren Anmerkung hingewiesen. Dort wurde jedoch auch schon dargelegt, warum der Verf. die Einlassung von ROSENSTENGEL und WINAND als unbefriedigend erachtet.
- 31) Vgl. GEWALD (1972), S. 18ff., 33ff. u. 80ff., insbesondere S. 37.
- 32) Die Anzahl unterschiedlicher Markenarten wurde in Synthetischen Netzen nicht begrenzt.
- 33) Beispielsweise kann ein solcher Auswertungsalgorithmus auf der Lösung eines Modells der Linearen Optimierungsrechnung basieren, in dem die eine erfaßte Ressourcenart durch eine Restriktionsklasse berücksichtigt wird. In diesem Fall läßt sich auf mehrere Ressourcenarten dadurch übergehen, daß entsprechend viele Restriktionsklassen gebildet werden. An der Struktur des Auswertungsalgorithmus ändert diese Vervielfachung der Restriktionsklassen nichts. Ein Lineares Optimierungsmodell, in dem sich ein CPM-Netzplan mit mehreren knappen Ressourcenarten erfassen läßt, findet sich z.B. bei GEWALD (1972), S. 52ff. Vgl. darüber hinaus zur Berücksichtigung mehrerer knapper Kapazitäten im Rahmen der Netzplantechnik WIEST (1964), S. 397ff.; ZIMMERMANN, H. (1971), S. 127ff.; GEWALD (1972), S. 37ff., und SCHWARZE, J. (1990), S. 226ff.
- 34) Allerdings spricht dieser Umstand zugunsten einer höheren Modellierungsgüte des Petrinetz-Konzepts. Dies gilt zumindest dann, wenn der Explizierungsgrad der Ausdrucksmächtigkeit eines Modellierungskonzepts als eine Determinante seiner Modellierungsgüte angesehen wird.
- 35) Bearbeitungsvorgänge werden hier als pars pro toto für alle Vorgänge angeführt, die sich bei Abwicklung eines Produktionsauftrags auf ein auftragszugehöriges Werkstück erstrecken können. Dazu gehören beispielsweise auch Transport- und Ein- oder Auslagerungsvorgänge.

36) Es ist bemerkenswert, daß die Netzplantechnik trotz ihrer Spezialisierung auf die Modellierung zeitbezogener Sachverhalte eine bestimmte Zeitkategorie, die Wartezeiten, nicht zu erfassen vermag. Der Grund hierfür liegt in einer konzeptionellen Eigenart der Netzplantechnik: Es werden ausschließlich Vorgänge oder Ereignisse modelliert, deren Ausführungen bzw. Geschehnisse jeweils zu einer *Zustandsveränderung* der betroffenen Objekte führen. Hierdurch versperrt sich der Zugang zur Modellierung von Warteprozessen, die zu *keiner* Objektveränderung beitragen.

37) Diese Erkenntnis erklärt nachträglich, warum in der Fallstudie so großer Wert auf die präzise und detaillierte Modellierung von Kapitalbindungskosten gelegt wurde.

38) Deadlock-Situationen werden im Kontext des Petrinetz-Konzepts präziser definiert, als es hier der Fall ist. Die hier benutzte umgangssprachliche Umschreibung von Deadlocks reicht aber aus, um eine Lücke in der Ausdrucksmächtigkeit von Netzplänen aufzuzeigen. Darüber hinaus dienen Deadlock-Situationen nur als besonders anschauliches Beispiel für dynamische Modelleigenschaften. Die größere Modellierungsfähigkeit des Petrinetz-Konzepts erstreckt sich auch auf andere Aspekte der Netzdynamik, wie z.B. die Lebendigkeit oder Livelockfreiheit von Netzmodellen. Ihre Analyse im Rahmen des Petrinetz-Konzepts wurde bereits dargelegt. Diese dynamischen Modelleigenschaften lassen sich dagegen seitens der Netzplantechnik ebensowenig ausdrücken wie Deadlock-Situationen. Es wird aber darauf verzichtet, dies näher auszuführen.

39) Strenggenommen wird hier die Modellierungsummöglichkeit lediglich behauptet. Denn konstruktiv nachweisen läßt sich nur die *Möglichkeit* einer Modellierung, indem ein entsprechender Netzplan vorgelegt werden. Der Verf. sieht aber keinen Ansatz, einen Netzplan zu präsentieren, in dem eine Deadlock-Situation der oben skizzierten Art modelliert würde. Allerdings beugt er sich gern einem konstruktiven Gegenbeweis.

40) Dieser Vorzug des Petrinetz-Konzepts klingt - obgleich in leicht divergierender Formulierung - auch bei ROSENSTENGEL (1982), S. 49, an. Dort wird ebenfalls der Gebrauch von Marken als wesentlicher Grund für die größere Modellierungsfähigkeit des Petrinetz-Konzepts herausgestellt. Darüber hinaus wird dort eine Brücke zwischen Netzmarkierungen einerseits und der Fähigkeit zur Modellierung dynamischer Sachverhalte andererseits geschlagen. Dies entspricht der Feststellung, die größere Ausdrucksmächtigkeit des Petrinetz-Konzepts gelte nicht nur für Deadlock-Situationen, sondern auch für andere dynamische Modelleigenschaften.

41) Die negativ-bedingten Aktionsanweisungen von TURING-Automaten lassen sich ebenso benutzen, um eine spezielle Ausprägung von Inspektions- und Instandsetzungsaktivitäten zu modellieren. Es handelt sich um Aktivitäten, die erst dann eingeleitet werden, wenn eine Bearbeitungsstation *nicht* mehr betriebsbereit ist. Falls die bedingte Aktivitätseinleitung ohne Rückgriff auf Komplementärkonstruktionen modelliert werden soll, muß die Möglichkeit bestehen, negativ-bedingte Aktionsanweisungen auszudrücken.

8.3.1.3.2 Aspekte der Modellierungsgüte

In diesem Kapitel wird ausschließlich die Repräsentation von Sachverhalten betrachtet, die sowohl von Netzplänen als auch von Petrinetzen geleistet werden kann. Es wird untersucht, mit welcher Qualität sich diese Sachverhalte modellieren lassen. Dabei stehen zeitbezogene Einflußgrößen und Entscheidungsalternativen im Vordergrund. Auf andere Repräsentationsaufgaben wird nur in exemplarischer Weise und weniger intensiv eingegangen.

Bei der Repräsentation zeitbezogener Einflußgrößen erweist sich die Netzplantechnik überlegen. Netzpläne sind von vornherein auf die Erfassung und Auswertung temporaler Determinanten von Modellierungsobjekten zugeschnitten. Daraus resultiert ein Spezialisierungsvorteil bei der Modellierung aller Objektaspekte, die in der Anschauungsform "Zeit" wahrgenommen werden. Dieser Spezialisierungsvorteil wirkt sich vor allem auf zwei Ebenen aus. Einerseits lassen sich temporale Einflußgrößen in Netzplänen als Ereigniszeitpunkte, Vorgangsdauern oder Fristen unmittelbar und mit geringem formalen Aufwand ausdrücken. Andererseits kommt die zeitbezogene Strukturierung eines Netzplans den kognitiven Wahrnehmungsmustern der meisten Modellierungsträger entgegen. Denn die Anwender eines Modellierungskonzepts sind an temporale Denkweisen zumeist derart gewöhnt, daß sie diese als "natürlich" oder "zwangsläufig" empfinden¹⁾. Dies gilt zumindest für den hier interessierenden Bereich der Modellierung von Prozeßkoordinierungen in Produktionssystemen. Aus dieser Perspektive leistet die Netzplantechnik einen bemerkenswerten Beitrag zur kognitiven Adäquanz²⁾ von Modellierungskonzepten.

Das Petrinetz-Konzept beruht dagegen zunächst auf einem atemporalen, rein kausalen Ansatz. Damit entspricht es nicht der "natürlichen", zeitbezogenen Konzeptualisierung von Prozeßkoordinierungen. Folglich erreicht das Petrinetz-Konzept bei der Modellierung temporaler Einflußgrößen nicht die Modellierungsgüte der Netzplantechnik³⁾. Diese qualitative Unterlegenheit kann sich in mehrfacher Hinsicht auswirken. Zunächst besteht die Gefahr, daß zahlreiche Modellierungsträger den Umgang mit Petrinetzen reserviert gegenüberstehen werden. Es ist zu befürchten, daß sie sich wegen des fehlenden unmittelbaren Zeitbezugs irritiert fühlen⁴⁾. Zwar wurde in dieser Arbeit ausführlicher aufgezeigt, wie sich Petrinetze so zu Zeitnetzen erweitern lassen, daß sie alle interessanten temporalen Einflußgrößen repräsentieren können. Aber die dafür erforderlichen Netzkonstrukte bereiten einen nicht zu vernachlässigenden Aufwand. Darüber hinaus werden diese Konstruktionen von etlichen Modellierungsträgern, die mit dem Petrinetz-Konzept nicht intim vertraut sind, als kompliziert oder intransparent empfunden werden. Die einfachen, übersichtlichen Repräsentationen zeitbezogener Einflußgrößen in Netzplänen bleiben außerhalb der Modellierungsreichweite von Petrinetzen.

Allerdings schlägt der temporale Spezialisierungsvorteil der Netzplantechnik in einen korrespondierenden Nachteil um, wenn die Repräsentation von Einflußgrößen in den Vordergrund rückt, die nicht unmittelbar auf die Anschauungsform "Zeit" bezogen sind. Dann muß in Netzplänen zu Hilfskonstruktionen gegriffen werden, um die betroffenen Sachverhalte zunächst in temporaler Weise zu rekonstruieren. Erst danach lassen sie sich in Netzplänen selbst wiedergeben. Die erforderlichen Hilfskonstruktionen können sich ebenso aufwendig, kompliziert oder intransparent erweisen wie die zuvor kritisierten Konstrukte von Zeitnetzen. Das Petrinetz-Konzept kann dagegen bei der Repräsentation von atemporalen Einflußgrößen seine Stärken entfalten. Dann wirkt sich positiv aus, daß eine Spezialisierung auf zeitbezogene Problemstrukturierungen vermieden wird. Statt dessen kann z.B. auf die kausalen oder modallogischen Eigenarten des Petrinetz-Konzept zurückgegriffen werden, um die atemporalen Aspekte eines Modellierungsobjekts nun in "natürlicher" Weise zu repräsentieren.

Der Spezialisierungsnachteil der Netzplantechnik läßt sich anhand eines einfachen Beispiels verdeutlichen. Es betrifft die Modellierung von Vorgängen, die während ihrer Ausführung unterbrochen werden können. Dabei interessieren nur solche Ausführungsunterbrechungen, die nicht

von vornherein geplant sind, sondern erst bei der Ausführung eines Produktionsplans unerwartet eintreten⁵⁾. Beispielsweise läßt sich an Bearbeitungsvorgänge denken, die dem Risiko von Produktionsstörungen ausgesetzt sind. Es bereitet erhebliche Schwierigkeiten, solche unterbrechbaren Vorgänge in Netzplänen adäquat zu repräsentieren. Zwar läßt sich daran denken, einen Vorgang in mindestens zwei Teilvorgänge aufzuspalten⁶⁾. Die Zeitpunkte, in denen das Ausführungsende eines vorangehenden und der Ausführungsanfang eines unmittelbar nachfolgenden Teilvorgangs zusammenfallen, können dann als Unterbrechungszeitpunkte der Vorgangsausführung betrachtet werden. Insoweit liegt eine zeitbezogene Konstruktion vor, mit deren Hilfe sich ein unterbrechbarer Vorgang in einem Netzplan repräsentieren läßt. Aber diese Hilfskonstruktion erweist sich gerade aufgrund ihres Zeitbezugs als höchst problematisch. Denn die potentielle Unterbrechung der Vorgangsausführung stellt ein Ereignis dar, das sich durch eine doppelte Ungewißheit auszeichnet. Erstens ist ungewiß, ob die Ausführungsunterbrechung überhaupt eintritt. Selbst wenn hypothetisch angenommen wird, daß eine Unterbrechung geschieht, so bleibt doch zweitens der Zeitpunkt dieses Geschehnisses unbestimmt. Daher können den Teilvorgängen, die zur Repräsentation eines unterbrechbaren Vorgangs eingeführt worden sind, keine wohlbestimmten Ausführungsdauern zugeordnet werden.

Zwar kann diese Schwierigkeit überwunden werden, indem die Teilvorgängen stochastische Ausführungsdauern erhalten. Dazu bieten sich z.B. PERT- oder GERT-Netzpläne an. Aber auf diese Weise erfolgt nur eine Scheinlösung des Repräsentationsproblems. Zunächst erscheint es fragwürdig, im Falle von Produktionsstörungen mit stochastischen Ausführungsdauern zu arbeiten. Denn solche Störungen geschehen im betrieblichen Alltag derart regellos, daß oftmals keine seriösen Schätzungen der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Störungen möglich sind. Diese Eintrittswahrscheinlichkeiten müßten aber bekannt sein, um die Dichtefunktionen der stochastischen Ausführungsdauern jener Teilvorgänge zu bestimmen, die für die Rekonstruktion eines unterbrechbaren Vorgangs eingeführt worden sind⁷⁾. Selbst wenn die voranstehenden Zweifel an der Kenntnis empirisch valider Dichtefunktionen nicht geteilt werden, bleibt ein gravierenderer Mangel bestehen: Die Teilvorgänge mit ihren stochastischen Ausführungsdauern stellen komplizierte, undurchsichtige Artefakte dar. Sie leisten keine "natürliche" Repräsentation des simplen realen Phänomens, daß die Ausführung eines Vorgangs durch eine Störung unterbrochen werden kann.

Dagegen erlaubt das Petrinetz-Konzept, unterbrechbare Vorgänge auf einfache und übersichtliche Weise zu modellieren. Dazu kann auf die beiden Netzkonstrukte für die Repräsentation eines atomaren Prozesses zurückgegriffen werden, die in Abb. 139 u. 140 vorgestellt wurden⁸⁾. Die Prozeßrepräsentation braucht in keiner Weise verändert zu werden, um die Möglichkeit von Ausführungsunterbrechungen einzubeziehen. Darüber hinaus sind anspruchsvollere Konstruktionen möglich, um in Petrinetzen alternative Reaktionen auf störungsbedingte Unterbrechungen zu modellieren. Dies wurde in der Fallstudie ausführlicher demonstriert.

Die Repräsentation unterbrechbarer Vorgänge stellt nur einen Sonderfall dar, in dem sich die fehlende Zeitspezialisierung des Petrinetz-Konzepts positiv auszuwirken vermag. Daher könnte die Ansicht vertreten werden, die Vorzüge der Netzplantechnik bei der Repräsentation temporaler Einflußgrößen deckten die "meisten" oder die "wichtigsten" Aspekte bei der Modellierung von Prozeßkoordinierungen in Produktionssystemen ab. Folglich besäßen Netzpläne gegenüber Petrinetzen in diesem Bereich eine "in der Regel" höhere Modellierungsgüte. Dieses Urteil wäre aber vorschnell getroffen. Denn die Koordinierung von Produktionsprozessen umfaßt neben den zeitbezogenen Prozeßdeterminanten einen zweiten wesentlichen Aspekt: Es handelt sich um die Aufgabe, mit der Hilfe eines Koordinierungsmodells zwischen alternativen Koordinierungsoptionen auszuwählen⁹⁾. Deshalb spielt die Repräsentation von Entscheidungsalternativen für die hier behandelte Thematik eine ebenso bedeutsame Rolle wie die Erfassung der Anschauungsform "Zeit". Daher wird der Modellierung von Entscheidungen im folgenden größere Aufmerksamkeit gewidmet.

Des öfteren wird behauptet, bestimmte Varianten der Netzplantechnik - wie z.B. GAN-¹⁰ und GERT-Netzpläne - stellen "Entscheidungsnetzpläne" dar¹¹). Tatsächlich trifft diese Qualifizierung aber nur auf einige wenige "exotische" Varianten der Netzplantechnik zu¹²). Es handelt sich dabei vor allem¹³) um DCPM-Netzpläne¹⁴). Diese Ansätze leiden aber unter dem Nachteil, daß ihre Auswertungsalgorithmen unübersichtlich und ressourcenintensiv¹⁵) ausfallen. Daher vermochten sie sich in der produktionswirtschaftlichen Modellierungspraxis nicht durchzusetzen¹⁶). Statt dessen dominieren "Entscheidungsnetzpläne", die dem Anspruch ihrer Bezeichnung nicht gerecht werden¹⁷). Denn solche Pseudo-Entscheidungsnetzpläne erweisen sich außerstande, Entscheidungsalternativen zu repräsentieren, die einem Modellierungsträger bei der Koordinierung von Produktionsprozessen offenstehen. Davon sind insbesondere die oben erwähnten GAN- und GERT-Netzpläne betroffen¹⁸).

Ein Pseudo-Entscheidungsnetzplan enthält mindestens einen Knoten mit mehreren Ausgangskanten, die nicht in deterministischer Weise miteinander verknüpft sind. Ein solcher Knoten/Kanten-Komplex kann grundsätzlich benutzt werden, um denjenigen Spielraum¹⁹) zu modellieren, der einem Entscheidungsträger in einer Produktionssituation offensteht²⁰). Zu diesem Zweck müssen zwei Bedingungen erfüllt sein²¹). Erstens sind den Ausgangskanten des Knotens diejenigen Entscheidungsalternativen zuzuordnen, die im betrachteten Entscheidungsspielraum gemeinsam zur Auswahl stehen und sich gegenseitig ausschließen²²). Diese erste Anforderung ist unproblematisch. Sie wird von allen Entscheidungsnetzplänen erfüllt. Die Ausgangskanten des betrachteten Knotens unterliegen dabei einer disjunktiven Verknüpfungslogik. Eine adäquate Repräsentation von Entscheidungsalternativen liegt aber erst dann vor, wenn eine zweite Bedingung ebenso zutrifft: Es muß möglich sein, für jede Alternative aus einem Entscheidungsspielraum exakt diejenigen Konsequenzen zu ermitteln, die von einer Entscheidung zugunsten der Alternative hervorgerufen würden. Denn nur so läßt sich eine eindeutige²³) und rationale²⁴) Auswahl zwischen den Alternativen treffen²⁵). Diese zweite Bedingung erscheint prima facie trivial. Bei genauerem Hinsehen erweist sie sich jedoch als höchst problematisch. Denn sie wird von Pseudo-Entscheidungsnetzplänen grundsätzlich verletzt.

Der Modellierungsdefekt von Pseudo-Entscheidungsnetzplänen besteht also darin, daß sie nicht in der Lage sind, die Entscheidungskonsequenzen *einzelner* Entscheidungsalternativen exakt wiederzugeben. Insofern leisten sie keine adäquate Repräsentation von Entscheidungsalternativen²⁶). Statt dessen erlauben sie nur, Informationen über Amalgame zu ermitteln, in denen die Entscheidungskonsequenzen von *mehreren* Entscheidungsalternativen zusammengefaßt sind. Dies verdeutlichen die typischen Analyseformen von Pseudo-Entscheidungsnetzplänen: Beispielsweise werden *durchschnittliche* Durchlaufzeiten für einen modellierten Produktionsauftrag ermittelt²⁷). Oder es wird der *Anteil* von Ausschußwerkstücken bestimmt, der bei einem störungsanfälligen Produktionsprozeß erwartet wird²⁸). Beide Fälle vertreten nur die eine Fülle ähnlicher Durchschnitts- oder Anteilsuntersuchungen²⁹). In solche Durchschnitts- oder Anteilsgrößen geht jeweils eine Vielzahl von Entscheidungsalternativen ein, die sich gegenseitig ausschließen. Anstatt die Entscheidungskonsequenzen dieser Alternativen separat auszuweisen, werden die Konsequenzen von vornherein aggregiert.

Die Aggregation erfolgt, indem jedem Spielraum eine Wahrscheinlichkeitsverteilung überlagert wird³⁰). Diese stochastische Überformung von Entscheidungsspielräumen ist *das* Charakteristikum aller Pseudo-Entscheidungsnetzpläne³¹). Sie weist jeder spielraumzugehörigen Entscheidungsalternative eine Eintrittswahrscheinlichkeit zu³²). Dadurch wird der oben festgestellte Modellierungsdefekt aller Pseudo-Entscheidungsnetzpläne verursacht³³). Denn die Konsequenzen einzelner Entscheidungsalternativen werden sofort mit ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten gewichtet. Darüber hinaus werden sie mit den ebenso stochastisch überlagerten Konsequenzen aller anderen Entscheidungsalternativen aus demselben Spielraum verrechnet. Nach dieser Überlagerung und Verrechnung sind die Informationen über die Entscheidungskonsequenzen der einzelnen Entscheidungsalternativen untergegangen. Es steht nur noch die Amalgaminformation über das Aggregationsergebnis zur Verfügung³⁴). Diesem systematischen Informationsverlust

werden alle Entscheidungsspielräume der jeweils modellierten Koordinierungsprobleme unterworfen. Am Ende liegen nur noch die oben erwähnten, hochgradig verdichteten, stochastisch ermittelten Durchschnitts- oder Anteilsgrößen vor. Diese Ergebnisse der Auswertung eines Entscheidungsnetzplans entsprechen nicht mehr dem vorausgesetzten Modellierungszweck, eine eindeutige Auswahl zwischen Entscheidungsalternativen zu treffen. Denn es erfolgt keine echte Entscheidung zugunsten einer einzelnen Alternative³⁵⁾. Die Durchschnitts- oder Anteilsgrößen geben keinen Hinweis darauf, *welche* der modellierten Entscheidungsalternativen - aufgrund ihrer ermittelten und bewerteten Konsequenzen - zu bevorzugen sei³⁶⁾. Es liegen also keine *Entscheidungsmodelle* vor, anhand derer ein Entscheidungsträger alternativer Entscheidungsoptionen gegeneinander abwägen könnte. Statt dessen handelt es sich bei Pseudo-Entscheidungsnetzplänen lediglich um *Ermittlungsmodelle* für stochastische Durchschnitts- oder Anteilsgrößen³⁷⁾.

Es ist offensichtlich, daß auf diese Weise die Konsequenzen einzelner Entscheidungsalternativen in einem Pseudo-Entscheidungsnetzplan nicht erfaßt werden können. A fortiori ist es auch nicht möglich, aus den Alternativen eines Entscheidungsspielraums genau eine aufgrund ihrer Entscheidungskonsequenzen auszuwählen. Folglich leisten Pseudo-Entscheidungsnetzpläne keine adäquate Repräsentation von Entscheidungsalternativen³⁸⁾. Daher überrascht es nicht, in der Literatur, die sich Pseudo-Entscheidungsnetzplänen widmet, keine Modellierungen von echten Auswahlproblemen zu finden.

Entgegengesetzte Verhältnisse liegen im Rahmen des Petrinetz-Konzepts vor. Dort können Entscheidungsalternativen als konfliktionär aktivierte Transitionen und deren Schaltakte³⁹⁾ modelliert werden. Durch die Erreichbarkeitsanalyse eines Netzmodells ist es möglich, die Konsequenzen jeder einzelnen Entscheidungsalternative separat zu ermitteln. Daher lassen Petrinetze eine adäquate Repräsentation⁴⁰⁾ von Entscheidungsalternativen zu. Dies wird besonders deutlich bei der Erreichbarkeitsanalyse von Optimierungsnetzen. Sie sind von vornherein so konstruiert, daß ein Entscheidungsträger mit ihrer Hilfe genau eine, mehrere oder sogar alle derjenigen Entscheidungsalternativen zu ermitteln vermag, die sein Zielsystem optimal erfüllen.

Petrinetze weisen daher gegenüber Pseudo-Entscheidungsnetzplänen eine deutlich höhere Modellierungsgüte auf. Zwar lassen sich in beiden Netzvarianten Entscheidungsalternativen darstellen. Aber nur Petrinetze leisten eine *adäquate* Alternativenrepräsentation. Allerdings wird betont, daß diese unterschiedliche Qualität der Repräsentation von Entscheidungsalternativen nur im Hinblick auf Pseudo-Entscheidungsnetzpläne gilt. Die früher erwähnten echten Entscheidungsnetzpläne erfüllen ebenso wie Petrinetze die Forderung nach adäquater Alternativenrepräsentation. Jedoch bleiben diese echten Entscheidungsnetzpläne auf die Rolle "exotischer" Randerscheinungen beschränkt. Sie gehören nicht zu den typischen, derzeit dominierenden Anwendungen der Netzplantechnik auf Entscheidungsprobleme.

Voranstehend wurde aufgezeigt, daß die Modellierungsgüten von Netzplantechnik und Petrinetz-Konzept erheblich auseinanderklaffen, wenn die Repräsentationen von zeitbezogenen Einflußgrößen und von Entscheidungsalternativen betrachtet werden. Diese Diskrepanzen werden hier als gravierend eingestuft, weil die beiden betroffenen Repräsentationsaspekte bei der Modellierung von Prozeßkoordinierungen in Produktionssystemen eine herausragende Rolle spielen. Darüber hinaus lassen sich weitere Unterschiede in den Modellierungsgüten von Netzplänen und Petrinetzen feststellen. Diese zusätzlichen Differenzen besitzen aber für die hier behandelte Thematik geringere Bedeutung. Denn sie betreffen entweder nur Spezialfälle⁴¹⁾. Oder sie hängen von Gütekriterien ab, über deren Relevanz sich streiten ließe⁴²⁾. Daher wird auf weiterführende Differenzen zwischen den Modellierungsgüten von Netzplantechnik und Petrinetz-Konzept nur noch knapp hingewiesen.

Wenn bei der Modellierung von Produktionsprozessen Kapazitätsrestriktionen beachtet werden müssen, erfordert die Netzplantechnik eine spezielle Kapazitätsplanung⁴³). Dabei tritt oftmals der Fall ein, daß ein ursprünglich vorliegender Netzplan nachträglich um zusätzliche Anordnungsbeziehungen erweitert werden muß⁴⁴). Diese Anordnungsbeziehungen werden zwar im betroffenen Netzplan formal als Präzedenzbeziehungen zwischen Vorgängen behandelt. Tatsächlich repräsentieren sie aber keine Präzedenzbeziehung aus dem zugrundeliegenden Produktionsprozeß. Statt dessen handelt es sich bei den ergänzten Anordnungsbeziehungen um Artefakte⁴⁵). Sie sind im Rahmen der Netzplantechnik bei Kapazitätsplanungen erforderlich, um die Ausführungen einzelner Vorgänge so weit zeitlich in die Zukunft zu verschieben, daß alle Kapazitätsrestriktionen eingehalten werden⁴⁶). Dabei wird die Knappheit einer Ressource, die in der Regel *zeitunabhängig* definiert ist⁴⁷), in eine *zeitbezogene* Präzedenzbeziehung transformiert. Die zusätzlichen Anordnungsbeziehungen leisten schon als Artefakte keine "natürliche" Modellierung knapper Kapazitäten. Hinzu kommt aber noch ihre Transformation atemporaler in temporale Größen. Sie widerspricht in besonders krasser Weise den intuitiven Vorstellungen von einer "adäquaten" Repräsentation knapper Kapazitäten. Bei Petrinetzen existieren solche Repräsentationsprobleme nicht. Dort können knappe Kapazitäten auf "natürliche" Art erfaßt werden. Dafür bieten sich sowohl begrenzte Anzahlen vorhandener Markenkopien als auch beschränkte Markenkapazitäten von Stellen an.

Die zuvor geäußerte Kritik an den Artefakten zusätzlicher Präzedenzbeziehungen läßt sich an einem speziellen Koordinierungsproblem verdeutlichen⁴⁸). Es betrifft zwei Industrieroboter, die im selben Arbeitsraum operieren. Jeder Industrieroboter arbeitet an einer eigenständigen Teilaufgabe, die von der Teilaufgabe des jeweils anderen Industrieroboters kausal unabhängig ist. Dennoch können sich die beiden Industrieroboter wegen ihres gemeinsamen Zugriffs auf die knappe Ressource "Arbeitsraum" gegenseitig behindern⁴⁹). Daher müssen die Effektoroperationen der beiden Industrieroboter so aufeinander abgestimmt werden, daß sie kollisionsfrei erfolgen. Die wechselseitige Koordinierung der beiden Roboter läßt sich zwar im Prinzip mit Hilfe der Netzplantechnik verwirklichen. Dann müßten aber für jede eingeplante Effektoroperation und für alle betroffenen Volumenelemente des Arbeitsraums die zusätzlichen Präzedenzbeziehungen eingeführt werden, daß die Effektoroperationen des anderen Industrieroboter in den jeweils selben Volumenelementen erst zeitlich später erfolgen dürfen. Diese theoretische Denkmöglichkeit erweist sich aber für die praktische Bewältigung solcher Koordinierungsprobleme vollkommen untauglich⁵⁰). Daher gilt die Aufgabe, die Effektoroperationen von mehreren Industrierobotern kollisionsfrei zu koordinieren, im Rahmen der Netzplantechnik als unerfüllbar⁵¹). Dagegen bereitet es keine Schwierigkeiten, mit der Hilfe von Petrinetzen dieselbe Koordinierungsaufgabe zu modellieren und zu erfüllen⁵²). Zu diesem Zweck reicht es aus, die Effektoroperationen der Industrieroboter durch Transitionen so zu modellieren, daß die Transitionen im Falle einer Effektorkollision konfliktionär aktiviert sind⁵³). Dann sorgt die Schaltregel von Petrinetzen dafür, daß die beiden Industrieroboter mit ihren Effektoren nicht zusammenstoßen können.

Eine weitere Eigenart der Netzplantechnik betrifft die Auswertung von Netzplänen. Auf denselben Netzplan müssen verschiedenartige Auswertungsalgorithmen angewendet werden je nachdem, ob eine Termin-, eine Kapazitäts- oder eine Kostenplanung angestrebt werden⁵⁴). Seitens des Petrinetz-Konzepts lassen sich dagegen Termine, Ressourcen und Kosten in einheitlicher Weise durch Markenattribute erfassen. Auswertungsalgorithmen der Erreichbarkeitsanalyse nehmen nur das eine formale Objekt "Markenattribut" zur Kenntnis, nicht aber dessen materielle Interpretation als Termin-, Ressourcen- oder Kostenangabe. Daher reicht ein Auswertungsalgorithmus aus, um für Netzmodelle, die auf Petrinetzen beruhen, kombinierte Termin-, Kapazitäts- und Kostenplanungen auszuführen⁵⁵). Sofern die Homogenität von Auswertungsrechnungen als ein Gütekriterium akzeptiert wird⁵⁶), erweisen sich Petrinetze auch in dieser Hinsicht gegenüber Netzplänen als qualitativ überlegen.

Darüber hinaus wird die Modellierungsgüte des Petrinetz-Konzepts dadurch erhöht, daß es sich bei den Markenattributen um ein prinzipiell offenes Konzept handelt⁵⁷⁾. Daher können die Attributtupel von Marken ohne Schwierigkeiten um zusätzliche Attribute erweitert werden, die sich nach dem jeweils verfolgten Auswertungszweck richten. Der Auswertungsalgorithmus für die Erreichbarkeitsgraphen von Petrinetzen braucht dabei nicht verändert zu werden, weil er weder von der Bedeutung noch von der Anzahl der auszuwertenden Markenattribute abhängt. Auf diese Weise läßt sich z.B. als zusätzliches und neuartiges Markenattribut die Einflußgröße "Zahlungswirksamkeit" einführen. Hierdurch wird eine kombinierte Kosten- und Liquiditätsplanung ermöglicht. Im Rahmen der Netzplantechnik existiert eine derart problemlose Erweiterung um neuartige Auswertungszwecke nicht⁵⁸⁾.

Das Petrinetz-Konzept läßt auch dann qualitative Vorzüge gegenüber der Netzplantechnik erkennen, wenn horizontal oder vertikal gegliederte Modellierungen erwünscht sind. Ein horizontal gegliedertes Modell zeichnet sich dadurch aus, daß es aus mehreren gleichgeordneten Modulen zusammengesetzt ist. Ein Modell liegt in vertikal gegliederter Form vor, wenn es das Modellierungsobjekt durch Verfeinerungen oder Vergrößerungen auf mehreren, hierarchisch angeordneten Ebenen wiedergibt. Im Rahmen des Petrinetz-Konzepts steht eine breite Palette von Strategien zur Verfügung, um horizontal oder vertikal gegliederte Netzmodelle zu gestalten. Dies wurde anhand der Fallstudie, die sich mit der Modellierung eines Flexiblen Fertigungssystems befaßte, ausführlicher dargelegt⁵⁹⁾. In horizontaler Hinsicht wurden Netzmodule konstruiert und über Synchronisationsstellen miteinander integriert. Die vertikale Dimension wurde durch Modulverfeinerungen und -vergrößerungen abgedeckt.

Mit Netzplänen können zwar durchaus auch gegliederte Modelle entworfen werden. Aber die praktische Anwendung von horizontal oder vertikal gegliederten Netzplänen leidet unter mehreren Einschränkungen, die den Modellierungskomfort deutlich mindern. Daher verwundert es nicht, daß die meisten Modellierungen, die in der Literatur zur Netzplantechnik dokumentiert sind, auf homogene⁶⁰⁾ und flache⁶¹⁾ Netzpläne beschränkt bleiben.

Dagegen liegen nur wenige Ansätze vor, um Netzpläne durch eine modulare Zerlegung horizontal zu gliedern⁶²⁾. Dies wäre jedoch wünschenswert. Vor allem wird dabei an die Simultanplanung von mehreren, wechselseitig voneinander abhängenden⁶³⁾ Projekten gedacht. Es liegt nahe, jedes einzelne Projekt zunächst mit der Hilfe eines konventionellen Netzplans zu modellieren. Danach werden die projektspezifischen Netzpläne in einen umfassenden Multiprojekt-Netzplan als dessen Module eingebracht. Die wesentliche Schwierigkeit besteht darin, im Multiprojekt-Netzplan die wechselseitige Projektabhängigkeit korrekt zu erfassen. Besondere Probleme bereitet dabei, die Zugriffe mehrerer Projekte auf gemeinsam benötigte, aber knappe Ressourcen zu koordinieren⁶⁴⁾. Für den Zweck der Multiprojektplanung wurde z.B. die Variante der RAMPS-Netzpläne⁶⁵⁾ konzipiert. Leider führt sie zu einer derart gravierenden Verkomplizierung der Modellkonstruktion und -auswertung, daß sich RAMPS-Netzpläne in der Praxis nicht durchzusetzen vermochten⁶⁶⁾.

Für Petrinetze bereitet dagegen die Konstruktion und Koordinierung von projektspezifischen Netzmodulen keine besonderen Schwierigkeiten. Insbesondere lassen sich konfliktionäre Zugriffe auf knappe Ressourcen unmittelbar repräsentieren und bewältigen. Sie können durch konfliktionär aktivierte Transitionen erfaßt werden, die um Markenkopien auf gemeinsamen Eingangsstellen oder um freie Markenskapazitäten auf gemeinsamen Ausgangsstellen konkurrieren⁶⁷⁾. Die Konfliktauflösung geschieht durch Schaltstrategien⁶⁸⁾ oder durch Auswahlentscheidungen des Modellierungsträgers. In beiden Fällen wird festgelegt, welche von den konfliktionär aktivierten Transitionen tatsächlich geschaltet wird. Darüber hinaus wird auf das Modul der Fallstudie verwiesen, das einen Produktionsauftrag repräsentiert. Der Produktionsauftrag läßt sich als ein spezielles Projekt auffassen. Das projektspezifische Netzmodul kann für die Modellierung mehrerer Projekte beliebig oft neu konstruiert - oder entsprechend modifiziert - werden. Die Koordinierung aller projektspezifischen Netzmodule läßt sich in der Weise verwirklichen, wie es in der Fallstudie für den Zugriff auf gemeinsam benötigte, knappe Ressourcen, wie z.B. die

Arbeitskräfte und Bearbeitungsstationen, demonstriert worden ist. Um zwischen Koordinierungsalternativen auszuwählen, brauchen keine speziellen Auswertungsalgorithmen konzipiert zu werden. Er reicht wiederum die Erreichbarkeitsanalyse für Netzmodelle aus⁶⁹).

Auch im Hinblick auf vertikal gegliederte Modelle fallen die Unterstützungsleistungen der Netzplantechnik bescheiden aus. Für Verfeinerungen von Netzplänen bietet sie überhaupt kein *systematisches* und allgemein etabliertes Vorgehenskonzept an⁷⁰). Dagegen kann immerhin auf die Konzepte der "Meilensteine" und der Netzplanverdichtung zurückgegriffen werden, um Netzpläne systematisch zu vergrößern⁷¹).

Bei Meilensteinen⁷²) handelt es sich um Ereignisse, die ein Modellierungsträger bei der Abwicklung eines Projekts für besonders wichtig hält. Wenn vom zugrundeliegenden Netzplan abstrahiert wird und nur noch seine Meilenstein-Ereignisse Beachtung finden, können diese zu einem vergrößerten Ereignisknoten-Netzplan verknüpft werden. Allerdings erlaubt diese Netzplanvergrößerung nur einfache Abstraktionen. Sie bleiben auf das reine Ausblenden von Vorgängen oder anderen Ereignissen aus dem zugrundeliegenden Netzplan beschränkt. Darüber hinaus erstreckt sich die vertikale Modellgliederung in der Modellierungspraxis zumeist auf nur zwei Modellebenen: den zugrundeliegenden Netzplan und den darüber aufgespannten Meilenstein-Netzplan. Vom tiefen Spektrum hierarchischer Modellentwürfe wird daher nur der kleinstmögliche Ansatz verwirklicht.

Die Netzplanverdichtung⁷³) gestattet gehaltvollere Netzplanvergrößerungen. Bei ihr werden Teilnetzpläne durch einzelne Knoten oder Kanten so ersetzt, daß sich die Substitute genau so verhalten wie die ursprünglichen Teilnetzpläne. Dieser konzeptionell verheißungsvolle Ansatz hat jedoch bei der praktischen Anwendung der Netzplantechnik bislang keine größere Resonanz gefunden. Darüber hinaus beschränken sich auch theoretische Beiträge zur Netzplanverdichtung im allgemeinen darauf, nur einfache zweistufige Modellierungen vorzunehmen: Sie thematisieren jeweils nur einen Feinnetzplan und dessen verdichteten Grobnetzplan⁷⁴). Das Potential hierarchischer Modellierungen wird auch hier nur geringfügig ausgeschöpft.

Im Rahmen des Petrinetz-Konzepts existieren dagegen mehrere Ansätze für die *systematische* Verfeinerung und Vergrößerung von Netzmodellen. Eine Variante wurde in dieser Arbeit mehrfach behandelt⁷⁵). Sie betrifft die Substitution von Makroknoten durch verfeinernde Subnetze und die inverse Zusammenfassung von Teilnetzen zu vergrößerten Makroknoten. Dabei wurden Reglements getroffen, die genau festlegten, wie bei der Knotensubstitution bzw. Teilnetzzusammenfassung vorzugehen ist. Die Netzverfeinerungen und -vergrößerungen können sich über beliebig viele Hierarchiestufen hinweg erstrecken. Von dieser Möglichkeit der mehrfachen hierarchischen Verschachtelung wurde in dieser Arbeit vor allem in verfeinernder Weise Gebrauch gemacht: bei der Beschreibung eines Konstruktionsalgorithmus für Erreichbarkeitsgraphen und bei der exemplarischen Modellierung eines Produktionssystems in der Fallstudie.

Darüber hinaus wurde eine *komplexe* Vergrößerungsmöglichkeit aufgezeigt, die über das o.a. einfache Ausblenden von weniger wichtig erscheinenden Modellkomponenten hinausreicht. Diese Vergrößerung betrifft Transitionen mit erweiterter Verknüpfungslogik oder erweiterter Schaltvorschrift. Diese Transitionen wurden als Makrotransitionen eingeführt, deren Schaltverhalten durch zugrundeliegende Subnetze erklärt ist. Die Makrotransitionen besitzen dadurch auf der vergrößerten Betrachtungsebene ein anspruchsvolleres Schaltverhalten als gewöhnliche Transitionen. Es zeichnet sich durch eine komplexe Verknüpfungslogik der adjazenten Kanten oder durch ein Schaltverhalten aus, das auf komplizierte Weise durch mehrere Produktionsregeln spezifiziert wird. Daher werden in den vergrößerten Makrotransitionen keineswegs einzelne "wichtige" Aspekte aus den erklärenden Subnetzen herausgegriffen. Vielmehr wird in den Makrotransitionen das gesamte Schaltverhalten der zugrundeliegenden Subnetze auf einer höheren Darstellungsebene zusammengefaßt. Diese Art der Vergrößerung bleibt also nicht - wie es bei Meilenstein-Netzplänen der Fall ist - auf Abstraktion durch Vereinfachung beschränkt⁷⁶).

Statt dessen leistet sie eine Abstraktion durch Komplexitätserhaltung und Kompaktifizierung. Eine solche Vergrößerungstechnik bietet die Netzplantechnik nicht an.

Neben den Netzverfeinerungen und -vergrößerungen, die in dieser Arbeit diskutiert wurden, verfügt das Petrinetz-Konzept weitere Optionen für die vertikale Gliederung von Modellen. Im Vordergrund steht dabei das Konzept der Netzmorphismen⁷⁷⁾. Es gehört zum Erkenntnisbereich der Allgemeinen Netztheorie⁷⁸⁾. Netzmorphismen stellen Funktionen dar, die Netze auf Netze abbilden und dabei morphismusspezifische Netzeigenschaften bewahren. Solche Netzmorphismen lassen sich grundsätzlich benutzen, um ein vorliegendes Netz auf ein verfeinertes oder vergrößertes Netz abzubilden. Besonders interessant ist die konstitutive Morphismuseigenschaft, daß bei diesen Netztransformationen die Invarianz bestimmter Netzeigenschaften garantiert wird. Beispielsweise ist es für die Konstruktion verfeinerter Netzmodelle hilfreich zu wissen, daß aus einem deadlockfreien Netzmodell auf dem Wege der Verfeinerung immer wieder ein deadlockfreies Netzmodell hervorgeht. Dies läßt sich sicherstellen, wenn die Netzverfeinerung auf einen Netzmorphismus zurückgeführt werden kann, dessen Anwendungen die Eigenschaft der Deadlockfreiheit unberührt lassen. Trotz dieser bemerkenswerten Leistungen von Netzmorphismen wurden sie in den hier vorgelegten Ausarbeitungen nicht berücksichtigt. Denn Netzmorphismen lassen sich bisher nur auf einfach strukturierte Netzklassen anwenden. Im Vordergrund stehen dabei Netzklassen, die sich im Rahmen der Stelle/Transition-Netze bewegen. Allerdings müssen diese Netze noch einschränkende Auflagen hinsichtlich ihrer topologischen Strukturen erfüllen. Für die komplexeren Prädikat/Transition-Netze sind dagegen noch keine nennenswerten Netzmorphismen vorgelegt worden. Noch viel weniger existieren sie für die hier verwendeten Synthetischen Netze und ihre mehrfachen Erweiterungen. Daher läßt sich das Konzept der Netzmorphismen im Modellierungszusammenhang dieser Arbeit nicht anwenden.

Abschließend wird noch auf vier Detailspekte hingewiesen, die wiederum zugunsten der Modellierungsgüte von Petrinetzen sprechen, aber keiner ausführlichen Erläuterung bedürfen. Erstens lassen sich in Petrinetzen Fixfristen unmittelbar darstellen. In Netzplänen muß zu einer aufwendigeren Hilfskonstruktion gegriffen werden, bei der eine Minimal- mit einer betragsgleichen Maximalfrist kombiniert wird⁷⁹⁾. Zweitens wirkt die Repräsentation von Maximalfristen in Vorgangsknoten-Netzplänen "gekünstelt", weil sie die Verwendung von *negativen* Fristbeträgen erfordert⁸⁰⁾. In Petrinetzen erfolgt dagegen die "natürliche" Repräsentation von Maximalfristen durch positive Fristbeträge. Drittens sind in Vorgangskanten-Netzplänen des öfteren Scheinvorgänge erforderlich⁸¹⁾. Dies gilt für die Berücksichtigung absoluter Termine⁸²⁾, für Minimalfristen mit positiver Dauer⁸³⁾ sowie einige zeitliche Anordnungsbeziehungen zwischen Vorgängen⁸⁴⁾. Dabei handelt es sich um artifizielle Konstruktionen⁸⁵⁾, die der Forderung nach einer "natürlichen" Modellierung zuwiderlaufen. Denn den Scheinvorgängen entspricht in der modellierten Realität kein prozeßartiger Sachverhalt. Bei der Verwendung von Petrinetzen werden dagegen solche Scheinkonstruktionen grundsätzlich nicht benötigt. Viertens Fünftens lassen Petrinetze eine intuitiv anschauliche Darstellung fortschreitender Vorgangs- und Projektausführungen durch ihren schaltbedingten Markenfluß zu. Auf die kognitive Adäquanz und Animationsqualität solcher Markenflüsse wurde bereits aufmerksam gemacht. Eine analoge Option bleibt die Netzplantechnik schuldig, weil ihr das Konzept beweglicher Objekte fremd ist.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Oftmals sind sie sich dieser Konzeptualisierungsprämisse, die ihrem Erkennen von modellierungsbedürftigen Sachverhalten zugrundeliegt, noch nicht einmal bewußt. Auf die Dominanz von zeitbezogenen Problemkonzeptualisierungen wurde auch schon hingewiesen, als der systemtheoretische Bezugsrahmen dieser Arbeit entfaltet wurde.

2) Auf das Beurteilungsaspekt der kognitiven Adäquanz wurde schon im Zusammenhang mit der graphischen Repräsentationsfähigkeit eingegangen.

3) In dieser Hinsicht überrascht es, daß die meisten Autoren, die sich zur Beziehung zwischen Netzplantechnik und Petrinetz-Konzept äußern, auf die Schwierigkeiten der Zeiterfassung in Petrinetzen überhaupt nicht eingehen. Sie diskutierten erst gar nicht, ob oder wie sich die anschaulichen Zeitgrößen aus Netzplänen in entsprechende Konstrukte von Petrinetzen transformieren lassen. Dieser erstaunliche Sachverhalt wird dadurch unterstrichen, daß die Zeitnetze, die in zahlreichen Varianten vorgelegt worden sind, von jenen Autoren in keiner Weise gewürdigt werden. Vgl. zu dieser Einstellung, Netzpläne und Petrinetze aufeinander zu beziehen, aber alle Zeitaspekte auszublen- den, z.B. ROSENSTENGEL (1982), S. 49. Zwar wird bei PAGNONI (1985a), S. 133ff., der Zeitaspekt erwähnt, aber nur zu dem Zweck, ihn sofort wieder auszugrenzen (S. 134: "we will not consider durations"). Eine Ausnahme stellen immerhin die Ausführungen von LOWAS (1986b), S. 1692ff., dar, die schon gewürdigt wurden. Dort wird die Ein- bindung von Zeitgrößen in Petrinetze detailliert behandelt. Allerdings ist bemerkenswert, daß sich LOWAS nicht ex- plizit auf die Netzplantechnik bezieht.

4) Dies folgt unmittelbar als Umkehrschluß aus der zuvor konstatierten kognitiven Adäquanz von Netzplänen, die auf die unmittelbare Repräsentation von temporalen Einflußgrößen zugeschnitten sind.

5) Von vornherein geplante Ausführungsunterbrechungen lassen sich dagegen ohne Schwierigkeiten im Rahmen der Netzplantechnik berücksichtigen. Vgl. dazu die Erläuterungen von DOMSCHKE (1991), S. 71ff. Sofern die Vor- gangsausführungen an Stellen unterbrochen werden, die a priori festliegen, so können die betroffenen Vorgänge in entsprechende Teilvorgänge aufgespalten werden (S. 71). Andernfalls muß zu netzplanrepräsentierenden OR-Pro- grammen übergegangen werden (S. 71ff.). Mit ihrer Hilfe ist es möglich, Ausführungsunterbrechungen an beliebigen, nicht a priori fixierten Stellen einzuplanen.

6) Diese Möglichkeit wurde schon in der voranstehenden Anmerkung erwähnt.

7) Hier wird *grundsätzlich* bezweifelt, ob sich empirisch valide Dichtefunktionen für stochastische Ausführungs- dauern überhaupt ermitteln lassen. Diese Kritik bezieht sich auf beliebige Dichtefunktionen. Eine schwächere Kritik richtet sich des öfteren gegen die *speziellen* Funktionsklassen, die von manchen Netzplanklassen vorausgesetzt wer- den. Dies gilt insbesondere für die Beta-Verteilung, die den PERT-Netzplänen zugrundeliegt. Ihre Realitätsadäquanz wird vielfach bezweifelt; vgl. z.B. WILLE (1972), S. 73f.; GROBE-OETRINGHAUS (1977), S. 105f.; KÜPPER,WI. (1979), Sp. 1344; ZIMMERMANN,G. (1988), S. 281; RABETGE (1991), S. 126ff., insbesondere S. 128f.; HENNICKE (1991), S. 68.

8) Der dort repräsentierte atomare Prozeß wird mit dem hier betrachteten unterbrechbaren Vorgang identifiziert. Der Endzeitpunkt der Prozeßausführung wird als frühest zulässiger Endzeitpunkt der Vorgangsausführung behandelt. Eine Unterbrechung der Vorgangsausführung läßt sich unmittelbar dadurch erfassen, daß die Kopie der Objekt- marke von der Stelle "Prozeßausführung_dauert_an" abgezogen wird.

9) Vgl. dazu die entscheidungstheoretische Konzeptualisierung von Problemen der Prozeßkoordinierung. Bemer- kenswert sind auch die Ausführungen von GROB,M. (1991c), S. 98f. Sie befassen sich damit, Netzpläne bei der Grob- und Feinplanung von Produktionsprozessen einzusetzen. Auch aus dieser Perspektive, die vom Denken in Netzplänen geprägt ist, wird die Repräsentation von Entscheidungsalternativen als ein zentraler Prüfstein für die Praxistauglichkeit von auftragsspezifischen Netzplänen eingestuft. Dabei werden die Entscheidungsalternativen als Alternativen bei der Auftragsabwicklung thematisiert.

10) GAN steht für: Generalized Activity Network; vgl. zu GAN-Netzplänen ELMAGHRABY (1964), S. 495ff.; ELMAGHRABY (1966b), S. 621ff.; CZERANOWSKY (1974), S. 120; ELMAGHRABY (1977), S. 325ff.

11) Vgl. z.B. ZIMMERMANN,H. (1971), S. 112ff.; CZERANOWSKY (1974), S. 117, 123 u. 151; NEUMANN,K. (1975b), S. 321; GROBE-OETRINGHAUS (1977), S. 102; MATTHES,W. (1979a), Sp. 1336f.; MEYER,H. (1981), S. 1; REFA (1985e), S. 33ff.; DOMSCHKE (1990), S. 200; SCHWARZE,J. (1990), S. 239 u. 243f.; DOMSCHKE (1991), S. 63.

12) Daher wird fortan präzisierend von "echten" Entscheidungsnetzplänen gesprochen, wenn sie tatsächlich in der Lage sind, Entscheidungsalternativen zu repräsentieren. Als "Pseudo"-Entscheidungsnetzpläne werden dagegen solche Netzpläne bezeichnet, die zwar als "Entscheidungsnetzpläne" thematisiert werden, aber dennoch keine Repräsentationen von Entscheidungsalternativen zulassen. Dies wird in Kürze näher erläutert.

13) Daneben haben z.B. CLARK, HASTINGS und MELLO ein Konzept für echte Entscheidungsnetzpläne vorgelegt; vgl. CLARK,J. (1977), S. 51ff.; HASTINGS (1978), S. 1ff. Zwei Aspekte ihres Ansatzes erscheinen dem Verf. beson-

ders bemerkenswert. Erstens verwenden HASTINGS und MELLO eine graphische Darstellungsweise, die den bipartiten Graphen von Petrinetzen sehr nahe kommt (vgl. HASTINGS (1978), S. 2, Fig. 1.1 u. 1.2). Sie unterscheidet sich von bipartiten Graphen lediglich dadurch, daß die aktionsrepräsentierenden Rechtecke nicht als selbständige Knoten ausgeformt wurden. Vielmehr bleiben sie auf merkwürdige kantenüberlagernde Konstrukte beschränkt. Diese Seltsamkeit läßt sich aber ohne Schwierigkeiten beseitigen, indem die Rechtecke durch Zweiteilung der unterlagerten Kanten als eigenständige Knoten deklariert werden. Diese Variante findet sich sogar ausdrücklich in der früheren Veröffentlichung CLARK, J. (1977), S. 59 (Fig. 8) sowie S. 65 (Fig. 9 u. 11). Warum sie später von HASTINGS und MELLO nicht weiterverwendet wurde, vermag der Verf. nicht nachzuvollziehen. Zweitens differenzieren CLARK, HASTINGS und MELLO präzise zwischen der Möglichkeit, echte Auswahlentscheidungen zwischen alternativen Aktionen treffen zu können, und der Möglichkeit, daß auf dieselbe Auswahlentscheidung verschiedene Umweltzustände mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten folgen können. Vgl. CLARK, J. (1977), S. 59 u. 65f.; HASTINGS (1978), S. 102ff., insbesondere Fig. 8.2 bis 8.6 auf S. 105ff. sowie die Verknüpfung mit Entscheidungsbäumen auf S. 113f. Daher kommt es nicht zu der sonst üblichen - aber inhaltlich unzulässigen - Vermengung zwischen Entscheidungsalternativen einerseits und stochastischen Umweltentwicklungen andererseits. Des weiteren hat ZIMMERMANN, G. (1988), S. 286ff.; einen Ansatz für echte Entscheidungsnetzpläne präsentiert. Er ist aber weniger detailliert ausgearbeitet als das Konzept von CLARK, HASTINGS und MELLO. Ein detailliert ausgearbeitetes Konzept für echte Entscheidungsnetzpläne, das auch Erkenntnisse aus der KI-Forschung einbezieht, hat dagegen in jüngster Zeit HENNICKE vorgelegt; vgl. HENNICKE (1991), S. 69ff., insbesondere S. 80ff. u. 97ff.

14) DCPM steht für: Decision Critical Path Method; vgl. zu DCPM-Netzplänen CROWSTON (1967), S. 407ff.; WEBER, K. (1968), S. 238 (dort allerdings fehlerhaft als Netzplanart auf "probabilistischer Basis" angesprochen); CROWSTON (1970), S. 435ff.; ELMAGHRABY (1977), S. 324; MOELLER (1981), S. 678; MEYER, M. (1985), S. 132ff.; HENNICKE (1991), S. 50ff. u. 79f.

DCPM-Netzpläne stellen ihrem Namen nach eine Erweiterung von CPM-Netzplänen dar. Allerdings zeigt eine genauere Betrachtung der vorgenannten Quellen, daß es sich bei DCPM-Netzplänen um Vorgangsknoten-Netzpläne handelt. Daher wäre es konsequenter, sie als Fortentwicklungen von MPM-Netzplänen einzustufen. Gleicher Ansicht ist HENNICKE (1991), S. 50.

15) Der gravierende Ressourceneinsatz, der zur (optimalen) Berechnung von DCPM-Netzplänen erforderlich ist, wird besonders deutlich bei HENNICKE (1991), S. 53. Vgl. auch CROWSTON (1967), S. 418.

16) Dies äußert sich schon darin, daß DCPM-Netzpläne - oder andere echte Entscheidungsnetzpläne - in den Standardwerken der Netzplantechnik kaum beachtet werden. Allenfalls werden sie dort als "Randerscheinungen" erwähnt. Vgl. dazu die Quellen, die als Überblicke über die Netzplantechnik aufgeführt wurden. Darüber hinaus ist bemerkenswert, daß ausführlichere Auseinandersetzungen mit echten Entscheidungsnetzplänen im letzten Jahrzehnt nur selten erfolgten. Zu den wenigen Ausnahmen gehören die Beiträge von MEYER, M. (1985), S. 132ff., und HENNICKE (1991), S. 50ff. Dies spricht dafür, daß das Interesse an solchen echten Entscheidungsnetzplänen mittlerweile weitgehend erlahmt ist.

17) Vgl. auch HENNICKE (1991), S. 66ff. u. 79. Er analysiert Ansätze der Netzplantechnik, die derzeit bei der Repräsentation von Entscheidungsalternativen vorherrschen. Seine Untersuchungsergebnisse fallen durchweg negativ aus. Auf S. 74 stellt er die gleiche Unfähigkeit zur Repräsentation von Entscheidungsalternativen für hierarchisch verfeinerte Netzpläne fest.

18) Daneben gehören zu den Pseudo-Entscheidungsnetzplänen auch weniger geläufige Varianten, wie z.B. die DB- und die VERT-Netzpläne.

DB steht für: Decision Box; vgl. zu DB-Netzplänen EISNER (1962), S. 115ff.; CZERANOWSKY (1974), S. 117ff.; PATZAK (1975), S. 230f.; HENNICKE (1991), S. 50f.

VERT steht für: Venture Evaluation and Review Technique; vgl. zu VERT-Netzplänen MOELLER (1981), S. 676ff., insbesondere S. 679ff.; MATTHEIS (1982), S. 23ff.; HENNICKE (1991), S. 57ff.;

Vgl. zu weiteren Pseudo-Entscheidungsnetzplänen STEMPPELL (1970), S. 199ff.; PATZAK (1975), S. 231ff.; STEINHARDT (1977), S. 11ff. (mit großer GERT-Ähnlichkeit); MEYER, H. (1981), S. 3ff.

Kurz zuvor wurde der Beitrag von GROß, M. (1991c) herausgestellt, der im Rahmen der Netzplantechnik die Repräsentation von Entscheidungsalternativen bei der Grob- und Feinplanung von Produktionsprozessen besonders würdigt. GROß, M. (1991c), S. 100, behauptet auch, die Entscheidungsalternativen würden in seinen Netzplänen wiedergegeben. Eine nähere Betrachtung zeigt aber, daß dieser Anspruch von keinem der Netzpläne zufriedenstellend eingelöst wird, die in der vorgenannten Quelle präsentiert werden. Zwar scheinen die Netzpläne aus Bild 1 u. 2 auf S. 98 alternative Vorgänge zu enthalten. Doch die Netzpläne stellen lediglich graphische Skizzen dar, die prima facie wie Netzpläne anmuten. Tatsächlich enthalten diese "Netzpläne" aber kein einziges graphisches Konstrukt, um das Vorliegen eines Alternativvorgangs zu spezifizieren. Darüber hinaus enthalten die Skizzen fundamentale Fehler, die jeder Netzplandefinition zuwiderlaufen. Beispielsweise soll es sich beim Alternativvorgang "7*" im Bild 2 um einen Nachfolger des Vorgangs "8" handeln. In der zugehörigen Vorgangsliste ist diese Präzedenzbeziehung aber überhaupt nicht enthalten. Daraus muß der Schluß gezogen werden, daß in den Netzplänen von GROß, M. (1991c) keine Alternativen repräsentiert werden. Statt dessen werden Information über alternative Prozeßausführungen als Koeffi-

zienten von Prozeßmatrizen erfaßt und in einer relationalen "Strukturdatenbank" gespeichert; vgl. GROß,M. (1991c), S. 99. Daher bestätigt GROß,M. (1991c) unfreiwillig den Sachverhalt, daß die meisten Netzpläne - trotz gegenteiliger Behauptungen - nicht in der Lage sind, Entscheidungsalternativen adäquat wiederzugeben.

19) Vgl. dazu die Konzeptualisierung von Entscheidungsspielräumen.

20) Vgl. z.B. ZIMMERMANN,H. (1971), S. 112, Abb. 75, oder SCHWARZE,J. (1990), S. 239, Abb. 19.4.

21) Die beiden nachfolgenden Bedingungen erweisen sich nicht als denknötwendig. Vielmehr handelt es sich um Setzungen, mit deren Hilfe der Verf. seine Vorstellungen über eine "adäquate" Modellierung von Entscheidungsalternativen expliziert. Vgl. dazu die Erläuterung zur Demarkationsfunktion von Rahmensetzungen. Andere Adäquanzauffassungen lassen sich durchaus vertreten. Es liegt aber außerhalb des Erkenntnisinteresses dieser Arbeit, solchen alternativen Vorstellungswelten nachzuspüren.

22) Der Entscheidungsspielraum wird also durch den betrachteten Knoten zusammen mit seinen Ausgangskanten repräsentiert. Jede Ausgangskante entspricht genau einer Entscheidungsalternative aus dem Spielraum.

23) Dabei wird die Unterlassungsalternative ebenso als eine Entscheidungsalternative behandelt.

24) Es wird unterstellt, daß die entscheidungstheoretische Problemkonzeptualisierung, die in der Rahmenlegung zu dieser Arbeit entfaltet wurde, als Explikation von Entscheidungsrationalität akzeptiert wird. Falls diese Konzeptualisierung nicht anerkannt wird, steht es natürlich offen, eine Alternative unabhängig von ihren verursachungsgerecht ermittelten Konsequenzen auszuwählen. Solche "irrationalen" Entscheidungsprozesse werden hier aber nicht berücksichtigt.

25) Eine solche Alternativenauswahl wird hier als Modellierungszweck für die Konstruktion und Auswertung von Entscheidungsnetzplänen vorausgesetzt.

26) Immerhin erfüllen Pseudo-Entscheidungsnetzpläne noch die erste Bedingung, daß jede Ausgangskante eines der hier betrachteten Knoten/Kanten-Komplexe einer Entscheidungsalternative entspricht. Aufgrund dieser Entsprechung könnte bereits von der "Repräsentation" einer Entscheidungsalternative gesprochen werden. Um diese Option auszuschließen, wurde die zweite Bedingung eingeführt. Sie stellt sicher, daß nicht jede beliebige Repräsentation zugelassen wird. Statt dessen werden nur diejenigen Repräsentationen akzeptiert, die das Adäquanzkriterium der verursachungsgerechten Konsequenzenerfassung erfüllen. Daher interessieren hier nur solche Modellierungskonzepte, die eine *adäquate* Repräsentation von Entscheidungsalternativen erlauben. Nach dieser Klarstellung ist es im folgenden nicht mehr erforderlich, stets von einer adäquaten Alternativenrepräsentation zu sprechen. Statt dessen wird vereinbart, kurz von der Repräsentation einer Entscheidungsalternative zu reden, solange aus dem Argumentationskontext hervorgeht, daß eine adäquate Alternativenrepräsentation gemeint ist.

27) Vgl. ELMAGHRABY (1964), S. 513; PHILLIPS,D. (1974), S. 311; MOORE,L. (1976), S. 65 u. 125f.; PRITSKER (1977), S. 96; DOMSCHKE (1990), S. 200; NEUMANN,K. (1990), S. 123 u. 125 (ohne Auftragsbezug).

28) Vgl. WHITEHOUSE (1973), S. 444; PHILLIPS,D. (1974), S. 312; MOORE,L. (1976), S. 65, 72 u. 125; DOMSCHKE (1990), S. 200.

29) Es wird hier der Einfachheit halber davon abgesehen, daß Durchschnitts- oder Anteilswerte strenggenommen nur in simulativen Netzplanauswertungen ermittelt werden. Bei analytischen Netzplanauswertungen erfolgt dagegen eine Bestimmung der korrespondierenden Erwartungswerte (und gegebenenfalls auch ihrer Varianzen). Vgl. zu den typischen Analysezielen, die mit der Auswertung von Pseudo-Entscheidungsnetzplänen verfolgt werden, ZIMMERMANN,H. (1971), S. 121ff.; ARISAWA (1972), S. 589f.; WHITEHOUSE (1973), S. 444ff.; PHILLIPS,D. (1974), S. 311ff.; MOORE,L. (1976), S. 38ff., 65ff. u. 125ff.; PRITSKER (1977), S. 95ff.; ELMAGHRABY (1977), S. 372ff.; TAYLOR,B. (1980a), S. 54ff.; TAYLOR,B. (1980b), S. 150ff.; HUANG,P. (1983), S. 334ff.; NEUMANN,K. (1990), S. 48ff., 83ff. u. 123ff.

30) Dies gilt beispielsweise für die weit verbreiteten GERT-Netzpläne, insbesondere auch für ihre vorherrschende Variante, die STEOR-Netzpläne. Vgl. dazu die Quellen, die zu GERT- und STEOR-Netzplänen angeführt wurden. STEOR-Netzpläne zeichnen sich dadurch aus, daß über den Ausgangskanten *jedes* Knotens, der über mehrere Ausgangskanten verfügt, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert ist. Jeder solche Knoten/Kanten-Komplex stellt einen Entscheidungsspielraum dar, weil sein Knoten über *mehrere* Ausgangskanten verfügt. Auf diese Weise werden von vornherein *alle* Entscheidungsspielräume durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen überlagert. PAGNONI (1990), S. 108, spricht diesen Sachverhalt deutlich aus: "GERT ... allows the representation of *choices governed by probability laws*." (kursive Hervorhebung durch den Verf.). Vgl. auch EISNER (1962), S. 120ff. (S. 120: "After the entire db network configuration has been obtained, the researcher examines each of the decision boxes and assigns a probability to each of the disjunctive paths ..."); ELMAGHRABY (1964), S. 495 u. 497; ELMAGHRABY (1966b), S. 622; PRITSKER (1966b), S. 267; VÖLZGEN (1969), S. 521; STEPELL (1970), S. 201; PATZAK (1975), S. 229 ("Probleme bei der Alternativenauswahl sowie bei Entscheidungssituationen ... behandelt ... auf der Basis von Wahrscheinlichkeitswerten" sowie: "mehrere Alternativen ..., deren jeweiliges Auftreten stochastischen Gesetzmäßigkeiten unter-

worfen ist."); ELMAGHRABY (1977), S. 327f.; STEINHARDT (1977), S. 11 (Fall I.1.2) u. 13; MEYER, H. (1981), S. 4 u. 12; REFA (1985e), S. 33; ZIMMERMANN, G. (1988), S. 287 (kritisch distanziert).

31) Daher überrascht es nicht, daß in der einschlägigen Literatur Entscheidungsnetzpläne und stochastische Netzpläne oftmals in synonyme Weise thematisiert werden. Dabei sind allerdings nur solche stochastischen Netzpläne einbezogen, die sich durch stochastische Ablaufstrukturen auszeichnen. Ebenso stochastische Netzpläne, die *nur* über stochastische Vorgangsdauern verfügen, bleiben in dieser Hinsicht ausgeklammert. In ihnen erfolgt ohnehin kein Versuch, Entscheidungsalternativen zu repräsentieren. Vgl. dazu MATTHES, W. (1979a), Sp. 1336f., der präzisierend von *ablaufstochastischen* Netz(plän)en spricht. Er grenzt sie von *ablaufdeterministischen* Netz(plän)en mit stochastischen Vorgangsdauern ab (Sp. 1335).

Vgl. zur unreflektierten Gleichbehandlung von Entscheidungsnetzplänen und ablaufstochastischen Netzplänen z.B. ELMAGHRABY (1964), S. 496 (er betrachtet einen Knoten, über dessen Ausgangskanten eine Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert ist, als "equivalent to EISNER's `decision box`"); CZERANOWSKY (1974), S. 117, 123 u. 151; PATZAK (1975), S. 229f.; GROBE-OETRINGHAUS (1977), S. 102; MATTHES, W. (1979a), Sp. 1336f.; DIN 69900 (1980), S. 340 u. 346; REFA (1985e), S. 33; DOMSCHKE (1990), S. 200 (GERT-Netzpläne als Entscheidungsnetzpläne) i.V.m. S. 74f. (GERT-Netzpläne als stochastische Netzpläne). Vgl. des weiteren die fragwürdige Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten zu den Nachfolgern von "Entscheidungsknoten" bei REFA (1985e), S. 33, und SCHEER (1991d), S. 70f.

Die voranstehende Vermengung von Entscheidungsbezug und stochastischer Ablaufstruktur läßt sich vermeiden, wenn alle Pseudo-Entscheidungsnetzpläne von vornherein als (ablauf-)stochastische Netzpläne thematisiert werden. Diese Sprachregelung findet sich z.B. bei PRITSKER (1966b), S. 267; WHITEHOUSE (1973), S. 244; KÜPPER, W. (1979), Sp. 1344; MATTHES, W. (1979a), Sp. 1336f.; KERN, W. (1987), S. 100. Da sich in der Literatur zur Netzplantechnik der Begriff "Entscheidungsnetzpläne" für (ablauf-)stochastische Netzpläne weithin verfestigt hat, zieht es der Verf. im hier entfalteten Argumentationskontext vor, verdeutlichend von *Pseudo-Entscheidungsnetzplänen* zu reden.

32) Diese Wahrscheinlichkeitszuweisung stellt schon einen Widerspruch in sich dar. Denn eine Entscheidungsalternative ist eine Option, deren Ergreifen oder Unterlassen in der Entscheidungsfreiheit eines Entscheidungsträgers liegt. Einem Sachverhalt eine Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen bedeutet dagegen, daß die Sachverhaltsrealisierung außerhalb der Entscheidungsreichweite des Entscheidungsträgers konzeptualisiert wird. Die Inkonsistenz von wahrscheinlichkeitsbewerteten Entscheidungsalternativen wird besonders deutlich bei EISNER (1962), S. 141 i.V.m. S. 119, und CZERANOWSKY (1974), S. 117ff. Dort werden die alternativen Entscheidungsergebnisse "ja" und "nein" z.B. mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten "0,6" bzw. "0,4" gewichtet. Es ist aber nicht nachzuvollziehen, warum ein Entscheidungsträger den beiden Entscheidungsalternativen "ja" und "nein" irgendwelche Eintrittswahrscheinlichkeiten zuordnen sollte. Dies gilt zumindest so lange, wie er an die Entscheidungsautonomie seiner Willensfreiheit glaubt. Andernfalls - wenn die Prämisse willensfreier Entscheidungsträger aufgegeben wird - wäre es aber widersinnig, überhaupt noch Entscheidungsmodelle zu konstruieren und auszuwerten, um Auswahlprobleme zu lösen. Denn ein "Entscheidungsträger", der nicht mehr willensfrei auszuwählen vermag, ist kein echter Entscheidungsträger mehr. Statt dessen wird er darauf reduziert, das - mehr oder minder wahrscheinliche - Eintreffen von fremdbestimmten Alternativen abzuwarten.

33) Dies geht auch mittelbar aus den Ausführungen von ZIMMERMANN, G. (1988), S. 287f., hervor. Er betrachtet eine spezielle produktionswirtschaftliche Modellierungsaufgabe: die Repräsentation von Produktvarianten. Dabei kann jede seiner Produktvarianten als eine Entscheidungsalternative betrachtet werden. Informationen über diese Produktvarianten sollen mit der Hilfe eines Entscheidungsnetzplans repräsentiert werden. Dabei stellt ZIMMERMANN vollkommen zu Recht fest, daß die Repräsentation alternativer Produktvarianten im Entscheidungsnetzplan nur dann möglich ist, wenn die Ausgangskanten der Entscheidungsknoten durch *keine* Wahrscheinlichkeitsverteilungen überlagert werden.

34) Dieser Amalgamcharakter könnte SCHWARZE, J. (1990), S. 240, dazu verleitet haben, in Abb. 19.5 einen Entscheidungsknoten so darzustellen, daß er einen - fehlerhaften - deterministischen Knotenausgang besitzt. Auf den *konjunktiven* Charakter eines deterministischen Knotenausgangs wurde bereits hingewiesen. Die Alternativenkonjunktion im "Entscheidungsknoten" der Abb. 19.5 entspricht in vorzüglicher, aber vermutlich unbeabsichtigter Weise dem hier kritisierten Amalgam statistischer Alternativenverrechnungen.

35) Dies spricht SCHWARZE, J. (1990), S. 239f., sogar explizit aus: "An einem Entscheidungsknoten müssen *nicht* immer *echte* Entscheidungen getroffen werden. ... Wird an einem Entscheidungsknoten der weitere Ablauf des Projektes *nicht* von einer *echten* Entscheidung ... abhängig gemacht, dann kann man den verschiedenen Ausgängen des Entscheidungsknotens ... Wahrscheinlichkeiten zuordnen. (Fettdruck des Originals hier unterlassen; kursive Hervorhebungen durch den Verf.)."

36) Anstelle von Durchschnitts- oder Anteilsgrößen kann in einem Pseudo-Entscheidungsnetzplan auch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt werden, die über allen berücksichtigten Entscheidungsalternativen definiert ist. Dadurch wird zwar die kritisierte Amalgambildung vermieden. Doch unterbleibt weiterhin die Ermittlung der Ent-

scheidungskonsequenzen von *einzelnen* Entscheidungsalternativen. Die Kenntnis einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, die alle Entscheidungsalternativen überspannt, hilft aber ebensowenig einem Entscheidungsträger, der genau eine Entscheidungsalternative auszuwählen gedenkt. Denn der Entscheidungsträger will qua Voraussetzung nicht das Eintreten einer "wahrscheinlichen" Alternative passiv abwarten, sondern ihre Auswahl und Verwirklichung aktiv betreiben. Daher stellt es einen konzeptionellen Selbstwiderspruch dar, Entscheidungsalternativen mit Eintrittswahrscheinlichkeiten zu überlagern.

37) So stellt auch HAX, H. (1974), S. 191, fest: "Bei der Planung des Projekts können nur Wahrscheinlichkeitsverteilungen über den Ausgang dieser Entscheidung[en] zugrundegelegt werden" (Ergänzung [...] durch den Verf.).

38) Dagegen lassen Entscheidungsnetzpläne eine adäquate Repräsentation von Entscheidungsalternativen zu, sobald die Überlagerungen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen und die daran anschließenden stochastischen Konsequenzenverrechnungen unterbleiben. Dies zeigt sich z.B. bei den echten Entscheidungsnetzplänen von CLARK, HASTINGS und MELLO darin, daß alternative Entscheidungsmöglichkeiten einerseits und Umweltsituationen mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten andererseits streng auseinandergehalten werden. DCPM-Netzpläne, die ebenfalls zu den echten Entscheidungsnetzplänen gehören, umfassen dagegen von vornherein *keine* stochastischen Netz-determinanten. Daher stellen sie nicht-deterministische, aber zugleich auch nicht-stochastische Netzpläne dar.

39) Hier wirkt sich abermals die Eigenart von Petrinetzen aus, über Marken und stellenartige - passive - Knoten zu verfügen, die im Rahmen der Netzplantechnik unbekannt sind. Denn die konfliktionäre Aktivierung mehrerer Transitionen kommt dadurch zustande, daß sie um knappe Markenkopien auf ihren gemeinsamen Eingangsstellen oder um knappe Markenkapazitäten ihrer gemeinsamen Ausgangsstellen konkurrieren.

40) Die Adäquanz der Alternativenrepräsentation klingt auch bei PAGNONI (1990), S. 163, an: "... making decisions ... is supported in a *natural way*" (kursive Hervorhebung durch den Verf.).

41) Ein solcher Spezialfall betrifft z.B. Vorgänge, für deren Ausführung neben einem frühest möglichen Startzeitpunkt noch mindestens ein späterer, aber ebenso zulässiger Startzeitpunkt existiert. Die Auswertungsalgorithmen der Netzplantechnik beruhen im allgemeinen auf dem Konzept der "Universal-Mindestlösung". Ihr zufolge wird jede Vorgangsausführung zum frühest möglichen Startzeitpunkt begonnen. Vgl. z.B. GEWALD (1972), S. 28. Nur wenn dies zu Verletzungen von Kapazitätsrestriktionen führt, werden die Startzeitpunkte so weit in die Zukunft verschoben, daß keine Restriktion verletzt ist. Ein Hinauszögern von Vorgangsausführungen unabhängig von Restriktionsverletzungen ist dagegen unüblich. Es kann zwar durchaus im Rahmen der Netzplantechnik berücksichtigt werden. Doch dominiert weithin das Lösungskonzept, stets die frühest möglichen Startzeitpunkte zu wählen. Für das Petrinetz-Konzept ist die Benutzung eines Lösungskonzepts überhaupt nicht dokumentiert. Dort steht vielmehr die Permissivität der Schaltregel im Vordergrund. Sie bedeutet, daß eine aktivierte Transition schalten kann, aber nicht schalten muß. Aufgrund dieses permissiven Charakters stellt das Hinauszögern von Vorgangsausführungen bei der Verwendung von Petrinetzen eine durchaus "gewöhnliche" Option dar. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Vorgänge durch die Netzkonstrukte für die Repräsentation atomarer Prozesse modelliert werden. Dann lassen sich die Ausführungen der modellierten Vorgänge dadurch hinausschieben, daß mit dem Schalten der konstrukt-spezifischen Starttransitionen trotz ihrer Aktivierung gewartet wird. Solche verzögerten Vorgangsausführungen bzw. Schaltakte erlangen z.B. Bedeutung, wenn die Abwicklung von Produktionsaufträgen aus dem Blickwinkel möglichst geringer Kapitalbindungskosten modelliert werden soll. Dabei kann es wirtschaftlich vorteilhaft sein, Bearbeitungsvorgänge, die zu zusätzlicher Kapitalbindung führen, so spät wie möglich zu beginnen. Allerdings räumt der Verf. ein, daß der zuvor skizzierte Spezialfall verzögerter Vorgangsausführungen allenfalls eine "weiche" Argumentation zugunsten der Modellierungsgüte von Petrinetzen darstellt. Denn es wurde schon darauf hingewiesen, daß die Netzplantechnik keineswegs auf die Universal-Mindestlösung fixiert ist. Daher läßt sich nur das unscharfe Urteil treffen, daß das "vorherrschende" Denkmuster der Netzplantechnik von Ausführungsverzögerungen tendenziell weiter entfernt ist als die permissive Schaltcharakteristik von Petrinetzen. Vgl. zu weiteren Spezialfällen den letzten Abschnitt dieses Kapitels.

42) Das gilt z.B. für das Kriterium der Auswertungshomogenität.

43) Vgl. zur Kapazitätsplanung die Quellen, die bereits zur Netzplantechnik im allgemeinen und in nachfolgenden Anmerkungen zu speziellen Netzplanklassen aufgeführt wurden. Vgl. darüber hinaus DOMSCHKE (1991), S. 63ff. Dieser Beitrag befaßt sich ausschließlich mit Kapazitätsplanungen für Netzpläne und gewährt dabei einen breiten Überblick über verschiedene Planungsansätze.

44) Vgl. z.B. die "zusätzlich ... kapazitiv bedingten ... Reihenfolgebedingungen" bei ALTROGGE (1979), S. 141 (kursive Hervorhebung des Originals hier unterlassen). Vgl. ebenso DOMSCHKE (1991), S. 66 (erste Verfahrensvariante).

Die zusätzlichen Anordnungsbeziehungen spielen allerdings nur dann eine Rolle, wenn versucht wird, die Netzpläne mit den üblichen netzplanspezifischen Planungsmethoden auszuwerten. Zusätzliche Anordnungsbeziehungen werden dagegen nicht erforderlich, wenn die Netzpläne ausschließlich als mathematische Graphen behandelt und in OR-Programme transformiert werden. In den OR-Programmen lassen sich knappe Kapazitäten ohne Schwierig-

keiten als gewöhnliche Restriktionen erfassen. Vgl. dazu die Ausführungen zur Kapazitätsplanung bei DOMSCHKE (1991), S. 65ff. (mit zahlreichen Varianten für netzplanrepräsentierende OR-Programme). Hier interessieren aber nur Netzpläne in ihrer graphisch visualisierten Form. Denn nur diese Visualisierungsform hat dazu motiviert, Netzpläne mit Petrinetzen zu vergleichen. Daher wird die Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen in netzplanrepräsentierenden OR-Programmen an dieser Stelle nicht weiter beachtet. Vgl. auch die inhaltlich übereinstimmende Kritik von HENNICKE (1991), S. 59, an VERT-Netzplänen. Er lehnt diese Netzplanklasse ab, weil sich ihre Netzpläne nur noch durch mathematische Formelsysteme erfassen lassen, jedoch keine Veranschaulichung durch (visualisierte) Graphen erlauben. Darüber hinaus scheitert die praktische Auswertung von netzplanrepräsentierenden OR-Programmen oftmals daran, daß ihre immense Anzahl von Binärvariablen und zeitabhängig ausgedrückten Kapazitätsrestriktionen rechentechnisch nicht mehr bewältigt wird. Vgl. DOMSCHKE (1991), S. 66.

45) Andere typische Artefakte von Netzplänen stellen die "Scheinvorgänge" dar, die bereits angesprochen wurden. Allerdings beeinträchtigen Scheinvorgänge nicht generell die Modellierungsgüte der Netzplantechnik. Denn sie gehören nur in der Klasse der Vorgangskantennetzpläne - wie z.B. in CPM-Netzplänen - zu den unvermeidlichen Netzkonstrukten.

46) Vgl. dazu "Rechtsverschiebung" von Vorgängen bei NEUMANN,K. (1975b), S. 311(ff.); ALTROGGE (1979), S. 141ff.; MEYER,M. (1985), S. 136ff.

47) Damit wird lediglich ausgedrückt, daß die verfügbare Kapazität zunächst als eine reine Mengengröße definiert ist. Es wird jedoch nicht verkannt, daß eine solche Mengenangabe auf dasjenige Zeitintervall bezogen werden muß, in dem die angegebene Menge von Kapazitätseinheiten zur Verfügung steht. Dieses Zeitintervall spielt aber für die hier betrachtete kurzfristige Prozeßplanung und -steuerung keine Rolle. Denn die Mengenangaben aller knappen Kapazitäten werden implizit auf dasselbe Zeitintervall des Koordinierungszeitraums bezogen. Nur in diesem *speziellen* Sinne der Irrelevanz des Zeitbezugs wird oben von zeitunabhängig definierten knappen Kapazitäten gesprochen. Vgl. dagegen zur *allgemeinen* produktionswirtschaftlichen Bedeutung, die dem Zeitbezug von Kapazitätsdefinitionen zukommt, KERN,W. (1962a), S. 27(ff.); KERN,W. (1990a), S. 21ff.

48) Die nachfolgende Argumentation wird nur der Deutlichkeit halber auf den Spezialfall der kollisionsfreien Roboterkoordinierung bezogen. Sie läßt sich auch inhaltlich verallgemeinern: Die Argumentation trifft analog auf alle Koordinierungsprobleme zu, in denen es gilt, die Aktivitäten von *mehreren lose gekoppelten* Agenten aufeinander abzustimmen. Ein solches Multiagentensystem zeichnet sich durch zwei gegensätzliche Aspekte aus: Einerseits können seine Agenten (teil-)autonom operieren. Andererseits hängen sie insofern voneinander ab, als sie für ihre Operationen um eine gemeinsam benötigte, aber knappe Ressource konkurrieren. Einige der Möglichkeiten, bei der Koordinierung von Multiagentensystemen auf das Petrinetz-Konzept zurückzugreifen, wurden schon skizziert. Ebenso wurde schon auf die konzeptionelle Verwandtschaft zwischen Petrinetzen und lose gekoppelten Systemen hingewiesen. Dagegen legt FREEDMAN (1988b), S. 333, dar, daß die Netzplantechnik bei der Koordinierung von Agenten (Industrierobotern) scheitert, die zwar um einen gemeinsamen knappen Ressource (Arbeitsraum) konkurrieren, deren Operationen aber keinen "strengen" Präzedenzbeziehungen unterliegen.

49) Dies läßt sich auch mit der Hilfe einer Kapazitätsrestriktion ausdrücken: Jedes Volumenelement des Arbeitsraums besitzt die Kapazität, in jedem Zeitpunkt die Anwesenheit von höchstens einem Robotereffektor zuzulassen.

50) Dies folgt schon aus der kombinatorischen Explosion der Anzahl aller Volumenelemente, die für jede eingeplante Effektoroperation berücksichtigt werden müßte. Entsprechend würde auch die Anzahl artifizierlicher Präzedenzbeziehungen über jedes praktisch bewältigbare Ausmaß hinaus anwachsen.

51) Vgl. FREEDMAN (1988b), S. 333.

52) Vgl. dazu die Koordinierungsmodelle bei FREEDMAN (1988b), S. 339ff.

53) Wie diese Modellierung verwirklicht wird, braucht hier nicht im Detail beschrieben zu werden. Vgl. statt dessen die Quellen aus der voranstehenden Anmerkung. Z.B. beruht ein Modellierungsansatz darauf, alle Volumenelemente des Arbeitsraums, in denen die Robotereffektoren kollidieren könnten, durch jeweils eine Stelle mit der Markenzkapazität "Eins" zu repräsentieren. Jede Effektoroperation, deren Trajektorie durch ein solches Volumenelement führt, wird durch eine Transition modelliert, die bei ihrem Schalten auf der Stelle des Volumenelements eine Markenkopie ablegt. Wegen der beschränkten Markenzkapazität der Stelle des Volumenelements können niemals zwei Transitionen, deren Effektoroperationen dasselbe Volumenelement durchkreuzen würden, zugleich schalten. Auf diese Weise läßt sich sicherstellen, daß niemals zwei Effektoroperationen kollidieren. Eine ähnliche Konstruktion findet sich bei FREEDMAN (1988b), S. 336. Dort wird allerdings in komplementärer Weise mit Stellen für Volumenelemente gearbeitet, die genau dann markiert sind, wenn sich in den Volumenelementen aktuell keine Effektoren befinden.

54) Vgl. zu einem Überblick über die Verschiedenartigkeit dieser Algorithmen z.B. NEUMANN,K. (1975b), S. 205f., 227f. u. 251ff. (Zeitplanungen), S. 260ff. (Kostenplanungen) sowie S. 307ff. (Kapazitätsplanungen); SCHWARZE,J.

(1983), S. 54ff. u. 92ff.; MEYER, M. (1985), S. 93ff. (Zeitplanungen), 119ff. (Kostenplanungen) u. 134ff. (Kapazitätsplanungen); SCHWARZE, J. (1990), S. 123, 126 u. 172f.; RABETGE (1991), S. 114ff. u. 131ff.

55) Daran zeigt sich abermals, daß die oben bemängelte atemporale, rein kausale Ausrichtung des Petrinetz-Konzepts durchaus als Positivum betrachtet werden kann. Zwar geht durch diese Ausrichtung der Spezialisierungsvorteil der Netzplantechnik verloren, zeitbezogene Auswertungen von Netzen als Terminplanungen relativ effizient verwirklichen zu können. Doch bedeutet gerade der Verzicht auf eine temporal spezialisierte Netzstruktur, daß den zeitbezogenen Determinanten des zu modellierenden Objekts keine Vorrangstellung mehr eingeräumt wird. Solche Determinanten werden in der gleichen Weise ausgewertet wie alle anderen, atemporalen Determinanten. Termin-, Kapazitäts- und Kostenplanungen verschmelzen daher zu variablen Anwendungsformen eines einheitlichen Auswertungsalgorithmus für Erreichbarkeitsgraphen von Petrinetzen. Bei der Auswertung von Netzplänen schlägt dagegen der Spezialisierungsvorteil effizienter Terminplanungen nachträglich in einen Spezialisierungsnachteil um, wenn Kapazitäts- oder Kostenplanungen ausgeführt werden sollen. Denn für diese alternativen Auswertungszwecke müssen andersartige Auswertungsalgorithmen eingeführt werden. Dies ist bei Petrinetzen wegen ihrer Auswertungshomogenität nicht erforderlich. Allerdings ist durch die Identifizierung solcher vor- und nachteilhaften Spezialisierungswirkungen noch keine Aussage darüber getroffen, welche der entgegengesetzten Wirkungsrichtungen insgesamt überwiegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird auch keine abschließende Antwort auf diese Frage angestrebt. Vgl. dazu das Effizienzargument aus der anschließenden Anmerkung und seine Offenheit infolge mangelhafter Stringenz.

56) Zugunsten der Auswertungshomogenität kann ein Effizienzargument angeführt werden: Anstatt (mindestens) drei verschiedenartige Auswertungsalgorithmen für Termin-, Kapazitäts- und Kostenplanungen entwickeln und implementieren zu müssen, reicht es aus, über nur einen Algorithmus für die Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen zu verfügen. Allerdings erweist sich dieses Effizienzargument nicht als stringent. Einerseits ist es durchaus möglich, daß die Entwicklung und Implementierung des einen homogenen Auswertungsalgorithmus für Erreichbarkeitsgraphen weitaus ressourcenintensiver ist als die entsprechende Erarbeitung von drei spezialisierten Auswertungsalgorithmen für Termin-, Kapazitäts- und Kostenplanungen. Andererseits betrachtet das Effizienzargument nur den Entwicklungs- und Implementierungsaufwand von Auswertungsalgorithmen. Dagegen übersieht es den Aufwand, der für Anwendungen eine Algorithmus auf konkrete Auswertungsprobleme anfällt. Daher kann keineswegs ausgeschlossen werden, daß der eine homogene Auswertungsalgorithmus für Erreichbarkeitsgraphen von Petrinetzen bei seiner Anwendung weitaus mehr Informationsverarbeitungsressourcen bindet, als es für die Anwendungen der spezialisierten Auswertungsalgorithmen der Termin-, Kapazitäts- und Kostenplanungen im Rahmen der Netzplantechnik erforderlich ist. In diesem Zusammenhang wird daran erinnert, daß auf die Effizienzprobleme der Erreichbarkeitsanalyse von Netzmodellen schon hingewiesen wurde. Aufgrund der voranstehend skizzierten Vorbehalte gegenüber dem Effizienzargument räumt der Verf. ein, daß die Auswertungshomogenität kein zwingendes Kriterium für die Güte von Modellierungskonzepten darstellt.

57) Das Petrinetz-Konzept erweist sich noch in einer weiteren Hinsicht als offen. Seine Auswertung beruht - zumindest in der hier vorgelegten Ausarbeitung - im wesentlichen auf der Erreichbarkeitsanalyse. Die Erreichbarkeitsanalyse beruht auf der Suche nach ausgezeichneten Lösungen in einem abstrakten Suchraum, der durch den Erreichbarkeitsgraphen für das jeweils vorgegebene Auswertungsproblem aufgespannt wird. Eine solche Suche stellt ein sehr allgemeines Konzept dar, in dem sich Beiträge der Graphentheorie, der Kombinatorik und der Erforschung Künstlicher Intelligenz überschneiden. Das erlaubt die befruchtende Einkopplung von Erkenntnissen, die im Rahmen der vorgenannten Disziplinen für die Lösung von Suchproblemen erarbeitet wurden. Vgl. dazu die Ausführungen zur Auswertung von Erreichbarkeitsgraphen. Zwar kommt diese Offenheit gegenüber der Einkopplung von Erkenntnissen anderer Disziplinen auch der Netzplantechnik zu. Denn ihre Auswertungsalgorithmen können ebenso als Suchen in abstrakten Suchräumen formuliert werden. Vgl. ZELEWSKI (1986a), S. 672f. Doch ist die Konzeptoffenheit der Netzplantechnik weniger deutlich ausgeprägt als beim Petrinetz-Konzept. Während die Erreichbarkeitsgraphen unmittelbar die Struktur von Suchräumen erkennen lassen, ist dies für Netzpläne nicht der Fall. Ihre Auswertungsalgorithmen beruhen zunächst auf lokalen Extremierungsoperationen, die sukzessiv auf alle Netzknoten angewendet werden. Es liegt nicht unmittelbar auf der Hand, daß sich solche Algorithmen in leistungsäquivalente Suchalgorithmen transformieren lassen.

58) Allerdings wird nicht verkannt, daß im Kontext der Netzplantechnik auch Ansätze zur *zusätzlichen* Einbeziehung von Zahlungsgrößen existieren. Dazu gehören vor allem die Arbeiten von MATTHES, die sich mit Produktionsfunktionen vom Typ "F" befassen. Gleiches gilt für seine Beiträge zur integrierten Einzelprozeßrechnung, die den Ansatz der F-Produktionsfunktionen konzeptionell ausweiten, zugleich aber auch den Bezug zur Netzplantechnik in den Hintergrund treten lassen. Vgl. zu den vorgenannten zahlungsorientierten Fortentwicklungen von Netzplänen MATTHES, W. (1979a), Sp. 1335 u. 1338; MATTHES, W. (1979b), S. 11ff., insbesondere S. 18ff.; MATTHES, W. (1983), S. 18ff., insbesondere S. 35ff.; MATTHES, W. (1985c), S. 6ff. Diese zahlungsorientierten Erweiterungen führen jedoch zu einer erheblichen Steigerung der Netzplankomplexität (vgl. dazu die vorgenannten Quellen). Daher erlauben sie - im Gegensatz zu Petrinetzen - keine problemlose Einbeziehung von zusätzlichen Liquiditätsgrößen. Dagegen bereitet es keine Schwierigkeiten, in Netzplänen Liquiditätsgrößen *anstelle* von Kosten zu berücksichtigen;

vgl. z.B. GEWALD (1974), S. 103ff.; MATTHES, W. (1979a), Sp. 1334f. (distanziert); RUSSELL, R.A. (1986), S. 1291ff.; SCHWARZE, J. (1990), S. 235f. Dies ist aber trivial. Denn es erfolgt keine Netzplanerweiterung um eine neuartige Einflußgröße. Statt dessen wird nur eine alte durch eine neue Einflußgröße *substituiert*.

59) Darauf wird auch beim Vergleich zwischen OR-Programmen und Petrinetzen nochmals eingegangen.

60) Damit sind Netzpläne gemeint, denen eine horizontale Gliederung in verschiedenartige Netzplan-Module fehlt.

61) Flache Netzpläne besitzen keine vertikale Gliederung.

62) Natürlich läßt sich jeder homogene Netzplan dadurch horizontal gliedern, daß er an beliebigen Knoten oder Kanten "zerschnitten" wird. Die resultierenden Teilnetzpläne können als "Module" bezeichnet werden. Diese Art der "modularen" Zerlegung ist immer möglich. Sie interessiert hier aber nicht weiter. Denn der Gesamtnetzplan behält weiterhin seinen homogenen Charakter. Seine "Module" bleiben aufgrund der willkürlichen Segmentierung *gleichartig*. Kein Teilnetz unterscheidet sich von einem anderen Teilnetz in irgendeiner "wesentlichen" Weise, die von einer zugrundeliegenden Modularisierungsstrategie bestimmt wäre. Daher wird hier erst dann von der modularen Zerlegung eines Modell gesprochen, wenn *verschiedenartige* Module gewonnen werden und die Modularten durch die Zerlegungsstrategie wohlbestimmt sind. Eine Andeutung der modularen Zerlegung von Netzplänen findet sich bei KERN, W. (1987), S. 100f. als "Dekomposition ... in ... Subprojekte" (Fettdruck des Originals hier unterlassen); vgl. auch KERN, W. (1969b), S. 68. Allerdings bleiben dort die Art der Module (Subprojekte) und die Vorgehensweise bei der Netzplansegmentierung offen. Gleiches gilt für die Zerlegung von Netzplänen in Teilnetzpläne bei WEBER, K. (1968), S. 237; GROBE-OETRINGHAUS (1977), S. 55f.; MATTHES, W. (1979a), Sp. 1338; REFA (1985e), S. 85 ("Gegliedertes Feinnetzplan").

Systematische Beschreibungen der Zerlegung von umfangreichen Netzplänen in Teilnetzpläne bieten dagegen PARIKH (1965), S. 444ff.; LÜTTGEN (1966), S. 92ff.; SCHWARZE, J. (1970), S. 193; NEUMANN, K. (1975b), S. 207ff.; SCHWARZE, J. (1983), S. 64ff.; SCHWARZE, J. (1990), S. 69ff. (dort aber nur informal skizziert). Doch die resultierenden Teilnetzpläne besitzen den eingangs erwähnten homogenen Charakter. Sie unterscheiden sich in materieller Hinsicht überhaupt nicht. Darüber hinaus bleibt es im allgemeinen unbestimmt, nach welchen Kriterien ein Netzplan in wie viele und welche Teilnetzpläne zerlegt werden sollen. Nur bei PARIKH (1965), S. 444f. (Fn. 1); SCHWARZE, J. (1983), S. 65, liegt der Teilnetzbildung ein präzises Segmentierungskriterium zugrunde. Es ist allerdings nur in formaler Weise spezifiziert, so daß auf materielle Eigenarten des jeweils modellierten Realproblems kein Bezug genommen wird. NEUMANN, K. (1975b), S. 210, stellt dagegen resignativ fest: "Eine allgemeine Regel für eine besonders zweckmäßige Zerlegung eines vorgegebenen Netzplanes in Teilnetzpläne läßt sich nicht angeben." Ähnlich äußert sich LÜTTGEN (1966), S. 93: "Die Aufspaltung des Hauptnetzes darf ... völlig willkürlich und beliebig erfolgen ...", sofern das formale Segmentierungskriterium überschneidungsfreier Teilnetze eingehalten wird.

63) Die Projektabhängigkeit beruht zumeist auf einer losen Kopplung durch Ressourcen, die von mehreren Projekten zugleich für ihre Abwicklung benötigt werden. Auf ein spezifisches Konzept lose gekoppelter Systeme wurde bereits in einer früheren Anmerkung hingewiesen.

64) Vgl. dazu die Kritik von STEINBERG (1980), S. 69f. Dort wird die Ansicht vertreten, "traditionelle" Netzpläne - gemeint sind PERT-Netzpläne - seien für die Multiprojektplanung ungeeignet, weil sie keine Ressourcenzugriffskonflikte aufzulösen vermögen.

Allerdings ist mittlerweile ein bemerkenswerter Ansatz präsentiert worden, der auf die Bewältigung solcher Ressourcenzugriffskonflikte in Produktionssystemen spezialisiert ist. Es handelt sich um das Konzept der CPM/MRP-Netzpläne. Es kombiniert konventionelle CPM-Netzpläne mit dem ebenso traditionellen, vor allem in den USA verbreiteten MRP-Konzept der Materialbereitstellungsplanung (MRP steht für: Material Requirements Planning). Das Kombinationsergebnis liefert aber einen neuartigen Zugang der Netzplantechnik zur Modellierung von Problemen, bei denen der konfliktionäre Zugriff mehrerer Vorgänge auf mehrere verschiedenartige Ressourcen koordiniert werden muß. Vgl. zu näheren Darstellungen von CPM/MRP-Netzplänen AQUILANO (1980), S. 57ff.; HEIZER (1988), S. 675ff.

Trotz ihrer Modellierung von Ressourcenzugriffskonflikte eignen sich CPM/MRP-Netzpläne aber noch nicht für Zwecke der Multiprojektplanung. Denn auch sie bleiben darauf beschränkt, die Abwicklung von genau einem Projekt zu planen. Die simultane Koordinierung mehrerer Projekte wird dagegen auch bei CPM/MRP-Netzplänen nicht berücksichtigt.

65) RAMPS steht für: Ressource Allocation and Multi-Project Scheduling. Vgl. zu RAMPS-Netzplänen CEIR (o.J.), S. 1-1ff.; LAMBOURN (1963), S. 300ff.; MOSHMAN (1963), S. 17ff.; WEBER, K. (1968), S. 243; KERN, W. (1969b), S. 67f. u. 75; ZIMMERMANN, H. (1971), S. 103f.; GEWALD (1972), S. 120ff.; WHITEHOUSE (1973), S. 97; HAX, H. (1974), S. 190.

66) Dies wird dadurch unterstrichen, daß in den Überblickswerken zur Netzplantechnik die RAMPS-Netzpläne kaum beachtet wird. Ebenso wenig werden andere Netzplanklassen intensiver behandelt, die zu einer Multiprojektplanung in der Lage sind. Immerhin werden von KERN, W. (1967), S. 169 u. 171; VOLLMANN (1984), S. 418 u. 420;

REFA (1985e), S. 87; KERN, W. (1987), S. 100, und KERN, W. (1990a), S. 313, Multiprojektplanungen als Objekte der Netzplantechnik explizit angesprochen.

Zwar existieren im Rahmen der Netzplantechnik - über das RAMPS-Konzept hinaus - mehrere Beiträge, die sich speziell mit Multiprojektplanungen befassen. Vgl. dazu GEWALD (1972), S. 59ff.; STEINBERG (1980), S. 69ff.; SPERANZA (1991), S. 191ff. Doch entfernen sich diese Multiprojektplanungen sehr weit vom konventionellen Verständnis der Netzplantechnik. Denn sie teilen mit ihr nur noch die Basis, Projekte als Graphen darzustellen. Diese Graphen werden aber lediglich als *mathematische* Graphen behandelt. Sie werden von vornherein in OR-Programme umgesetzt. Damit geht die charakteristische Anschaulichkeit von Netzplänen verloren, die im wesentlichen auf ihrer Verwendung von *visualisierten* Graphen beruht. Die Einschränkung auf mathematische Graphen wird übrigens auch bei den RAMPS-Netzplänen vollzogen.

67) Die herausragende Rolle, die Aktivierungs- oder Schaltkonflikte im Rahmen des Petrinetz-Konzepts spielen, wurde bereits im Kontext von Stelle/Transition-Netzen dargelegt.

68) Vgl. dazu die Anmerkungen zu Konfliktstrategien.

69) Das unterstreicht nochmals die oben erwähnte Auswertungshomogenität des Petrinetz-Konzepts.

70) *Unsystematische* Skizzen für die hierarchische Über- und Unterordnung mehrerer Netzpläne finden sich dagegen öfter; vgl. z.B. ZIMMERMANN, H. (1971), S. 102; GROBE-OETRINGHAUS (1977), S. 56 u. 58; REFA (1985e), S. 82ff.; SCHWARZE, J. (1990), S. 71f.; HENNICKE (1991), S. 34ff. (distanziert); vgl. auch die verbale Andeutung bei KERN, W. (1969b), S. 68.

Es existieren zwar einige wenige Ausnahmen, die eine systematische Verfeinerung von hierarchisch strukturierten Netzplänen gestatten; vgl. z.B. ANCONA (1982), S. 170ff., insbesondere S. 172, und HENNICKE (1991), S. 70ff. Diese Ansätze haben aber bisher in die "etablierten" Abhandlungen zur Netzplantechnik keinen Eingang gefunden. Ebenso kritisiert HENNICKE (1991), S. 35f. u. 73f., die üblichen hierarchischen Netzpläne. Er wirft ihnen mangelhafte Systematik und weitere Unzulänglichkeiten vor. Darüber hinaus stellt er fest, daß die hierarchischen Netzpläne vornehmlich nur zur übersichtlichen Visualisierung (S. 35: "graphischen Wiedergabe") von umfangreichen Projekten verwendet werden. Für projektbezogene Berechnungen eigneten sich die hierarchischen Netzpläne dagegen kaum (S. 36 u. 73f.). Dies liege einerseits daran, daß der wechselseitige Zusammenhang der Teilnetzpläne über die verschiedenen Hierarchieebenen hinweg zumeist nicht präzise definiert ist. Andererseits fehle den hierarchischen Netzplänen eine konsequente Einbettung in eine der vorherrschenden Netzplanklassen. Daher bestehen erhebliche Schwierigkeiten, die Auswertungstechniken konventioneller Netzpläne auf hierarchische Netzpläne zu übertragen.

71) Darüber hinaus empfehlen SPERANZA und VERCELLIS eine dritte systematische Vergrößerungsvariante. Sie betrifft jedoch ausschließlich den Spezialfall von Multiprojektplanungen. Dafür wird eine zweistufige Netzplanhierarchie vorgeschlagen: Feine Netzpläne repräsentieren jeweils ein Projekt. Ein Grobnetzplan gibt den Zusammenhang aller Projekte wieder. Zu diesem Zweck wird jeder Knoten im Grobnetzplan als eine Makroaktivität aufgefaßt, die genau einem Projekt entspricht. Vgl. dazu die detaillierten Erläuterungen und mathematischen Präzisierungen bei SPERANZA (1991), S. 194 u. 197ff. Dieser Ansatz wird hier jedoch nicht weiterverfolgt, weil die Vergrößerungsstrategie auf zwei Hierarchiestufen und den Spezialfall von Multiprojektplanungen beschränkt bleibt.

72) Vgl. zur Verwendung von "Meilensteinen" in Netzplänen SCHWARZE, J. (1970), S. 718f. u. 721; ZIMMERMANN, H. (1971), S. 105f.; WILLE (1972), S. 73; DER BUNDESMINISTER DER VERTEIDIGUNG (1975), S. 0-9, 0-11ff. u. 1-44; GROBE-OETRINGHAUS (1977), S. 56ff.; SCHWARZE, J. (1983), S. 14 u. 62; REFA (1985e), S. 84; ZIMMERMANN, G. (1988), S. 282; SCHWARZE, J. (1990), S. 61ff., 73, 75 u. 120; DOMSCHKE (1990), S. 74; SPERANZA (1991), S. 191; HENNICKE (1991), S. 36.

Meilensteine werden allerdings im Rahmen der Netzplantechnik nicht unbedingt zu Vergrößerungszwecken verwendet. Mitunter dienen sie auch anderen Aufgaben; vgl. z.B. ZIMMERMANN, H. (1971), S. 105 (Festlegung von Fixterminen).

73) Vgl. zur vergrößernden Verdichtung von Netzplänen PARIKH (1965), S. 450ff.; LÜTTGEN (1966), S. 96ff.; SCHWARZE, J. (1983), S. 73; REFA (1985e), S. 84f.

74) Vgl. LÜTTGEN (1966), S. 96ff., insbesondere Bild 8 auf S. 99; REFA (1985e), S. 85, Bild 15/62: "Gegliedertes Feinnetzplan" versus "Grobnetzplan".

75) Eine weitere Variante stellt die Verwendung von hierarchisch verfeinerten Kanal/Instanz-Netzen dar, die an früherer Stelle behandelt wurde. Auch ihr flexibler Umgang mit natürlichsprachlichen Netzanschriften findet seitens der Netzplantechnik keine Entsprechung.

76) Die einfache Abstraktionstechnik der Meilenstein-Netzpläne steht auch in Petrinetzen zur Verfügung. Denn jedes Ereignis eines Netzplans kann in einem korrespondierenden Petrinetz als eine Transition erfaßt werden. Meilenstein-Ereignisse finden sich daher in einem Petrinetz als "Meilenstein-Transitionen" wieder. Auch solche Transitionen können durch Ausblenden aller anderen Transitionen hervorgehoben und in einem "Meilenstein-Petrinetz" zusammengefaßt werden. Dabei ist allerdings zu beachten, daß wegen des Wegfalls von Nichtmeilenstein-Transi-

tionen Makrostellen gebildet werden müssen, welche die vernachlässigten Nichtmeilenstein-Transitionen zusammen mit ihren inzidenten Stellen umfassen.

77) Vgl. zu Netzmorphismen FERNANDEZ (1975), S. 2f.; PETRI,C. (1979c), S. 83f.; SHAPIRO,R. (1979), S. 109 u. 111ff.; OBERQUELLE (1979a), S. A.1; GENRICH (1980b), S. 522ff.; CHRISTODOULAKIS (1982), S. 117; REISIG (1983a), S. 312(ff.); MONTANARI (1989), S. 11f.; MARTI-OLIET (1989), S. 318ff.; FEHLING (1990a), S. 4ff. u. 14ff.

Die Netzmorphismen bilden eine bemerkenswerte Schnittstelle zwischen dem Petrinetz-Konzept einerseits und GOGUEN's allgemeinen Systemkonzept andererseits. Das allgemeine Systemkonzept, das GOGUEN auf der Basis der mathematischen Kategorientheorie errichtet hat, wurde schon erwähnt. Eine Kategorie läßt sich informal definieren als eine Klasse von Modellen für gleichartige Systemstrukturen zusammen mit allen strukturerhaltenden Abbildungen; vgl. GINALI (1978), S. 258. Die Abbildungen sind so festgelegt, daß ihre Anwendung auf Modelle aus der kategoriedefinierenden Modellklasse immer wieder zu Modellen aus derselben Klasse führt. Solche strukturerhaltenden Abbildungen heißen Morphismen. Jede Kategorie kann als ein monopartiter gerichteter Graph dargestellt werden. Seine Knoten sind die Modelle aus der kategoriedefinierenden Modellklasse. Seine Kanten bestehen aus den Morphismen, welche die Modelle aufeinander abbilden. Vgl. zu dieser graphischen Repräsentation einer Kategorie BANDLER (1978), S. 244f.; GINALI (1978), S. 258. In analoger Weise lassen sich Netzmorphismen verwenden. Dann werden alle Netze, die durch eine ausgezeichnete Gruppe von Netzmorphismen aufeinander abgebildet werden können, zu einer Klasse strukturgleicher Netze zusammengefaßt. Die Netzmorphismen stellen dann strukturerhaltende Abbildungen zwischen den klassenzugehörigen Netzen dar. Der Zusammenhang zwischen den Netzen und ihren Netzmorphismen läßt sich wiederum durch einen monopartiten gerichteten Graphen repräsentieren. Seine Knoten sind die Netze und seine Kanten die Netzmorphismen. Daher können solche Ensembles aus Netzen und ihren Netzmorphismen als spezielle Ausprägung einer abstrakten mathematischen Kategorie aufgefaßt werden. Vgl. zur vertiefenden Einbettung von Netzen und Netzmorphismen in den Kontext der mathematischen Kategorientheorie MONTANARI (1989), S. 7f. u. 10ff.; MARTI-OLIET (1989), S. 315ff., insbesondere S. 318ff.

Netzmorphismen besitzen aber auch "handfeste" Anwendungsmöglichkeiten. Auf eine von ihnen wurde in dieser Arbeit zurückgegriffen. Es handelt sich um die Verknüpfung von Teilnetzen durch gemeinsame Synchronisations- oder Schnittstellen. Diese Art der Teilnetzverknüpfung beruht auf einem Netzmorphismus. Vgl. dazu die verblüffend einfache Darstellung bei GENRICH (1980b), S. 523, Fall 2.5 (2).

78) Die Netztheorie besteht aus einem Komplex von Aussagen über die Definition von Petrinetzen, über die Eigenschaften einzelner Petrinetze sowie über die Beziehungen zwischen verschiedenen Petrinetzen. Seitens der Petrinetz-Forschung hat sich eine Zweiteilung der Netztheorie etabliert: Zumeist wird zwischen der Allgemeinen und der Speziellen Netztheorie unterschieden. Diese interne Differenzierung der Netztheorie setzte zu Beginn der siebziger Jahre mit der Herausbildung der Allgemeinen Netztheorie ein; vgl. PETRI,C. (1977a), S. 140; PETRI,C. (1979c), S. 81; PETRI,C. (1980a), S. 3.

Im Rahmen der Allgemeinen Netztheorie wird untersucht, welche gemeinsamen Eigenschaften einer Klasse von Petrinetzen zukommen und welche Beziehungen zwischen den Petrinetzen aus derselben Netzklasse bestehen. Vgl. zur Allgemeinen Netztheorie PETRI,C. (1977a), S. 140; PETRI,C. (1979c), S. 81; PETRI,C. (1980a), S. 3; DEGLI ANTONI (1980a), S. 7ff.; ROSENSTENGEL (1991), S. 2. Zur Zeit widmen sich die Arbeiten im Bereich der Allgemeinen Netztheorie noch vornehmlich der Aufgabe, die oben erwähnten Netzmorphismen zu erforschen. Darüber hinaus erheben ihre Vertreter aber einen beachtlichen programmatischen Anspruch. Sie möchten die Allgemeine Netztheorie in den Rang einer allgemeinen System- und Modelltheorie erheben. Vor diesem Hintergrund werden zwei Postulate herausgestellt. Erstens könne *jedes beliebige* System hinsichtlich seiner Struktur durch ein Petrinetz als Systemmodell "adäquat" repräsentiert werden. Zweitens sei es möglich, alle nicht-strukturellen Aspekte der repräsentierten Systeme durch natürlich- oder formalsprachliche Beschriftungen von Netzkomponenten zu erfassen. Vgl. zu dem vorgenannten programmatischen Anspruch und seinen beiden Postulaten GENRICH (1981), S. 109f.; OBERQUELLE (1980), S. 483. Vgl. auch zur Charakterisierung der Netztheorie als eine allgemeine Systemtheorie HERZOG,O. (1973), S. 3; EGGERT (1978), S. 39; DE CINDIO (1983b), S. 41. Die Programmatik der Allgemeinen Netztheorie ist allerdings umstritten. So vertritt DEGLI ANTONI (1980a), S. 7, die Überzeugung, das erste Postulat der Allgemeinen Netztheorie wäre schon derzeit experimentell weitgehend erfüllt. Die bereits vorgelegten Netzmodelle bestätigten die Modellierbarkeit beliebiger Systemstrukturen hinreichend. OBERQUELLE (1980), S. 483, äußert sich dagegen in entgegengesetzter Weise: Zur Zeit sei der umfassende Modellierungsanspruch der Allgemeinen Netztheorie noch nicht erfüllt. Sie bedürfe daher noch der inhaltlichen Fortentwicklung. Eine Position, die zwischen den beiden vorgenannten Antipoden vermittelt, hat schon vor längerer Zeit HOLT vertreten. Er konstatiert bei den Anwendern der Netztheorie, die sich mit deren Modellierungspotential intensiv auseinandergesetzt haben, einen skeptisch-verhaltenen bis euphorischen Optimismus, die programmatischen Ansprüche auch tatsächlich einlösen zu können (vgl. HOLT,A. (1975d), S. 162). Allerdings räumt er zugleich ein, daß die verfügbaren mathematischen, computertechnischen und physikalischen Instrumente für die Beschreibung und Analyse der Wirkungsmechanismen in komplexen Systemen noch nicht ausreichen (vgl. HOLT,A. (1976), S. 141). Zugleich gibt er der Hoffnung Ausdruck, daß die Petrinetz-Theorie diese Kluft zu späterer Zeit schließen könne (vgl. HOLT,A. (1976), S. 141). Bis heute hat HOLT diese Ansichten nicht revidiert.

Im Gegensatz zu den hohen, aber umstrittenen Ansprüchen der Allgemeinen Netztheorie befaßt sich die Spezielle Netztheorie *nur* mit Petrinetzen. Sie versucht erst gar nicht, ihre Erkenntnisobjekte auf einen allgemeinen system- und modelltheoretischen Hintergrund zu projizieren. Statt dessen konzentriert sich die Spezielle Netztheorie auf die Definition und Analyse einzelner Netzklassen. Vgl. zu dieser Charakterisierung der Speziellen Netztheorie PETRI, C. (1977a), S. 140; PETRI, C. (1980a), S. 3. Die Spezielle Netztheorie ist im Gegensatz zu ihrem Allgemeinen Pendant weitaus intensiver erforscht. Durch die Entwicklung einer Vielzahl von alternativen Netzklassen hat sie bisher schon eine Fülle von praktisch anwendbaren Erkenntnissen hervorgebracht. Auch die Ausführungen dieser Arbeit bewegen sich nur im Argumentationsrahmen der Speziellen Netztheorie.

Mitunter wird von der hier zugrundegelegten Ausdifferenzierung der Netztheorie abgewichen. So rechnet FERNANDEZ (1975), S. 1f., der Speziellen Netztheorie nur die Beschäftigung mit Bedingung/Ereignis-Netzen zu. Die Allgemeine Netztheorie möchte FERNANDEZ dagegen auf die Auseinandersetzung mit allen anderen, komplexeren Netzklassen beziehen. FERNANDEZ spricht zwar explizit von Transitionsnetzen (transition nets). Aber er scheint inhaltlich die Klasse der Bedingung/Ereignis-Netze zu meinen. Dafür spricht u.a., daß es sich explizit auf die Repräsentation von Ereignissen und Bedingungen bezieht (S. 1).

PETERSON, J. (1981), S. 5, faßt Spezielle und Allgemeine Netztheorie unter dem Oberbegriff der "Reinen Netztheorie" zusammen. Als Gegenbegriff stellt er ihr die "Angewandte Netztheorie" gegenüber. Die "Angewandte Netztheorie" beschäftigt sich mit den Anwendungen der "Reinen Netztheorie" zwecks Erfüllung praktischer Aufgaben. Der Verf. folgt dieser Terminologie jedoch nicht. Denn er hält es für unglücklich, die Anwendungen einer Theorie selbst noch als "Theorie" bezeichnen zu wollen. Das Attribut "angewandt" vermag an diesem Sachverhalt nichts zu ändern.

79) Vgl. WILLE (1972), S. 63f.

80) Vgl. WILLE (1972), S. 61ff.; SCHWARZE, J. (1983), S. 20 u. 22; DOMSCHKE (1990), S. 79f.

Maximalfristen können zwar zunächst als positive Zeitangaben formuliert sein; vgl. z.B. SCHWARZE, J. (1983), S. 19; DOMSCHKE (1990), S. 78. Aber sie müssen spätestens bei der graphischen Repräsentation eines Netzplans in betragsgleiche, aber negative Zeitangaben transformiert werden. Denn die netzplanrepräsentierenden Graphen kennen nur genau *eine* Kantenart für die Repräsentation von Minimal- und Maximalfristen. Die Verschiedenartigkeit der beiden Fristarten kann nur dadurch ausgedrückt werden, daß die Fristbeträge ein positives bzw. negatives Vorzeichen (oder umgekehrt) erhalten. Auch die Auswertungsalgorithmen der Netzplantechnik setzen voraus, daß alle Maximalfristen durch ein negatives Vorzeichen ausgedrückt werden; SCHWARZE, J. (1983), S. 22.

81) Bei Vorgangsknoten-Netzplänen wird nur in Spezialfällen die analoge Einführung von Scheinvorgängen erforderlich; vgl. PATZAK (1975), S. 231; BARTUSCH (1988), S. 210ff. (Ergänzung von "dummy jobs").

82) Vgl. dazu die "künstliche Tätigkeit" bei WILLE (1972), S. 38f.; vgl. auch die ähnlich benutzten Scheinvorgänge für "Zentralereignisse" bei WEBER, K. (1968), S. 237.

83) Vgl. SCHWARZE, J. (1983), S. 46; DOMSCHKE (1990), S. 88, Fall (a).

84) Vgl. zur Verwendung von Scheinvorgängen in Vorgangskanten-Netzplänen HAX, H. (1974), S. 177f.; STEINHARDT (1977), S. 14; SCHWARZE, J. (1983), S. 48f.; VOLLMANN (1984), S. 436f.; DOMSCHKE (1990), S. 87ff.; SCHWARZE, J. (1990), S. 57ff.; CORSTEN (1990a), S. 384; vgl. auch speziell zu ihrer Benutzung in CPM-Netzplänen WEBER, K. (1968), S. 236; WILLE (1972), S. 36f. u. 39; HAX, H. (1974), S. 185; HÄSSIG (1979), S. 40f.; KERN, W. (1987), S. 95f.; ZIMMERMANN, G. (1988), S. 281; KERN, W. (1990a), S. 311f.

85) WEBER, K. (1968), S. 237, spricht Scheinvorgänge - in Anlehnung an FOHNDAHL - sogar explizit als "artificial tie nodes" an. Dabei bezieht er sich auf eine spezielle Anwendungsvariante von Scheinvorgängen: Sie lassen sich auch als "Bindeereignisse" zur Verknüpfung von Teilnetzplänen benutzen.

8.3.1.4 Resümee

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß zwischen Netzplänen und Petrinetzen nur scheinbar eine große Ähnlichkeit besteht. Tatsächlich handelt es sich um Modellierungskonzepte, die in vielfachen Aspekten voneinander abweichen. Bereits die Definition eines Petrinetzes ist umfassender formalisiert und gehaltvoller als die Definition eines Netzplans. Petrinetze fallen deswegen im allgemeinen wesentlich komplexer aus als Netzpläne, wenn sie zur Repräsentation des gleichen Modellierungsobjekts herangezogen werden. Dadurch erlauben Petrinetze einerseits eine formal präzisere und inhaltlich facettenreichere Objektmodellierung. Andererseits bereiten Petrinetze oftmals einen beträchtlich höheren Auswertungsaufwand als Netzpläne. Dies bestätigt die modelltheoretische These¹⁾, es bestehe ein "trade off" zwischen der Ausdrucksmächtigkeit und der Lösungseffizienz von Modellierungskonzepten²⁾.

Bereits die graphischen Repräsentationen von Netzplänen und Petrinetzen weichen hinsichtlich der Anzahl ihrer Knotenarten fundamental voneinander ab. Soweit die zugrundeliegenden Netzdefinitionen formal übereinstimmen oder zu gleichen graphischen Repräsentationen führen, werden die netzkonstituierenden Knoten und Kanten in erheblich differierender Weise interpretiert. Die Modellierungsfähigkeit von Petrinetzen übertrifft die von Netzplänen vor allem in bezug auf Wechselwirkungen zwischen Prozessen. Hierbei stehen die Repräsentation von Ressourcen, die von den Prozessen gemeinsam beansprucht werden, sowie die Wiedergabe von Zeiträumen, in denen Prozeßausführungen auf die Ausführungen anderer Prozesse warten müssen, eine besondere Rolle. Diese Aspekte lassen sich nur mit der Hilfe von Petrinetzen zufriedenstellend modellieren. Umgekehrt existieren keine Sachverhalte, die nur von Netzplänen, nicht aber von Petrinetzen repräsentiert werden können.

Hinsichtlich ihrer Modellierungsgüte erweist sich dagegen keines der beiden Modellierungskonzepte als überlegen. Das bedeutet allerdings nicht, daß keine gravierenden Unterschiede bestünden. Sie betreffen vor allem die Modellierung von Zeitgrößen einerseits und von Entscheidungsalternativen andererseits. Netzpläne beherrschen die erste, Petrinetze die zweite Aufgabe besser. Daneben wurde eine Reihe von weiterführenden Aspekten aufgezeigt, die zugunsten der Modellierungsgüte von Petrinetzen sprechen. Ihnen kommt jedoch nur eine untergeordnete Modellierungsbedeutung zu.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. dazu die Ausführungen an früherer Stelle, die in der Feststellung eines Modellierungsdilemmas ihren Abschluß fanden.

2) In einer "saloppen", aber einprägsamen Formulierung läßt sich dieser Sachverhalt auch so charakterisieren: Petrinetze erweisen sich im Vergleich mit Netzplänen bei der Modellkonstruktion als "repräsentationstechnisch" überlegen, dagegen bei der Modellauswertung als "lösungstechnisch" unterlegen.

8.3.2 Vergleich zwischen Petrinetzen und OR-Programmen

Im Bereich des Operations Research (OR) werden Probleme der Prozeßkoordinierung in komplexen Produktionssystemen oftmals mit der Hilfe von Optimierungsrechnungen bearbeitet, die ein festes Modellierungsschema befolgen. Solche schematisierten Optimierungsmodelle werden zumeist als "Programme" thematisiert. Ein OR-Programm läßt sich durch vier qualitativ verschiedene Konstituenten charakterisieren¹⁾:

- Eine nicht-leere Menge von Variablen mit numerischen Definitionsbereichen²⁾ steckt für ein OR-Programm die Menge seiner denkmöglichen Lösungen ab.
- Eine beliebige Anzahl von Termen wird aus den vorgenannten Variablen mit der Hilfe von wahlfreien - zumeist arithmetischen³⁾ - Funktionen aufgebaut⁴⁾. Eine von diesen Funktionen wird als Zielfunktion ausgezeichnet⁵⁾.
- Eine Menge von Relationen müssen von den Termen des Programms erfüllt werden. Die Relationen besitzen daher den Charakter von Restriktionen. Sie legen die Menge zulässiger Lösungen fest⁶⁾. In der Regel handelt es sich um zweistellige Relationen⁷⁾, die in der Gestalt von Ungleichungen⁸⁾ oder Gleichungen⁹⁾ vorliegen.
- Ein Extremierungsoperator gibt an, ob der Zielfunktionswert minimiert oder maximiert werden soll. Dadurch wird die Menge aller optimalen Lösungen determiniert¹⁰⁾.

Den Standardfall solcher OR-Programme¹¹⁾ bildet der Ansatz der Linearen Optimierungsrechnung¹²⁾. Er wird fortan als Argumentationshintergrund von OR-Programmen vorausgesetzt.

Petrinetze und OR-Programme unterscheiden sich in mehrfacher Hinsicht¹³⁾. Zunächst wird auf Diskrepanzen in der relationalen Konzeptstruktur eingegangen. Die relationale Struktur eines Konzepts wird durch die Qualität seiner Basisrelationen determiniert. Diese Qualität hängt von den charakteristischen Eigenschaften ab, die von den Basisrelationen erfüllt werden¹⁴⁾. Später werden die Eigenschaften der Definitionsbereiche beleuchtet, über denen einerseits die Variablen von OR-Programmen und andererseits die Markenattribute von Petrinetzen definiert sind. Ebenso wird auf die Möglichkeiten eingegangen, Prozesse explizit zu repräsentieren. Abschließend finden Aspekte der logischen und modularen Strukturierung von Objektmodellen Beachtung.

OR-Programme zeichnen sich in der Regel durch zwei Basisrelationen aus. Ungleichungen stellen reflexive¹⁵⁾, transitive und antisymmetrische Relationen dar. Gleichungen gehören zu den reflexiven, transitiven und symmetrischen Relationen. Petrinetze werden dagegen durch zwei andersartige Basisrelationen geprägt: eine irreflexive, transitive und antisymmetrische Kausalrelation¹⁶⁾ sowie die irreflexive, nontransitive und symmetrische Nebenläufigkeitsrelation. OR-Programme und Petrinetze besitzen also grundverschiedene relationale Strukturen.

Für diese Diskrepanz ist im wesentlichen die Basisrelation der Nebenläufigkeit verantwortlich¹⁷⁾. Sie stellt ein Charakteristikum des Petrinetz-Konzepts dar, das keine Entsprechung im Konzept der OR-Programme findet. Ausschlaggebend hierfür ist vor allem die Nontransitivität der Nebenläufigkeitsrelation. Sie widerspricht der Transitivität von Kausal- und Präzedenzrelationen in fundamentaler Weise. Daher besteht die erste wesentliche Abgrenzung zwischen Petrinetzen und OR-Programmen hinsichtlich ihrer Abstützung durch eine *nontransitiven* Basisrelation. Darin offenbart sich abermals die zentrale Rolle, die das Konzept der Nebenläufigkeit für Petrinetze spielt.

Petrinetze und OR-Programme unterscheiden sich auch durch die Natur der Definitionsbereiche ihrer Markenattribute bzw. Variablen. Dabei werden jeweils solche Markenattribute und Variablen betrachtet, mit denen die Eigenschaften von modellierten Objekten repräsentiert werden sollen. OR-Programme bleiben grundsätzlich auf numerische Definitionsbereiche be-

schränkt. Daher reicht ihre Ausdruckskraft nur dazu aus, quantitative Objekteigenschaften auf natürliche Weise zu repräsentieren¹⁸⁾. Petrinetze unterliegen dagegen keiner solchen Begrenzung. Statt dessen umfaßt ihr Ausdrucksvermögen sowohl numerische als auch alle vorstellbaren nicht-numerischen Objekteigenschaften. Denn die Attribute von Marken dürfen sich auf jeden beliebigen Definitionsbereich erstrecken. Beispielsweise war es in der früher präsentierten Fallstudie möglich, die alternativen Betriebszustände von Bearbeitungsstationen unmittelbar durch qualitative, natürlichsprachlich formulierte Attributausprägungen wiederzugeben. Im Gegensatz dazu sind OR-Programme nicht in der Lage, eine natürliche Repräsentation dieser qualitativen Betriebszustände zu leisten¹⁹⁾.

Darüber hinaus erlauben Petrinetze, die Definitionsbereiche ihrer Markenattribute durch die Überlagerung einer Sortenstruktur differenziert zu behandeln. Diese Differenzierungen lassen sich benutzen, um einzelne Relationen oder Funktionen ausschließlich auf bestimmte, jeweils explizit ausgezeichnete Attribute anzuwenden. Zu diesem Zweck steht das gesamte Instrumentarium sortierter Algebren zur Verfügung, das an früherer Stelle dargelegt wurde. OR-Programme kennen eine solche Sortierung ihrer Definitionsbereiche nicht²⁰⁾. Ein entsprechend differenzierter Umgang mit ihren Variablen ist daher ausgeschlossen.

Diese Arbeit befaßt sich vornehmlich mit der Aufgabe, Prozeßausführungen in Produktionssystemen zu koordinieren. Daher erlangt die Fähigkeit von Modellierungskonzepten, Prozesse explizit zu repräsentieren, besonderes Gewicht²¹⁾. Petrinetze erfüllen diese Anforderung in ausgezeichneter Weise. Die gesamte Netzynamik beruht auf dem Konstrukt der Schaltprozesse. Es wurde bereits im Rahmen der Stelle/Transition-Netze ausführlich entfaltet und später durch Komplizierungen der Schaltregel beträchtlich angereichert. Mit diesen Schaltprozessen lassen sich Produktionsprozesse in modellierten Produktionssystemen in expliziter und natürlicher Weise modellieren. Dies wurde anhand der Fallstudie für Prozesse demonstriert, die vor allem²²⁾ als Arbeitsgänge oder als Transportvorgänge bei der Abwicklung eines Produktionsauftrags anfallen.

Die Variablen, Funktionen und Relationen aus OR-Programmen bieten dagegen keinen Anknüpfungspunkt für die unmittelbare, explizite Modellierung von Produktionsprozessen. Statt dessen lassen sich Prozesse nur mittelbar dadurch erfassen, daß Variablenindizes implizit auf zugrundeliegende Prozesse verweisen. Solche prozeßspezifischen Indizierungen stellen modellierungstechnische Artefakte dar, die auf keinen Fall eine natürlich anmutende Prozeßpräsentation zulassen. Dies äußert sich u.a. darin, daß komplizierte Hilfskonstruktionen erforderlich werden, um den zeitlichen Zusammenhang von ununterbrochenen Prozeßausführungen darzustellen²³⁾. Darüber hinaus wird die prozeßbezogene Variablenindizierung rasch unübersichtlich, sobald die dynamische Struktur eines Produktionssystems von einer größeren Prozeßvielfalt geprägt wird.

Schließlich lassen OR-Programme und Petrinetze deutliche Unterschiede erkennen, wenn ihre logischen oder modularen Strukturierungsmöglichkeiten betrachtet werden. In logischer Hinsicht erlauben OR-Programme zunächst keine explizite Verwendung logischer Junktoren und Quantoren. Statt dessen bleiben OR-Programme auf eine implizite konjunktive Verknüpfung ihrer Relationen beschränkt. Ihre Variablen werden implizit durch Allquantoren gebunden. Daher besitzen OR-Programme eine recht einfache logische Struktur. Zwar ist es möglich, die logische Programmstruktur durch Hilfskonstruktionen für aussagenlogische Junktoren zu erweitern²⁴⁾. Auf diese Weise erfolgt aber nur eine implizite Berücksichtigung der Junktoren. Darüber hinaus fallen die Hilfskonstruktionen derart aufwendig und intransparent aus²⁵⁾, daß sie die (aussagen-)logische Programmstruktur kaum noch erkennen lassen. Hinsichtlich der prädikatenlogischen Quantoren erweisen sich OR-Programme besonders restriktiv. Denn ein Abweichen von der prädikatenlogischen Allquantifizierung ihrer Variablen ist grundsätzlich nicht vorgesehen. Logische Zusammenhänge, deren Ausformulierungen die Verwendung von Existenzquantoren erfordern, werden daher vollkommen vernachlässigt.

Für Petrinetze gelten die vorgenannten Einschränkungen der logischen Strukturierung dagegen nicht. Mit ihrer Hilfe ist es grundsätzlich möglich, *alle* aussagen- und prädikatenlogischen Sachverhalte wiederzugeben. Dies gilt zumindest dann, wenn sie zuvor in ihre konjunktive Normalform transformiert worden sind²⁶⁾. Für deklarative Netzmodelle wurde dies durch ein entsprechendes Transformationsverfahren streng nachgewiesen. Operationale Netzmodelle beruhen zwar zunächst darauf, daß die Formeln ihrer zugrundeliegenden Produktionsregeln in konjunktiver oder subjunktiver Weise miteinander verknüpft sind. Auch beruhen sie auf einer impliziten Allquantifizierung ihrer Variablen. Aber bereits die subjunktive Verknüpfungsmöglichkeit übertrifft die rein konjunktive Relationenverknüpfung von OR-Programmen. Darüber hinaus wurde in späteren Erweiterungen des Kernkonzepts Synthetischer Netze aufgezeigt, wie sich alle aussagenlogischen Junktoren in operationalen Netzmodellen berücksichtigen lassen. In Netzlegenden können sie durch die Darstellungen von Kantenverknüpfungen explizit ausgewiesen werden. Ebenso wurde anhand von Beispielen verdeutlicht, daß sogar Existenzquantoren in operationalen Netzmodellen erfaßt werden können. Daher verfügt das Petrinetz-Konzept über weitaus leistungsfähigere logische Strukturierungsmöglichkeiten, als es für OR-Programme der Fall ist²⁷⁾.

Ähnliche Verhältnisse liegen vor, wenn die Konzepte der OR-Programme und Petrinetze hinsichtlich ihrer Modularität verglichen werden. Dabei wird unter der Modularität eines Modellierungskonzepts das Ausmaß verstanden, in dem es gestattet, die Repräsentation eines modellierten Objekts in abgeschlossene, eventuell interagierende Substrukturen - die "Module" - zu gliedern. Das Konzept der OR-Programme stellt aus dieser Perspektive ein Extrem dar. Denn es läßt überhaupt keine Modulbildung zu. Diese Nonmodularität beruht auf zwei Eigenarten aller OR-Programme. Erstens sind die Variablen dieser Programme global definiert. Daher können alle Vorkommnisse derselben Variable immer nur denselben Wert annehmen. Dies schließt "Fernwirkungen" ein, bei denen die Veränderung der Wertzuweisung zu einem Variablenvorkommnis an einer Programmstelle zugleich dieselbe Wertzuweisung zu allen anderen Variablenvorkommnissen im selben OR-Programm erzwingt²⁸⁾. Die Abgeschlossenheit von Modulen würde aber erfordern, lokale Variablen anzubieten, die nur innerhalb ihrer Module definiert sind und deren Werte auch nur dort verändert werden können. Zweitens existiert in OR-Programmen kein Mechanismus, mit dessen Hilfe Module interagieren könnten²⁹⁾.

Das Petrinetz-Konzept weist dagegen eine hohe Modularität auf. Denn es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, Petrinetze mit beliebig vielen und beliebig tief ineinander verschachtelten Modulen zu konstruieren. Auf diese Option wurde in der früher diskutierten Fallstudie intensiv zurückgegriffen³⁰⁾. Ebenso wurde sie schon anläßlich des Vergleichs zwischen Netzplantechnik und Petrinetz-Konzept angesprochen³¹⁾. Die Modulbildung beruht auf der Definition von Teilnetzen, die mit anderen Teilnetzen über gemeinsame Synchronisationsstellen verknüpft sind. Der Fluß von Markenkopien, die benachbarte Netzmodule über ihre Synchronisationsstellen austauschen, konstituiert zugleich einen Koordinierungsmechanismus. Mit seiner Hilfe können sich die Netzmodule gegenseitig beeinflussen. Die Interaktionen der Netzmodule besitzen rein lokalen Charakter, weil sie nur über den Markenfluß zwischen *benachbarten* Netzmodulen vermittelt werden. Die Lokalität dieser Modulinteraktionen wird dadurch unterstrichen, daß der Markenfluß durch das Schalten von Transitionen bewirkt wird. Die Schaltakte werden von einer Schaltregel determiniert, die ausschließlich auf die unmittelbare Nachbarschaft der jeweils betroffenen Transitionen Bezug nimmt. Dies führt unter anderem dazu, daß die Variablen in den Schaltvorschriften für die Transitionen einen lokalen Charakter besitzen³²⁾. Daher dürfen unterschiedliche Vorkommnisse derselben Variablen durchaus durch verschiedene Wertzuweisungen gebunden werden, falls es sich nicht um Variablenvorkommnisse für dieselbe Transition handelt.

Die Modularität von Petrinetzen wird ferner dadurch betont, daß die Markenflüsse innerhalb der Netzmodule kausal unabhängig erfolgen. Daher sind die Modulverhaltensweisen, die durch solche Markenflüsse konstituiert werden, voneinander entkoppelt. Dies gilt allerdings nur in dem Ausmaß, wie keine Modulinteraktion über eine gemeinsame Synchronisationsstelle geschieht. Netzmodule verhalten sich daher - sofern sie nicht gerade interagieren - kausal unabhängig. Dies

entspricht der eingangs erfolgten Charakterisierung von Modulen, in sich abgeschlossene Substrukturen darzustellen. Darüber hinaus kann ein vorgegebenes Netzmodell durch Zerlegen bereits vorhandener Module in Submodule verfeinert werden. Ebenso läßt es sich durch Zusammenfassen von Modulen zu Supermodulen vergrößern. Daher unterstützt das Petrinetz-Konzept nicht nur den Entwurf von modular strukturierten Objektmodellen. Vielmehr läßt es auch zu, die modulare Modellstruktur nachträglich so zu variieren, daß sie den jeweils aktuellen Modellierungsbedürfnissen gerecht wird. Auf die erforderlichen Netzverfeinerungen und -vergrößerungen wurde schon im Zusammenhang mit der Netzplantechnik eingegangen.

Anmerkungen zum Kapitel:

1) Vgl. zu allgemeinen Charakterisierungen von OR-Programmen VINCKE (1986), S. 161; ZIMMERMANN, H. (1987a), S. 56; ZIMMERMANN, H. (1987b), S. 71; DOMSCHKE (1990), S. 3.

Von den Darstellungsweisen in den vorgenannten Quellen wird in der nachfolgenden Auflistung geringfügig abgewichen. Denn in jenen Quellen steht die mathematische *Formulierung* - die äußere Gestalt - von OR-Programmen im Vordergrund. Dagegen interessiert hier die mathematische *Qualität* der Konstituenten von OR-Programmen. Dabei orientiert sich die Qualifizierung der Konstituenten an den früher erfolgten Ausführungen zum algebraischen Signaturkonzept und zur Prädikatenlogik. Allerdings wird darauf verzichtet, die dort vorgenommene präzise Unterscheidung zwischen nicht-evaluierten und evaluierten Ausdrücken aufrechtzuerhalten. Da sie im Kontext von OR-Programmen generell nicht berücksichtigt wird, unterbleibt sie auch hier, um die Charakterisierung von OR-Programmen nicht zu "fremdartig" erscheinen zu lassen.

Strenggenommen handelt es sich auch nicht um eine allgemeingültige Charakterisierung, die *alle* Ausprägungen von OR-Programmen einschließt. Vgl. dazu die Hinweise auf mehrfache Zielfunktionen und auf fehlende Extremierungsoperatoren. Statt dessen erfolgt nur eine "generische" Hervorhebung jener Programmkonstituenten, die für die meisten OR-Programme typisch sind.

2) In der Regel handelt es sich dabei um die Definitionsbereiche der reellen Zahlen, der Ganzzahlen oder der beiden Dualzahlen ("Binär"zahlen) aus der Menge $\{0,1\}$. Auf den Aspekt, daß die "reellen" Zahlen zumeist nur als Rationalzahlen behandelt werden, wurde bereits hingewiesen. Er wird im folgenden nicht mehr herausgestellt. Die Definitionsbereiche lassen sich auch als einstellige Relationen behandeln.

3) Eine nicht-arithmetische Funktion liegt dagegen z.B. vor, wenn ein OR-Programm eine Wurzelfunktion umfaßt.

4) Die Funktionen schließen durch den Grenzfall der 0-stelligen Funktionen auch sämtliche Konstanten ein.

5) Grundsätzlich können auch mehrere Zielfunktionen identifiziert werden; vgl. z.B. VINCKE (1986), S. 161; CORSTEN (1990a), S. 177ff. Diese Verallgemeinerung erfolgt vor allem bei Ansätzen der Vektoroptimierung zur Berücksichtigung multidimensionaler Zielsysteme. Die Berücksichtigung mehrerer Zielfunktionen erlaubt allerdings nicht mehr die übersichtliche Anwendung eines einfachen Extremierungsoperators. Statt dessen müssen kompliziertere Operationen auf die Zielfunktionen angewendet werden. Ein Beispiel dafür - das Dominanzkonzept - wurde bereits erwähnt. Es wird darauf verzichtet, solche Komplizierungen von OR-Programmen hier zu berücksichtigen.

6) Die Relationenmenge kann auch zur leeren Menge degenerieren. Wenn dieser Fall eintritt, erweisen sich alle denkmöglichen Lösungen ebenso als zulässige Lösungen.

7) Es kommen aber auch einstellige Relationen in Betracht.

8) Es werden hier grundsätzlich nur "schwache" Ungleichungen mit den Notationen " \leq " oder " \geq " zugelassen, die den Sonderfall der Gleichheit umschließen. "Starke" Ungleichungen mit den Notationen " $<$ " oder " $>$ " werden dagegen in OR-Programmen grundsätzlich nicht zugelassen. Dies liegt letztlich daran, daß andernfalls wesentliche Aspekte der Lösbarkeit von OR-Programmen verloren gingen.

9) Die Anführung von Gleichungen ist redundant, weil jede Gleichung aus zwei Ungleichungen mit identischen "linken" und "rechten" Termen, aber entgegengesetzten Ungleichheitszeichen, zusammengesetzt werden kann. Wegen der besonderen Bedeutung von Gleichungen für die Formulierung der Zielfunktion im Rahmen der Optimierungsrechnung werden diese dennoch - als Verdeutlichung - explizit genannt.

10) Der Extremierungsoperator kann auch entfallen. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn ein Entscheidungsträger lediglich Satisfizierungsziele verfolgt. Sie werden bereits durch die Restriktionen des OR-Programms vollständig erfaßt. Dann stimmen die "optimalen" Lösungen des OR-Programms mit seinen zulässigen Lösungen überein.

11) Der allgemeine Fall von OR-Programmen (mit skalaren Zielfunktionen) kann aufgrund der oben angeführten vier Charakteristika formal präzisiert werden. Dabei wird von folgenden Vereinbarungen ausgegangen: \underline{x}_k ist ein k -stelliges Tupel $(x_{h(1)}, \dots, x_{h(k)})$ aus Variablen x_h mit $h \in \mathcal{N}_0$. Für $k=0$ liegt das leere Tupel $\underline{x}_0 = ()$ vor. $\{h: 1, \dots, H\}$ mit $H \in \mathcal{N}_+$ ist die Indexmenge aller Variablen x_h . Die Variablen werden hier - abweichend von der sonst bevorzugten Anlehnung an die PROLOG-Notation - mit Kleinbuchstaben notiert. Dies entspricht der üblichen Notationsweise im Bereich des Operations Research. $REL_{m,k(m)}$ ist eine $k(m)$ -stellige Relation mit $k(m) \in \mathcal{N}_+$, $m \in \{1, \dots, M\}$ und $M \in \mathcal{N}_+$. M ist die Anzahl aller Restriktionen. Die Definitionsbereiche der Variablen x_h werden als 1-stellige Relationen $REL_{M+h,1}$ festgelegt. $fun_{m,n,k(m,n)}$ ist eine $k(m,n)$ -stellige Funktion mit $k(m,n) \in \mathcal{N}_0$, $m \in \{1, \dots, M\}$, $n \in \{1, \dots, N(m)\}$ und $N(m) \in \mathcal{N}_+$. Da die Funktion $fun_{m,n,k(m,n)}$ an der Konstitution der $k(m)$ -stelligen Relation $REL_{m,k(m)}$ teilnimmt, gilt stets $N(m) = k(m)$. Für $k=0$ entspricht die Funktion fun_0 einer Konstante "c". $fun_{z,k(z)}$ ist die eine ausgezeichnete Zielfunktion mit $k \in \mathcal{N}_+$. Der Extremierungsoperator "ext" kann wegen "ext" \in {"min", "max"} als Minimierungs- oder als Maximierungsoperator auftreten. Die Menge der optimalen Lösungen eines OR-Programms "PG" wird als Lösungsmenge L_{PG} notiert. Dann läßt sich ein beliebiges OR-Programm durch die Definition seiner Lösungsmenge definieren als:

$$\begin{aligned}
L_{PR} = & \{ \underline{x}_{k(Z)}^* : \text{fun}_{Z,k(Z)}(\underline{x}_{k(Z)}^*) = \text{ext}\{\text{fun}_{Z,k(Z)}(\underline{x}_{k(Z)}): \dots \\
& (\text{fun}_{1.1,k(1.1)}(\underline{x}_{k(1.1)}), \dots, \text{fun}_{1.k(1),k(1,k(1))}(\underline{x}_{k(1,k(1))}) \in \text{REL}_{1,k(1)} \\
& \wedge \dots \wedge \\
& (\text{fun}_{m.1,k(m.1)}(\underline{x}_{k(m.1)}), \dots, \text{fun}_{m.k(m),k(m,k(m))}(\underline{x}_{k(m,k(m))}) \in \text{REL}_{m,k(m)} \\
& \wedge \dots \wedge \\
& (\text{fun}_{M.1,k(M.1)}(\underline{x}_{k(M.1)}), \dots, \text{fun}_{M.k(M),k(M,k(M))}(\underline{x}_{k(M,k(M))}) \in \text{REL}_{M,k(M)} \\
& \wedge x_1 \in \text{REL}_{M+1,1} \wedge \dots \wedge x_h \in \text{REL}_{M+h,1} \wedge \dots \wedge x_H \in \text{REL}_{M+H,1} \} \}
\end{aligned}$$

Beispielsweise folgt daraus für OR-Programme mit reellzahligen Variablen, die zweistellige Relationen erfüllen und dabei eine Zielfunktion maximieren sollen:

$$\begin{aligned}
L_{PR} = & \{ \underline{x}_{k(Z)}^* : \text{fun}_{Z,k(Z)}(\underline{x}_{k(Z)}^*) = \max\{\text{fun}_{Z,k(Z)}(\underline{x}_{k(Z)}): \dots \\
& (\text{fun}_{1.1,k(1.1)}(\underline{x}_{k(1.1)}), \text{fun}_{1.2,k(1.2)}(\underline{x}_{k(1.2)})) \in \text{REL}_{1,2} \\
& \wedge \dots \wedge \\
& (\text{fun}_{m.1,k(m.1)}(\underline{x}_{k(m.1)}), \text{fun}_{m.2,k(m.2)}(\underline{x}_{k(m.2)})) \in \text{REL}_{m,2} \\
& \wedge \dots \wedge \\
& (\text{fun}_{M.1,k(M.1)}(\underline{x}_{k(M.1)}), \text{fun}_{M.2,k(M.2)}(\underline{x}_{k(M.2)})) \in \text{REL}_{M,2} \\
& \wedge x_1 \in \mathcal{R} \wedge x_2 \in \mathcal{R} \} \}
\end{aligned}$$

Falls es sich bei allen Restriktionen $\text{REL}_{m,2}$ jeweils um die Ungleichungsrelation " \leq " handelt und alle Funktionen $\text{fun}_{m,2,k(m,2)}(\underline{x}_{k(m,2)})$ zu 0-stelligen Funktionen mit $\text{fun}_{m,2,0}(\underline{x}_0) = c_m$ und $c_m \in \mathcal{R}$ degeneriert sind, gilt noch einfacher:

$$\begin{aligned}
L_{PR} = & \{ \underline{x}_{k(Z)}^* : \text{fun}_{Z,k(Z)}(\underline{x}_{k(Z)}^*) = \max\{\text{fun}_{Z,k(Z)}(\underline{x}_{k(Z)}): \dots \\
& \text{fun}_{1,k(1)}(\underline{x}_{k(1)}) \leq c_1 \wedge \dots \wedge \text{fun}_{m,k(m)}(\underline{x}_{k(m)}) \leq c_m \wedge \dots \wedge \text{fun}_{M,k(M)}(\underline{x}_{k(M)}) \leq c_M \\
& \wedge x_1 \in \mathcal{R} \wedge \dots \wedge x_h \in \mathcal{R} \wedge \dots \wedge x_H \in \mathcal{R} \} \}
\end{aligned}$$

Diese letzte Vereinfachung - oder eine ähnliche Variante - wird des öfteren als "allgemeine" Form von OR-Programmen thematisiert.

12) Vgl. zum Standardmodell der Linearen Programmierung CHOW, W.S. (1988), S. 137; KERN, W. (1987), S. 32ff.; ZIMMERMANN, H. (1987a), S. 59; ZIMMERMANN, H. (1987b), S. 71; ZELEWSKI (1989a), S. 129f.; DOMSCHKE (1990), S. 9ff.; KERN, W. (1990a), S. 143ff. (in produktionswirtschaftlichen Ausformungen); CORSTEN (1990a), S. 172ff.; ELLINGER (1990a), S. 14ff.; SCHEER (1991d), S. 76f. Eine subtilere Variante der Linearen Programmierung wird in HACKMAN (1989a), S. 482ff., präsentiert.

13) Allerdings lassen sich Verknüpfungen zwischen Petrinetzen und OR-Programmen herstellen. Sie werden hier nicht näher thematisiert. Vgl. statt dessen ZELEWSKI (1986c), S. 5ff., insbesondere S. 12ff.; ZELEWSKI (1988b), S. 353ff., insbesondere S. 355f.; ROSENSTENGEL (1991), S. 137.

14) Vgl. dazu die Relationseigenschaften, die im Kontext Allgemeiner Netze anlässlich der Diskussion von Voll- und Halbordnungen eingeführt wurden.

15) Die Reflexivität von Ungleichungen folgt aus der Prämisse, ausschließlich "schwache" Ungleichungen zu berücksichtigen.

16) Diese Kausalrelation läßt sich im Petrinetz-Konzept in unterschiedlicher Weise definieren. Hier wird auf die Relation der kausalen Halbordnung " $<$ " Bezug genommen, die bei der Betrachtung Allgemeiner Netze eingeführt wurde. Darüber hinaus wird nur von "einer" Kausalrelation gesprochen, weil sich auch *andere* Kausalrelationen vorstellen lassen. Darauf wurde anlässlich der Rahmenlegung zu dieser Arbeit eingegangen. Insbesondere ist für Petrinetze zu beachten daß sie die transitive und *symmetrische* Relation der kausalen Wechselwirkung nicht abdecken.

17) Dieses Urteil gilt allerdings nur unter der einschränkenden Voraussetzung, daß die "wesentlichen" Anwendungen des Petrinetz-Konzepts auf den Phänomenbereich des Mesokosmos beschränkt werden. Zu diesem Realitätsausschnitt zählt auch die Thematik der vorliegenden Arbeit. Daher kann die Unterscheidung zwischen temporalen Präzedenzrelationen einerseits und atemporalen Kausalrelationen, die im Mikro- und Makrokosmos eine wesentliche Rolle spielt, im Mesokosmos der "alltäglichen Erfahrungswelt" vernachlässigt werden. In diesem Erfahrungsbereich wirken sich die mikro- und makrophysikalischen Effekte der Unschärferelation und der Speziellen Relativi-

tätstheorie, die zum Auseinanderfallen von kausaler und zeitlicher Phänomenbetrachtung führen, nicht mehr in beobachtbarer Weise aus. Daher läßt sich die Kausalrelation von Petrinetzen durch eine Präzedenzrelation derart ersetzen, daß je zwei kausal verknüpfte Ereignisse, die zueinander in der Relation von Ursache und Wirkung stehen, auf zwei zeitlich verknüpfte Ereignisse abgebildet werden, die sich als Vorgänger und Nachfolger zueinander verhalten. Eine solche Präzedenzrelation wird in einem OR-Programm durch Ungleichungen wiedergegeben, die von den Zeitpunkten der Ereignisgeschehnisse erfüllt werden müssen.

Darüber hinaus wurde im Kontext von Zeitnetzen gezeigt, daß sich das Petrinetz-Konzept auch um die Gleichzeitigkeit von Ereignissen erweitern läßt. Auf diese Weise wird aus der irreflexiven Kausal- eine reflexive Präzedenzrelation. Hinzu kommt, daß nur irreflexive Relationen asymmetrisch ausfallen können. Denn aus der Reflexivität einer Relation REL folgt die Zulässigkeit identischer Elemente e_1 und e_2 in den Relationstupeln (e_1, e_2) : $e_1 = e_2 \rightarrow ((e_1, e_2) \in \text{REL} \wedge (e_2, e_1) \in \text{REL})$. Dies widerspricht aber der Asymmetrie-Definition, der zufolge für alle Elemente aus der Trägermenge der Relation gelten muß: $(e_1, e_2) \in \text{REL} \rightarrow (e_2, e_1) \notin \text{REL}$. Wird jedoch aus dem Geltungsbereich der Antezedenzbedingung der Asymmetrie-Definition durch $e_1 \neq e_2$ der Fall der Identität ausgeschlossen, gilt als eingeschränkte Asymmetrie: $((e_1 \neq e_2) \wedge (e_1, e_2) \in \text{REL}) \rightarrow (e_2, e_1) \notin \text{REL}$. Dies ist aber genau die Definition der Antisymmetrie; q.e.d. Folglich muß die Asymmetrie der Kausalrelation des Petrinetz-Konzepts zur Antisymmetrie von Präzedenzrelationen abgeschwächt werden. Schließlich verhalten sich Kausal- und Präzedenzrelationen in gleicher Weise transitiv.

Aus den voranstehenden Erläuterungen folgt, daß die irreflexive, asymmetrische und transitive Kausalrelation von Petrinetzen angesichts der o.a. Voraussetzung in eine entsprechende reflexive, antisymmetrische und transitive Präzedenzrelation von OR-Programmen transformiert werden kann. Dieser Übergang erhält zwar nicht mehr die originäre relationale Struktur des Petrinetz-Konzepts. Aber er stellt angesichts der oben vorausgesetzten Betrachtung von Konzeptanwendungen im Mesokosmos eine Approximation der relationalen Konzeptstruktur dar, die aus der Perspektive der alltäglichen Erfahrungswelt zu keiner Verfälschung Ergebnisse der Konzeptanwendungen führt. Daher besteht kein "wesentlicher" Unterschied zwischen der Kausalrelation von Petrinetzen und der Präzedenzrelation eines OR-Programms. Folglich kommt für eine charakteristische Diskrepanz der relationalen Konzeptstrukturen nur noch die Nebenläufigkeitsrelation in Betracht.

Eine abweichende Ansicht wird in MASSACHUSETTS COMPUTER ASSOCIATES (1975), S. 3, vertreten. Dort wird behauptet, daß sich Petrinetze durch die Berücksichtigung kausaler Relationen auszeichneten, während OR-Programme auf die Gleichheitsrelation beschränkt blieben. Dabei wird jedoch übersehen, daß OR-Programme mittels ihrer Ungleichungsrelation(en) die Modellierung von Präzedenzbeziehungen zulassen, deren relationale Struktur vom kausalen Fundament des Petrinetz-Konzepts nicht mehr weit entfernt ist. Dies wurde zuvor dargelegt. Allerdings stimmt der Verf. der vorgenannten Ansicht aus einer anderen Perspektive durchaus zu. Dann wird jedoch nicht mehr auf die formale relationale Konzeptstruktur abgehoben, sondern auf die materielle Interpretation der Basisrelationen. Aus diesem Blickwinkel kann zu Recht hervorgehoben werden, daß die Basisrelation "<" des Petrinetz-Konzepts auf kausale Weise interpretiert wird. Dagegen wird den Basisrelationen "≤" oder "≥" von OR-Programmen in der Regel überhaupt keine bestimmte materielle Interpretation zugeordnet.

18) Zwar lassen sich auch qualitative Objekteigenschaften erfassen, nachdem sie mit der Hilfe von Transformationsbeziehungen auf numerische Ersatzwerte abgebildet worden sind. Diese Vorgehensweise ist z.B. für die Nutzwertanalyse typisch, bei der qualitative Urteile über die Nutzenbeiträge eines Objekts in verschiedenartigen Nutzen dimensionen auf quantitative Nutzwerte abgebildet werden. Doch erachtet der Verf. solche Transformationen von Meßskalen nicht mehr als eine "natürliche" Repräsentation der jeweils betrachteten Objektaspekte. Die Unnatürlichkeit zeigt sich z.B. in den Schwierigkeiten, denen die Nutzwertanalyse aufgrund ihres Skalenbruchs ausgesetzt ist. Diese Probleme näher zu darzulegen, liegt aber außerhalb der hier behandelten Thematik.

19) Allenfalls lassen sich dichotome Zustände durch Zustandsvariablen mit dualen Definitionsbereichen erfassen. Diese Abbildung solcher Zustände auf die Konstanten "0" und "1" ist zwar in OR-Programmen üblich, erscheint dem Verf. aber unnatürlich. Die Unnatürlichkeit offenbart sich z.B. darin, daß vollkommen *unterschiedliche* dichotome Zustandspaare jeweils durch *dasselbe* Konstantenpaar aus der Menge $\{0, 1\}$ repräsentiert werden. Daher kann das Konstantenpaar auf keinen Fall solche Aspekte der dichotomen Zustandspaare abdecken, durch die sich die Zustandspaare "wesentlich" unterscheiden. Darüber hinaus versagt die Transformation von Zustandsangaben in Dualkonstanten, sobald mehr als zwei alternative Zustände in Betracht kommen. Dies trifft z.B. auf die o.a. Betriebszustände von Bearbeitungsstationen zu. Solche Ensembles von mehr als zwei Zustandsangaben können zwar immer noch durch Zustandsvariablen mit ganzzahligen Definitionsbereichen wiedergegeben werden. Aber die daraus resultierenden Konstrukte entfernen sich noch mehr von der intuitiven Vorstellung einer "natürlichen" Zustandsrepräsentation. Daher überrascht es nicht, daß solche ganzzahligen, nicht-dualen Zustandsvariablen in OR-Programmen kaum zu finden sind. Die voranstehenden Hinweise darauf, daß OR-Programme unter einer unnatürlichen Repräsentation von Sachverhalten leiden, lassen sich vermehren. Auf einen solchen Aspekt wird weiter unten hinsichtlich der Repräsentation von Prozessen eingegangen.

20) Allenfalls kann ein rudimentärer Sortierungsansatz in gemischt-ganzzahligen Programmen gesehen werden. Dort wird zwischen Variablen differenziert, die entweder nur ganzzahlige oder aber beliebige reellzahlige Werte annehmen vermögen. Jedoch wird diese "Sortierung" in den Programmen nicht formal präzise und konsequent aus-

geführt. Denn die korrekte Variablenbindung wird nicht durch eine entsprechende Sortenstruktur der programm-zugehörigen Relationen und Funktionen erreicht. Statt dessen wird sie *außerhalb* der formalen Programmdefinition durch diejenigen Algorithmen gewährleistet, die zur Auswertung der Programme angewendet werden. Daher liegt keine echte Sortierung der Definitionsbereiche vor.

21) Dieses Urteil knüpft an die Konzeptualisierungsprämisse an, zu modellierende Sachverhalte möglichst weitgehend in *expliziter* Weise darzustellen.

22) Daneben wurden auch andere Teilprozesse modelliert, wie z.B. die Ein- und Auslagerungen von Werkstücken oder Werkzeugen. Dies geschah jedoch nur am Rande.

23) Um zeitlich zusammenhängende, ununterbrochene Prozeßausführungen zu repräsentieren, müssen OR-Programme um Kontinuitätsbedingungen erweitert werden. Vgl. zu diesen recht aufwendigen und intransparenten Konstruktionen SCHWEITZER, M. (1966), S. 47 u. 50; MUSCATI (1970), S. 58ff.; SEELBACH (1979), Sp. 18f.; ALDINGER (1985a), S. 73ff. u. 108; GÜNTHER, H. (1986), S. 248; MISSBAUER (1987), S. 139 u. 197ff. Vgl. daneben auch FANDEL (1991b), S. 246. Er formuliert ebenfalls zwei Kontinuitätsbedingungen. Allerdings bezieht er sich nicht auf OR-Programme, sondern auf dynamische Aktivitätsanalysen.

In Petrinetzen lassen sich dagegen Prozesse, deren Ausführungen nicht unterbrochen werden, ohne solche Komplikationen modellieren. Statt dessen braucht nur auf die übersichtlichen und kompakten Netzkonstrukte für die Repräsentation atomarer zeitverbrauchender Prozesse zurückgegriffen zu werden, die an früherer Stelle eingeführt wurden. Sie sind von vornherein so angelegt, daß eine Prozeßausführung, die durch das Schalten der Starttransition eingeleitet worden ist, notwendig so lange andauert, bis die komplementäre Schlußtransition geschaltet worden ist.

24) Vgl. GABRIEL, R. (1982), S. 43ff.; WILLIAMS, H. (1985), S. 168ff.; JOHÄNNITGEN-HOLTHOFF (1986), S. 44ff. u. 205ff.; BOOS, J. (1986), S. 19ff.; SANDERS, M. (1987), S. 80ff. (mit nur undeutlichem Bezug auf OR-Programme); ZELEWSKI (1989c), S. 2f.

25) Dies hat der Verf. an anderer Stelle ausführlicher dargelegt; vgl. ZELEWSKI (1989c), S. 3ff. Ein Ansatz, diese OR-Programm-Konstrukte in äquivalente, aber wesentlich kompaktere und übersichtlichere Petrinetze zu transformieren, findet sich bei ZELEWSKI (1986b), S. 35ff.

26) Diese Einschränkung ist insofern bedeutsam, weil deklarative Netzmodelle keine Repräsentation von Existenzquantoren zulassen. Dies ist aber auch nicht erforderlich, weil die Variablen von prädikatenlogischen Formeln in konjunktiver Normalform grundsätzlich nur noch durch Allquantoren gebunden werden. Falls eine Formel zunächst noch mindestens einen Existenzquantor enthalten hat, sind im Verlauf der Formelnormalisierung zuvor alle Existenzquantoren mit der Hilfe von SKOLEM-Funktionen in Allquantoren transformiert worden.

27) Über die vorgenannten Argumente hinaus läßt sich dieses Urteil durch weitere Aspekte stützen. Im wesentlichen handelt es sich dabei um die fehlende Nulltestfähigkeit von OR-Programmen. Denn es ist im allgemeinen Fall nicht möglich, in OR-Programmen negativ-bedingte Aktionsanweisungen zu formulieren. Dies gilt zumindest dann, wenn in die Formulierung der Aktionsbedingungen Variablen mit unendlichen Definitionsbereichen eingehen. Beispielsweise soll eine Aktion nur genau dann ausgeführt werden können, wenn die Bedingung " $X_k = c$ " nicht zutrifft. Dabei ist " c " eine beliebige Konstante aus dem Definitionsbereich der Variablen X_k . Da in OR-Programmen keine starken Ungleichungen verwendet werden können, ist es nicht möglich, die negativ-bedingte Aktionsanweisung mit der Hilfe des Disjuncts " $X_k < c \vee X_k > c$ " auszudrücken. Zwar könnte an das kombinierte Ad- und Konjugat " $(X_k \leq c_1 \wedge X_k \geq c_1) \vee \dots \vee (X_k \leq c_K \wedge X_k \geq c_K)$ " mit $c_k \neq c$ für alle $k \in \{1, \dots, K\}$ und $K \in \mathcal{N}_+$ gedacht werden. Aber auch eine solche Aktionsbedingung scheidet aus, falls der Definitionsbereich der Variablen X_k unendlich viele Elemente enthält, die von der Konstanten " c " verschieden sind. Eine andere Möglichkeit, die negativ-bedingte Aktionsanweisung in ein OR-Programm aufzunehmen, besteht ebensowenig. Dagegen bereitet es im Petrinetz-Konzept keine unüberwindlichen Schwierigkeiten, diese Aktionsanweisung zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck braucht lediglich auf das Konstrukt der Inhibitorkanten zurückgegriffen zu werden. Mit ihrer Hilfe läßt sich prüfen, ob sich auf einer Stelle eine Markenkopie befindet, die in einem Markenattribut die aktuelle Ausprägung " c " aufweist. Wenn dies der Fall ist, kann eine Inhibitorkante, welche von der Stelle zu einer Transition gerichtet ist, die Aktivierung dieser Transition verhindern. Die Transition läßt sich so ausgestalten, daß sie die betrachtete Aktionsanweisung repräsentiert. Dann drückt das Teilnetz, das aus der Stelle, der Transition und der dazwischen liegenden Inhibitorkante besteht, eine negativ-bedingte Aktionsanweisung aus.

Eine Konsequenz der fehlenden Nulltestfähigkeit von OR-Programmen besteht darin, daß sie im allgemeinen nicht in der Lage sind, Prioritätsordnungen für Aktionen zu erfassen. Dies ist für die hier behandelte Thematik der Prozeßkoordination insofern bemerkenswert, als der weite Bereich der prioritätsregelgestützten Zuordnung von Arbeitsgängen zu Bearbeitungsstationen ausscheidet. Daher überrascht es nicht, daß Autoren, die Maschinenbelegungsprobleme mit der Hilfe von OR-Programmen modellieren, auf Prioritätsregeln überhaupt nicht näher eingehen. In Petrinetzen können dagegen die aktionsrepräsentierenden Transitionen mit Schaltprioritäten versehen werden. Vgl. auch die Modellierung von Prioritätsregeln für die vorgenannte Zuordnung zwischen Arbeitsgängen und Bearbeitungsstationen in der Fallstudie.

Generell wirkt sich die Unmöglichkeit, in OR-Programmen für Variablen mit unendlichen Definitionsbereichen negativ-bedingte Aktionsanweisungen zu formulieren, als eine entscheidende Beschränkung der Ausdrucksfähigkeit von OR-Programmen aus. Denn sie besitzen aufgrund dieses Defizits keine TURING-Mächtigkeit. An früherer Stelle wurde die Bedeutung der TURING-Mächtigkeit bereits erläutert. Dort wurde auch gezeigt, daß Petrinetze über dieses Ausdrucksvermögen verfügen, wenn sie um entsprechende Netzkonstrukte - wie die oben erwähnten Inhibitorkanten - erweitert werden.

28) Auf globale Variablen und ihre Fernwirkungen wurde bereits kurz eingegangen.

29) Vgl. zur Unmöglichkeit, in OR-Programmen Interaktionen zwischen Modulen zu modellieren, HOLT, A. (1970a), S. 4; HERZOG, O. (1973), S. 2f.

30) Das wurde an anderer Stelle durch zwei korrespondierende Modellierungsstrategien hervorgehoben: Zunächst wird ein Netzmodell in modulare Teilmodelle zerlegt. Danach erfolgt eine Integration der Netzmodule mit der Hilfe von Synchronisationsstellen.

31) Der Aspekt der Netzmodularität wird hier lediglich durch seinen neuen Bezugspunkt - die OR-Programme - variiert.

32) Auch die globale Variable "Time" aus Zeitnetzen wird mittels des Netzmoduls der zentralen Systemuhr letztlich auf ein lokal definiertes Markenattribut zurückgeführt. Der globale Variablencharakter resultiert nur aus dem Umstand, daß *alle* Transitionen eines Zeitnetzes auf *dieselbe* Kopie der Zeitmarke zugreifen (können).

Literaturverzeichnis zu Band 8

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 Literatúrauswertung 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.

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 (1979)

Agerwala,T.: Putting Petri Nets to Work; in: Computer, Vol. 12 (1979), No. 12, S. 85-94.

Aldinger (1985a)

Aldinger,L.: Leitstandunterstützte kurzfristige Fertigungssteuerung bei Einzel- und Kleinserienfertigung, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1985.

Altrogge (1979)

Altrogge,G.: Netzplantechnik, Wiesbaden 1979.

Ancona (1982)

Ancona,M.; De Floriani,L.: Computational Algorithms for Hierarchically Structured Project Networks; in: Operations Research Letters, Vol. 1 (1982), S. 170-176.

Aquilano (1980)

Aquilano,N.J.; Smith,D.E.: A Formal Set of Algorithms For Project Scheduling With Critical Path Scheduling/Material Requirements Planning; in: Journal of Operations Research, Vol. 1 (1980/81), No. 2, S. 57-67.

Arisawa (1972)

Arisawa,S.; Elmaghraby,S.E.: Optimal Time-Cost Trade-Offs in GERT Networks; in: Management Science, Vol. 18 (1972), S. 589-599.

Baker,H. (1972)

Baker,H.: Petri Nets and Languages, Computation Structures Group Memo 68, Project MAC am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts) 1972.

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.

Bandler (1978)

Bandler,W.; Colchester,U.K.: Some Esomathematical Uses of Category Theory; in: Klir,G.J. (Hrsg.): Applied General Systems Research, Proceedings of the NATA International Conference, 15.-19.08.1977 in Binghamton, New York 1978, S. 243-255.

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), Bauer,F.L.; Wössner,H.: Algorithmische Sprache und Programmentwicklung, Berlin - Heidelberg - New York 1981.

Best,E. (1974)

Best,E.: Beiträge zur Petrinetz-Theorie, Diplomarbeit am Institut für Informatik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1974.

Biethahn (1990)

Biethahn,J.; Mucksch,H.; Ruf,W.: Ganzheitliches Informationsmanagement, Band I: Grundlagen, München - Wien 1990.

Boos,J. (1986)

Boos,J.: Lokalisierung von Meßstellen für ein Informations-System zur Energiebewirtschaftung in industriellen Betrieben - Entwicklung eines OR-Modells mit einem Lösungsvorschlag, Arbeitsbericht 1/1986, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1986.

Borries (1988)

Borries,B.: Regelgesteuerte graphische Darstellung von Handlungsplänen in System AiD, Arbeitspapiere der GMD 305, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1988.

Byrn (1974)

Byrn,W.H.: Sequential Processes, Deadlocks, and Semaphore Primitives, Dissertation, Department of Applied Mathematics, Harvard University, Cambridge (Massachusetts) 1974.

CEIR (o.J.)

C-E-I-R Ltd. (Hrsg.): RAMPS - Resource Allocation and Multi-Project Scheduling - User's Guide, Brentford o.J.

Chow,W.S. (1988)

Chow,W.S.; Heragu,S.; Kusiak,A.: Operations Research Models and Techniques; in: Rolstadas, A. (Hrsg.): Computer-Aided Production Management, Berlin - Heidelberg - New York ... 1988, S. 135-148.

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.

Clark,J. (1977)

Clark,J.A.; Hastings,N.A.J.: Decision Networks; in: Operational Research Quarterly, Vol. 28 (1977), No. 1, S. 51-68.

Corsten (1990a)

Corsten,H.: Produktionswirtschaft - Einführung in das industrielle Produktionsmanagement, München - Wien 1990.

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.

Crowston (1967)

Crowston,W.; Thompson,G.L.: Decision CPM: A Method for Simultaneous Planning, Scheduling, and Control of Projects; in: Operations Research, Vol. 15 (1967), S. 407-426.

Crowston (1970)

Crowston,W.B.: Decision CPM: Network Reduction and Solution; in: Operational Research Quarterly, Vol. 21 (1970), S. 435-452.

Cugini (1989)

Cugini,U.; Rizzi,C.: Design of a UIMS for CIM Applications; in: Kochan,D.; Olling,G. (Hrsg.): Software for Manufacturing, Proceedings of the Seventh International IFIP/IFAC Conference on Software for Computer Integrated Manufacturing, PROLAMAT'88, 14.-17.06.1988 in Dresden, Amsterdam - New York - Oxford ... 1989, S. 89-101.

Czeranowsky (1974)

Czeranowsky,G.: Programmplanung bei Auftragsfertigung unter besonderer Berücksichtigung des Terminwesens, Wiesbaden 1974.

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.

Daiser (1984)

Daiser,W.: Künstliche Intelligenz Forschung und ihre epistemologischen Grundlagen, Dissertation, Universität Düsseldorf, Frankfurt - Bern - New York ... 1984.

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.

Degli Antoni (1980a)

Degli Antoni,D.; Zonta,B.: General Net Theory and Natural Language Understanding; in: Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models" (Gesellschaft für Informatik), Newsletter 5 (1980), S. 7-12.

Delivorias (1984)

Delivorias,P.N.; Neumann,K.; Steinhardt,U.: Gradient-Projection and Policy-Iteration Methods for Solving Optimization Problems in STEOR Networks; in: Zeitschrift für Operations Research; vol. 28 (1984), S. 67-88.

Dennis,J. (1973)

Dennis,J.B.: Concurrency in Software Systems; in: Bauer,F.L. (Hrsg.): Advanced Course on Software Engineering, 21.02.-3.03.1972 in Hamburg, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems - Operations Research, Computer Science, Social Science 81, Berlin - Heidelberg - New York 1973, S. 111-127.

Der Bundesminister der Verteidigung (1975)

Der Bundesminister der Verteidigung: Netzplantechnik - PPS-System - Ein Mittel zur Planung, Steuerung und Überwachung von Projekten, 2. Revison (1974) der Neuauflage (1972) des Originals von 1968, Köln - Frankfurt 1975.

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 69900 (1980)

Ausschuß für Netzplantechnik und Projektmanagement (ANPM) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 69900 Teil 1, Netzplantechnik - Begriffe. (Entnommen aus: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): Informationsverarbeitung 1 - Begriffe - Normen, 6. Aufl., Berlin - Köln 1985, S. 340-346.)

Domschke (1990)

Domschke,W.; Drexl,A.: Einführung in Operations Research, Berlin - Heidelberg - New York ... 1990.

Domschke (1991)

Domschke,W.; Drexl,A.: Kapazitätsplanung in Netzwerken - Ein Überblick über neuere Modelle und Verfahren; in: Operations Research-Spektrum, Bd. 13 (1991), S. 63-76.

Drexl (1990a)

Drexl,A.: Job-Prozessor-Scheduling für heterogene Computernetzwerke; in: Wirtschaftsinformatik, 32. Jg. (1990), S. 345-351.

Drexl (1990b)

Drexl,A.: Fließbandaustaktung, Maschinenbelegung und Kapazitätsplanung in Netzwerken - Ein integrierender Ansatz; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 60. Jg. (1990), S. 53-70.

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.

Eisner (1962)

Eisner,H.: A Generalized Network Approach to the Planning and Scheduling of a Research Project; in: Operations Research, Vol. 10 (1962), S. 115-125.

Ellinger (1990a)

Ellinger, T.: Operations Research - Eine Einführung, 3. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York ... 1990.

Elmaghraby (1964)

Elmaghraby, S.E.: An Algebra for the Analysis of Generalized Activity Networks; in: Management Science, Vol. 10 (1964), S. 494-514.

Elmaghraby (1966b)

Elmaghraby, S.E.: On Generalized Activity Networks; in: The Journal of Industrial Engineering, Vol. 17 (1966), S. 621-631.

Elmaghraby (1977)

Elmaghraby, S.E.: Activity Networks: Project Planning and Control by Network Models, New York - London - Sydney ... 1977.

Fandel (1991b)

Fandel, G.: Bedeutung der ökonomischen Theorie für das betriebswirtschaftliche Gebiet der Produktion; in: Ordelleide, D.; Rudolph, B.; Büsselmann, E. (Hrsg.): Betriebswirtschaftslehre und Ökonomische Theorie, 52. Wissenschaftliche Jahrestagung des Verbandes der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V., 05.-09.06.1990 in Frankfurt, Stuttgart 1991, S. 227-254.

Fehling (1990a)

Fehling, R.: Hierarchische Petrinetze - Idee und grundlegende Struktur, Forschungsbericht Nr. 344, Fachbereich Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1990.

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.

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.

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.

Gabriel, R. (1982)

Gabriel, R.: Optimierungsmodelle bei logischen Verknüpfungen - Modellaufbau und Modelllösung von Mixed-Integer-Problemen bei qualitativen Anforderungen, München 1982.

Genrich (1971a)

Genrich, H.J.: Einfache nicht-sequentielle Prozesse, Dissertation an der Universität Bonn, Bericht Nr. 37, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1971.

Genrich (1973b)

Genrich, H.J.: Formale Eigenschaften des Entscheidens und Handelns, Interner Bericht 09/73-11-29, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1973.

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 (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 (1981)

Genrich,H.J.; Lautenbach,K.: System Modelling With High-Level Petri Nets; in: Theoretical Computer Science, Vol. 13 (1981), S. 109-136.

Genrich (1983a)

Genrich,H.J.: Diskussionsbeiträge anlässlich: 4th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, 26.-29.09.1983 in Toulouse.

Gewald (1972)

Gewald,K.; Kasper,K.; Schelle,H.: Netzplantechnik - Methoden zur Planung und Überwachung von Projekten, Band 2: Kapazitätsoptimierung, München - Wien 1972.

Gewald (1974)

Gewald,K.; Kasper,K.; Schelle,H.: Netzplantechnik - Methoden zur Planung und Überwachung von Projekten, Band 3: Kosten- und Finanzplanung, München - Wien 1974.

Ginali (1978)

Ginali,S.; Goguen,J.: A Categorical Approach to General Systems; in: Klir,G.J. (Hrsg.): Applied General Systems Research, Proceedings of the NATO International Conference, 15.-19.08.1977 in Binghamton, New York 1978, S. 257-270.

Girault (1982a)

Girault,C.: Modelisation des Systemes Paralleles, D.E.A. de Systemes Informatiques, Institut de Programmation, Universite Pierre et Marie Curie, Paris 1982.

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.)

Goguen (1972)

Goguen,J.A.: Systems and Minimal Realization; in: o.V.: Proceedings of 1971 Conference on Decision and Control including the 10th Symposium on Adaptive Processes, 15.-17.12.1971, Miami Beach 1972, S. 42-46.

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.

Griese,W. (1979)

Griese,W.: Lebendigkeit in NSK-Petri-Netzen, TUM-Info-7906, Institut für Informatik, Technische Universität München, München 1979.

Groß,M. (1991c)

Groß,M.; Müller,S.: Montageorientierte Auftragsabwicklung mit auftragsspezifischen Montage-netzplänen; in: VDI-Z(eitschrift), Bd. 133 (1991), Nr. 5, S. 97-100.

Große-Oetringhaus (1977)

Große-Oetringhaus, W.F.: Praktische Projektgestaltung mit Netzplantechnik, Gießen 1977.

Günther, H. (1986)

Günther, H.O.: The Design of an Hierarchical Model for Production Planning and Scheduling; in: Axsäter, S., Schneeweiss, C.; Silver, E. (Hrsg.): Multi-Stage Production Planning and Inventory Control, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 266, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1986, S. 227-260.

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. (1975a)

Hack, M.H.T.: Decidability Questions For Petri Nets, Dissertation, Department of Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts) 1975.

Hackman (1989a)

Hackman, S.T.; Leachman, R.C.: A General Framework for Modeling Production; in: Management Science, Vol. 35 (1989), S. 478-495.

Hackmann (1982)

Hackmann, W.K.: Systementwicklung mit Petrinetzen PET/PEM/PES: Ein Überblick, Bericht ZT ZTI SDF 1 der Siemens AG, München 1982.

Hässig (1979)

Hässig, K.: Graphentheoretische Methoden des Operations Research, Stuttgart 1979.

Hartmann (1983)

Hartmann, J.; Höpfinger, E.: How to Imply an Exact Procedure for the Time Evaluation og General Acyclic GERT-Networks Numerically? (Extended Abstract); in: Loeffel, H.; Stähly, P. (Hrsg.): Methods of Operations Research 45, VII. Symposium on Operations Research, 19.-21.08.1982 in Sankt Gallen, Tagungsbericht der Sektionen 1-3 (Bd. I), Königstein 1983, S. 269-270.

Hastings (1978)

Hastings, N.A.J.; Mello, J.M.C.: Decision Networks, Chichester - New York - Brisbane ... 1978.

Hauk (1973)

Hauk, W.: Einplanung von Produktionsaufträgen nach Prioritätsregeln - Eine Untersuchung von Prioritätsregeln mit Hilfe der Simulation, Berlin - Köln - Frankfurt 1973.

Hax, H. (1974)

Hax, H.: Entscheidungsmodelle in der Unternehmung - Einführung in Operations Research, Reinbek 1974.

Heizer (1988)

Heizer, J.; Render, B.: Production and Operations Management - Strategies and Tactics, Boston - London - Sydney ... 1988.

Hennicke (1991)

Hennicke, L.: Wissensbasierte Erweiterung der Netzplantechnik. Dissertation, Universität Frankfurt 1990/91, Heidelberg 1991.

Herzog, O. (1973)

Herzog, O.: Petrinetze als Modelle für parallele Prozesse, im Auftrag der Firma ORGALOGIC/ Köln erstellter Bericht, o.O. 1973.

Hinderer (1982a)

Hinderer, W.: Transfer of graph constructs in Goguen's paper to net constructs; 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. 142-150.

Hintz (1987)

Hintz, G.-W.: Ein wissensbasiertes System zur Produktionsplanung und -steuerung für flexible Fertigungssysteme, Dissertation, Universität Aachen, Düsseldorf 1987.

Holt,A. (1968)

Holt,A.W. et al.: Information System Theory Project, Technical Report No. RADC-TR-68-305, Applied Data Research, Inc., Princeton 1968.

Holt,A. (1970a)

Holt,A.; Commoner,F.: Events and Conditions; in: Dennis,J.B. (Hrsg.): Record of the Project MAC, Conference on Concurrent Systems and Parallel Computation, 2.-5.06.1970 in Woods Hole, New York 1970, S. 3-52.

Holt,A. (1975c)

Holt,A.W.: Definitions Pertaining to Petri Nets, States and Events and Behavior; 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. 64-73.

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,R. (1972a)

Holt,R.C.: Some Deadlock Properties of Computer Systems; in: Computing Surveys, Vol. 4 (1972), S. 179-196.

Hoß (1984)

Hoß,D.; Gerhardt,K.-U.; Kramer,H.; Weber,A.: Wirtschaftliche und soziale Auswirkungen des Einsatzes von integrierten CAD/CAM-Systemen, Untersuchungsteil II: Die sozialen Auswirkungen der Integration von CAD und CAM - Vorstudie für ein empirisches Hauptprojekt, RKW-Projekt A 148/83, Institut für Sozialforschung Frankfurt am Main, Düsseldorf 1984.

Huang,P. (1983)

Huang,P.Y.; Rees,L.P.; Taylor,B.W.: A Simulation Analysis of the Japanese Just-in-Time Technique (with Kanbans) for a Multiline, Multistage Production System; in: Decision Sciences, Vol. 14 (1983), S. 326-344.

Hundt (1981)

Hundt,S.: Beiträge zur Kritik der Betriebswirtschaftslehre, Bremen 1981.

Hura (1982c)

Hura,G.S.: Petri Net as a Modeling Tool; in: Microelectronics and Reliability, Vol. 22 (1982), S. 433-439.

IntelliCorp (1989)

IntelliCorp GmbH: Knowledge Engineering Environment - Eine Einführung, München 1989.

Jaffe (1977)

Jaffe,J.M.: Semilinear Sets and Applications, Master of Science Thesis am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts) 1977.

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.

Jensen (1983a)

Jensen, K.; Huber, P.; Larsen, M.N.; Martinsen, I.-M.: Petri Net Package User's Manual, Report DAIMI MD-46, Version 2.1, Computer Science Department, Aarhus University, Aarhus 1983.

Johänntgen-Holthoff (1986)

Johänntgen-Holthoff, M.: Entscheidungsmodell der Jahresabschlußgestaltung für Publikums-gesellschaften, Dissertation, Universität Köln, Witterschlick/Bonn 1986.

Junghanns (1978)

Junghanns, W.; Benk, F.; Drobina, J.; Kurz, W.; Novotny, W.; Waiblinger, F.: Ein System zur Pro-duktionsplanung und Produktionssteuerung für die Einzel- und Serienfertigung; in: Ellinger, T.; Wildemann, H. (Hrsg.): Praktische Fälle zur Produktionssteuerung, Wiesbaden 1978, S. 305-361.

Kern, N. (1969)

Kern, N.: Netzplantechnik - Betriebswirtschaftliche Analyse von Verfahren der industriellen Terminplanung, Wiesbaden 1969.

Kern, W. (1962a)

Kern, W.: Die Messung industrieller Fertigungskapazitäten und ihrer Ausnutzung - Grundlagen und Verfahren, Habilitation Darmstadt, Köln - Opladen 1962.

Kern, W. (1967)

Kern, W.: Optimierungsverfahren in der Ablauforganisation - Gestaltungsmöglichkeiten mit Ope-rations Research, Essen 1967.

Kern, W. (1969b)

Kern, W.: Die Netzplantechnik als ein Instrument betrieblicher Ablaufplanung; in: Jacob, H. (Hrsg.): Anwendung der Netzplantechnik im Betrieb, Wiesbaden 1969, S. 53-80.

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.

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.

Kirsch (1984)

Kirsch, W.: Wissenschaftliche Unternehmensführung oder Freiheit vor der Wissenschaft? - Stu-dien zu den Grundlagen der Führungslehre, 1. und 2. Halbband, München 1984.

Krieg, B. (1977)

Krieg, B.: Petrinetze und Zustandsgraphen, Bericht Nr. 29, Institut für Informatik, Universität Hamburg, Hamburg 1977.

Küpper, Wi. (1975)

Küpper, Wi.; Lüder, K.; Streitferdt, L.: Netzplantechnik, Würzburg - Wien 1975.

Küpper, Wi. (1979)

Küpper, Wi.: Netzplantechnik, Grundlagen der; in: Kern, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Pro-duktionswirtschaft, Stuttgart 1979, Sp. 1340-1353.

Lambourn (1963)

Lambourn, S.: Resource allocation and multi-project scheduling (RAMPS) - a new tool in plan-ning and control; in: The Computer Journal, Vol. 5 (1963), S. 300-304.

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.

Lowas (1986b)

Lowas,A.: Computer-Aided Design of Multiprocessor Control Systems; in: o.V.: Proceedings of the 25th IEEE Conference on Decision and Control, im Dezember 1986 in Athen, Vol. 3, New York 1986, S. 1692-1696.

Lüttgen (1966)

Lüttgen,H.: Reduktion und Dekomposition von Planungsnetzen; in: Ablauf- und Planungsforschung, 7. Jg. (1966), S. 92-104.

Luhmann (1988)

Luhmann,N.: Soziale Systeme - Grundriß einer allgemeinen Theorie, 2. Aufl., Frankfurt 1988.

Marti-Oliet (1989)

Marti-Oliet,N.; Meseguer,J.: From Petri Nets to Linear Logic; in: Pitt,D.H.; Rydeheard,D.E.; Dybjer,P.; Pitts,A.M.; Poigne,A. (Hrsg.): Category Theory and Computer Science, 05.-08.09.1989 in Manchester, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science 389, Berlin - Heidelberg - New York ... 1989, S. 313-340.

Massachusetts Computer Associates (1974c)

Massachusetts Computer Associates, Inc. (Hrsg.): Final Report for the Project "Development of Theoretical Foundations for Description and Analysis of Discrete Information Systems, Volume II - Mathematica, Wakefield 1974.

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.

Mattheiss (1982)

Mattheiss,T.H.; Moeller,G.; Kilar,J.: Improving Industrial Readiness with Venture Evaluation and Review Technique (VERT); in: Interfaces, Vol. 12 (1982), No. 1, S. 21-26.

Matthes,W. (1979a)

Matthes,W.: Netzplantechnik, Erweiterungen der; in: Kern,W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, Stuttgart 1979, Sp. 1327-1340.

Matthes,W. (1979b)

Matthes,W.: Dynamische Einzelproduktionsfunktion der Unternehmung (Produktionsfunktion vom Typ F), Arbeitsbericht Nr. 2/1979, Seminar für Fertigungswirtschaftslehre, Universität Köln, Köln 1979.

Matthes,W. (1983)

Matthes,W.; Schmidt,A.: Integrierte Einzelprozeßrechnung - Problemprämisse und Grundstruktur, Arbeitsbericht Nr. 3/1983, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und betriebswirtschaftliche Planung, Universität Köln, Köln 1983.

Matthes,W. (1985c)

Matthes,W.; Albers,E.; Hoppe,R.: Integrierte Projekttermin- und Anpassungsplanung (Modul IV zur integrierten Projektsteuerung IPS), Arbeitsbericht Nr. 65, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und betriebswirtschaftliche Planung, Universität Köln, Köln 1985.

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.

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.

Merlin,P. (1976a)

Merlin,P.M.: A Methodology for the Design and Implementation of Communication Protocols; in: IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-24 (1976), S. 614-621.

Meyer,H. (1981)

Meyer,H.: Strukturaussagen in Entscheidungsnetzwerken, Königstein 1981.

Meyer,M. (1985)

Meyer,M.; Hansen,K.: Planungsverfahren des Operations Research - für Informatiker, Ingenieure und Wirtschaftswissenschaftler, 3. Aufl., München 1985.

Michael,R. (1980)

Michael,R.: Aufbau einer Grobplanung für ein Unternehmen der Investitionsgüterindustrie; in: Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, 29. Jg. (1980), S. 387-394.

Miglioli (1982)

Miglioli,P.; Moscato,U.; Ornaghi,M.: Constructive Proofs as Programs Executable by PrT 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. 311-322.

Missbauer (1987)

Missbauer,H.: Optimale Werkstattbeauftragung unter dem Aspekt der Bestandsregelung, Linz 1987.

Moeller (1981)

Moeller,G.L.; Digman,L.A.: Operations Planning with VERT; in: Operations Research, Vol. 29 (1981), S. 676-697.

Montanari (1989)

Montanari,U.; Yankelevich,D.N.: An Algebraic View of Interleaving and Distributed Operational Semantics; in: Pitt,D.H.; Rydeheard,D.E.; Dybjer,P.; Pitts,A.M.; Poigne,A. (Hrsg.): Category Theory and Computer Science, 05.-08.09.1989 in Manchester, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science 389, Berlin - Heidelberg - New York ... 1989, S. 5-20.

Moore,L. (1976)

Moore,L.J.; Clayton,E.R.: GERT Modeling and Simulation: Fundamentals and Applications, New York 1976.

Moshman (1963)

Moshman,J.; Johnson,J.; Larsen,M.: RAMPS - A Technique for Resource Allocation and Multi-Project Scheduling; in: o.V.: AFIPS Conference Proceedings, Proceedings of the 1963 Spring Joint Computer Conference, Baltimore 1963, S. 17-27.

Müller,A. (1987)

Müller,A.: Produktionsplanung und Pufferbildung bei Werkstattfertigung, Dissertation unter dem Titel "Der Pufferbedarf im Rahmen der kurzfristigen Produktionsplanung bei Werkstattfertigung", Technische Hochschule Aachen 1986, Wiesbaden 1987.

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-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).

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.

Muscatti (1970)

Muscatti, M.: Zur Optimierung der Zeitplanung unter besonderer Berücksichtigung von ablauf-homogenen Prozessen, Dissertation, Universität Köln, Köln 1970.

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, K. (1975b)

Neumann, K.: Operations Research Verfahren, Band III: Graphentheorie, Netzplantechnik, München - Wien 1975.

Neumann, K. (1979)

Neumann, K.; Steinhardt, U.: GERT Networks and the Time-Oriented Evaluation of Projects, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 172, Berlin - Heidelberg - New York 1979.

Neumann, K. (1989a)

Neumann, K.: Graphen und Netzwerke; in: Gal, T. (Hrsg.): Grundlagen des Operations Research, (Band) 2: Graphen und Netzwerke - Netzplantechnik, Transportprobleme - Ganzzahlige Optimierung, 2. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York ... 1989, S. 1-164.

Neumann, K. (1989b)

Neumann, K.: Netzplantechnik; in: Gal, T. (Hrsg.): Grundlagen des Operations Research, (Band) 2: Graphen und Netzwerke - Netzplantechnik, Transportprobleme - Ganzzahlige Optimierung, 2. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York ... 1989, S. 165-260.

Neumann, K. (1990)

Neumann, K.: Stochastic Project Networks - Temporal Analysis, Scheduling and Cost Minimization, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 344, Berlin - Heidelberg - New York ... 1990.

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 (1974)

Noe, J.D.; Crowley, C.P.; Anderson, T.L.: The Design of an Interactive Graphical Net Editor; in: o.V.: Northwest 74: Proceedings of the CIPS-ACM Pacific Regional Symposium, 23.-24.05.1974 in Vancouver, Vancouver 1974, S. 386-402.

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.

Pagnoni (1985a)

Pagnoni, A.: Stochastic invariance in predicate/transition nets; 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. 129-139.

Pagnoni (1990)

Pagnoni, A.: Project Engineering - Computer-Oriented Planning and Operational Decision Making, Berlin - Heidelberg - New York ... 1990.

Parikh (1965)

Parikh, S.C.; Jewell, W.S.: Decomposition of Project Networks; in: Management Science, Vol. 11 (1965), S. 444-459.

Patil (1975a)

Patil,S.S.: An Asynchronous Logic Array, Computation Structures Group Memo No. 111, Project MAC, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts) 1975.

Patzak (1975)

Patzak,G.: Stochastische Netzpläne und ihre Berechnung mittels Simulation; in: Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, 24. Jg. (1975), S. 229-232 u. 291-296.

Peterson,J. (1977)

Peterson,J.L.: Petri Nets; in: Computing Surveys, Vol. 9 (1977), S. 223-252.

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. (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. (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.

Phillips,D. (1974)

Phillips,D.T.; Slovick,R.F.: A GERTS III Q Application to a Production Line; in: o.V.: Proceedings of the 1974 Annual AIIE National Conference, New York 1974, S. 307-318.

Phillips,D. (1975)

Phillips,D.T.; Pritsker,A.A.B.: GERT Network Analysis of Complex Production Systems; in: International Journal of Production Research, Vol. 13 (1975), S. 223-237.

Pitt (1989)

Pitt,D.H.; Rydeheard,D.E.; Dybjer,P.; Pitts,A.M.; Poigne,A. (Hrsg.): Category Theory and Computer Science, 05.-08.09.1989 in Manchester, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science 389, Berlin - Heidelberg - New York ... 1989.

Polanyi (1962)

Polanyi,M.: Personal Knowledge - Towards a Post-Critical Philosophy, 2. Druck, London - Chicago 1962.

Polanyi (1985)

Polanyi, M.: Implizites Wissen, Frankfurt 1985.

Priese (1983)

Priese, L.: Automata and Concurrency; in: Theoretical Computer Science, Vol. 25 (1983), S. 221-265.

Prinoth (1983a)

Prinoth, R.: Construction of Distributed Systems from Cycle-Free Finite Automata; 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. 199-220.

Pritsker (1966a)

Pritsker, A.A.B.: GERT: Graphical Evaluation and Review Technique, Memorandum RM-4973-NASA, Rand Corporation, Santa Monica 1966.

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.

Pritsker (1966c)

Pritsker, A.A.B.; Whitehouse, G.E.: GERT: Graphical Evaluation and Review Technique, Part II. Probabilistic and Industrial Engineering Applications; in: The Journal of Industrial Engineering, Vol. 17 (1966), S. 293-301.

Pritsker (1968a)

Pritsker, A.A.B.: GERT Networks; in: The Production Engineer, o.Jg. (1968), S. 499-506.

Pritsker (1977)

Pritsker, A.A.B.: Modeling and Analysis Using Q-GERT Networks, New York - London - Sydney - Toronto 1977.

Pütz, W. (1973)

Pütz, W.: Modifikationen der Netzplantechnik für eine kurzzeitorientierte elastische Ablaufplanung in Druckereibetrieben, Dissertation, Universität Köln, Köln 1973.

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.

Rabetge (1991)

Rabetge, C.: Fuzzy Sets in der Netzplantechnik, Dissertation, Universität Göttingen 1990, Wiesbaden 1991.

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.

Rammig (1979a)

Rammig, F.J.: An Introduction to the Concurrent Algorithmic Programming Language CAP or Looking at CAP with the Revised Ironman's Eyes, Forschungsbericht Nr. 80, Abteilung Informatik, Universität Dortmund, Dortmund 1979.

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.

REFA (1985e)

REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Planung und Steuerung, Teil 5, 4. Aufl., München 1985.

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.)

Reisig (1986a)

Reisig,W.: Petrinetze - Eine Einführung, 2. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York Tokyo 1986.

Rescher (1985a)

Rescher,N.: The Strife of Systems - An Essay on the Grounds and Implications of Philosophical Diversity, Pittsburgh 1985.

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).)

Runzheimer (1986)

Runzheimer,B.: Operations Research I - Lineare Planungsrechnung und Netzplantechnik, 3. Aufl., Wiesbaden 1986.

Russell,R.A. (1986)

Russell,R.A.: A Comparison of Heuristics for Scheduling Projects with Cash Flows and Resource Restrictions; in: Management Science, Vol. 32 (1986), S. 1291-1300.

Sanders,M. (1987)

Sanders,M.: Quantitative Analyse Interner Kontrollsysteme - Modellbildung und empirische Anwendung, Berlin 1987.

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.

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.

Schroff (1974)

Schroff,R.: Vermeidung von totalen Verklemmungen in bewerteten Petrinetzen, Dissertation, Technische Universität München, München 1974.

Schwarze,J. (1970)

Schwarze,J.: Strukturmodelle der Netzplantechnik; in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 22. Jg. (1979), S. 699-726.

Schwarze,J. (1978)

Schwarze,J.: Ein verallgemeinertes deterministisches Netzplanmodell; in: Zeitschrift für Operations Research, Bd. 22 (1979), S. 173-194.

Schwarze, J. (1983)

Schwarze, J.: Netzplantechnik, Herne - Berlin 1983.

Schwarze, J. (1990)

Schwarze, J.: Netzplantechnik - Eine Einführung in das Projektmanagement, 6. Aufl., Herne - Berlin 1990.

Schweitzer, M. (1966)

Schweitzer, M.: Beitrag zur optimalen Terminierung; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 36. Jg. (1966), S. 41-52.

Seelbach (1979)

Seelbach, H.: Ablaufplanung bei Einzel- und Serienproduktion; in: Kern, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, Stuttgart 1979, Sp. 12-28.

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. (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.

Simon, H. (1976c)

Simon, H.A.: Bradie on Polanyi on the Meno Paradox; in: Philosophy of Science, Vol. 43 (1976), S. 147-150.

Speranza (1991)

Speranza, M.G.; Vercellis, C.: A Hierarchical Multiobjective Approach to Project Management; 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. 191-204.

Stachowiak (1973)

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie, Wien - New York 1973.

Starke (1980)

Starke, P.H.: Petri-Netze - Grundlagen, Anwendungen, Theorie, Berlin (Ost) 1980.

Steinberg (1980)

Steinberg, E.; Lee, W.B.; Khumawala, B.M.: A Requirements Planning System For The Space Shuttle Operations Schedule; in: Journal of Operations Management, Vol. 1 (1980), No. 2, S. 69-76.

Steinhardt (1977)

Steinhardt, U.: Auswertung und optimale Steuerung von Entscheidungsnetzplänen, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt 1977.

Stempell (1970)

Stempell, D.; Frotscher, J.; Gericke, R.; Hennig, M.; Schallehn, W.; Schreiter, D.; Tauer, J.: Handbuch der Netzplantechnik, Berlin 1970.

Stommel, H. (1976)

Stommel, H.J.: Betriebliche Terminplanung, Berlin - New York 1976.

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.

Taylor,B. (1980a)

Taylor,B.W.; Moore,L.J.: R&D Project Planning With Q-GERT Network Modeling and Simulation; in: Management Science, Vol. 26 (1980), S. 44-59.

Taylor,B. (1980b)

Taylor,B.W.; Moore,L.J.; Hammesfahr,R.D.: Global Analysis of a Multi-Product, Multi-Line Production System Using Q-GERT Modeling and Simulation; in: AIIE Transactions, Vol. 12 (1980), S. 145-155.

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.

Thome,R. (1990)

Thome,R.: Wirtschaftliche Informationsverarbeitung, München 1990.

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.

Trede (1990)

Trede,N.: Prinzipien guter Softwarespezifikation; in: 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, S. 7-21.

Ullrich (1974)

Ullrich,G.; Wendt,S.: Petri-Netze zur Modellierung von Schaltwerksystemen; in: o.V.: Nachrichtentechnische Fachberichte, Bd. 49: NTG-Fachtagung Entwurfsautomatisierung, Braunschweig 1974, S. 150-155.

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 (1982c)

Valette,R.: Verification des Specification d'un Automatsime; 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.

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.

van Looveren (1986)

van Looveren,A.J.; Gelders,I.F.; van Wassenhove,L.N.: A Review of FMS Planning Models; in: Kusiak,A. (Hrsg.): Modelling and Design of Flexible Manufacturing Systems, Amsterdam - Oxford - New York - Tokyo 1986, S. 3-31.

Vincke (1986)

Vincke,P.: Analysis of multicriteria decision aid in Europe; in: European Journal of Operational Research, Vol. 25 (1986), S. 160-168.

Völzgen (1969)

Völzgen,H.; Dick,R.: Forschungsplanung mit GERT, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 39. Jg. (1969), S. 515-530.

Vollmann (1984)

Vollmann,T.E.; Berry,W.L.; Whybark,D.C.: Manufacturing Planning and Control Systems, Homewood 1984.

Weber, K. (1968)

Weber, K.: Projektanalyse mit CPM; in: Industrielle Organisation, 37. Jg. (1968), S. 236-248.

Whitehouse (1969)

Whitehouse, G.E.; Pritsker, A.A.B.: GERT: Part III - Further Statistical Results; Counters, Renewal Times, and Correlations; in: AIIE Transactions on Industrial Engineering Research and Development, Vol. 1 (1969), S. 45-50.

Whitehouse (1973)

Whitehouse, G.E.: Systems Analysis and Design Using Network Techniques, Englewood Cliffs 1973.

Wiederhold (1986b)

Wiederhold, G.; Blum, R.L.; Walker, M.: An Integration of Knowledge and Data Representation; in: Brodie, M.L.; Mylopoulos, J. (Hrsg.): On Knowledge Base Management Systems - Integrating Artificial Intelligence and Database Technologies, New York - Berlin - Heidelberg ... 1986, S. 431-444.

Wiest (1964)

Wiest, J.D.: Some Properties of Schedules for Large Projects with Limited Resources; in: Operations Research, Vol. 12 (1964), S. 395-418.

Wille (1972)

Wille, H.; Gewalt, K.; Weber, H.D.: Netzplantechnik - Methoden zur Planung und Überwachung von Projekten, Band 1: Zeitplanung, 3. Aufl., München - Wien 1972.

Williams, H. (1985)

Williams, H.P.: Model Building in Mathematical Programming, 2. Aufl., Chichester - New York - Brisbane - Toronto - Singapore 1985.

Windisch (1979)

Windisch, I.: Zur Anwendung von Petri-Graphen beim rechnergestützten Entwurf digitaler Automaten, Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden 1979.

Wolfe (1980)

Wolfe, P.M.; Cochran, E.B.; Thompson, W.J.: A GERTS-Based Interactive Computer System for Analyzing Project Networks Incorporating Improvement Curve Concepts; in: AIIE Transactions, Vol. 12 (1980), No. 1, S. 70-79.

Yoeli (1982b)

Yoeli, M.: Behavioral Specifications of Control Structures, Interim Scientific Report No. 1, Computer Science Department, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa 1982.

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 Zelewski, S.: Netztheoretische Ansätze zur Konstruktion und Auswertung von logisch fundierten Problembeschreibungen, Arbeitsbericht Nr. 11 (2. Aufl. des Arbeitsberichts 8/1986), Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1986.

Zelewski (1986c)

Zelewski, S.: Netztheoretische Fundierung von parallelen Algorithmen für die Lösung linear-ganzzahliger OR-Modelle, Arbeitsbericht Nr. 12 (2. Aufl. des Arbeitsberichts 9/1986), Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1986.

Zelewski (1987a)

Zelewski, S.: Das Petrinetz-Konzept - Ansätze zu seiner inhaltlichen Charakterisierung -, Interner Arbeitsbericht, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1987.

Zelewski (1988b)

Zelewski, S.: Netztheoretische Fundierung von parallelen Algorithmen zur Bestimmung von Lösungen für linear-ganzzahlige OR-Modelle ohne Extremalziele; in: Angewandte Informatik, 30. Jg. (1988), S. 352-362.

Zelewski (1989a)

Zelewski, S.: Komplexitätstheorie - als Instrument zur Klassifizierung und Beurteilung von Problemen des Operations Research, Braunschweig - Wiesbaden 1989.

Zelewski (1989c)

Zelewski, S.: Petrinetze für die Konstruktion und Konsistenzanalyse von logisch orientierten Problembeschreibungen, Arbeitsbericht Nr. 28, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1989.

Zelewski (1991b)

Zelewski, S.: Kritische Faktoren beim Einsatz von Expertensystemen; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 61. Jg. (1991), S. 237-258.

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.

Zimmermann, G. (1988)

Zimmermann, G.: Produktionsplanung variantenreicher Erzeugnisse mit EDV, Berlin - Heidelberg - New York ... 1988.

Zimmermann, H. (1971)

Zimmermann, H.-J.: Netzplantechnik, Berlin - New York 1971.

Zimmermann, H. (1987a)

Zimmermann, H.-J.: Methoden und Modelle des Operations Research, Braunschweig - Wiesbaden 1987.

Zimmermann, H. (1987b)

Zimmermann, H.-J.: Fuzzy Sets, Decision Making, and Expert Systems, Boston - Dordrecht - Lancaster 1987.

**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.