Interner Arbeitsbericht

Das Petrinetz-Konzept
- Ansätze zu seiner inhaltlichen Charakterisierung -

von
Dr. Stephan Zelewski

Köln 1987

Vorbemerkungen zu internen Arbeitsberichten

Interne Arbeitsberichte dienen ausschließlich der Diskussion von vorläufigen Arbeitsergebnissen unter den Mitarbeitern des Industrieseminars und interessierten Dritten. Sie sind weder für die Veröffentlichung bestimmt noch hinsichtlich inhaltlicher oder formaler Anforderungen hierfür vorbereitet. Die Autoren behalten sich vor, die niedergelegten Zwischenergebnisse im Verlauf ihrer zukünftigen Arbeit zu verändern, zu erweitern oder zurückzunehmen.

Da nur eine Kommunikation über vorläufige Arbeitsergebnisse, nicht aber deren publikationsreife Absicherung angestrebt wird, kann die Ausarbeitung belegender Fußnoten späteren Überarbeitungen vorbehalten oder unvollständig sein. Falls abgekürzte Referenztitel verwendet werden, so beziehen sie sich auf Literatursammlungen/Literatur-Datenbanken der Verfasser, die dort auf Wunsch eingesehen oder partiell ausgedruckt werden können.

Vorbemerkung zum hier vorliegenden internen Bericht

Die Referenztitel der angeführten Quellen können in der Literatur-Datenbank HABILLIT.DBF des Verfassers mit Hilfe der Literaturverwaltungsprogramme LITERAT.EXE oder PROLIT.EXE (Version 3.0) erschlossen werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Vorbemerkungen zum Petrinetz-Konzept

Das Petrinetz-Konzept hat seit seinen Ursprüngen in den frühen sechziger Jahren derart vielfältige Fortentwicklungen - sowohl hinsichtlich seiner formalen Präzisierung als bezüglich seiner materiellen Interpretation - erfahren, daß eine Charakterisierung seiner Extension erforderlich erscheint.

Der Terminus "Konzept" wird hier als ein Sammelbegriff verstanden, dessen inhaltliche Fülle sich in drei Ebenen gliedern läßt:

- Objekte des Petrinetz-Konzepts sind die Petrinetze.
- Die Petrinetz-Theorie faßt alle Aussagen über ihr Erkenntnisobjekt "Petrinetz" zusammen.
- Petrinetz-Instrumente stellen Techniken dar, die zur Gestaltung von Petrinetzen oder zur Gewinnung von Aussagen über Petrinetze eingesetzt werden können.

Im vorliegenden Arbeitsbericht wird eine Charakterisierung der "wesentlichen" Konstituenten von Petrinetzen aus den Blickwinkeln unterschiedlicher, aber inhaltlich verwandter Konzepte unternommen. Über diese Ausdeutung ihres Erkenntnisobjekts wird zugleich die Petrinetz-Theorie charakterisiert.

Petrinetz-Instrumente werden in der Regel computergestützt implementiert. Daher erforderte ihre Behandlung eine nähere Auseinandersetzung mit den verfügbaren Softwarepaketen für die Gestaltung und Analyse von Petrinetzen. Dieser Software-Markt befindet sich zur Zeit in reger Entwicklung, so daß generalisierende und zugleich beständige Aussagen nur schwer möglich sind. Es existieren jedoch aussagekräftige Übersichten über den jeweils aktuellen Stand des Software-Angebots. Aus den beiden vorgenannten Gründen wird auf das Petrinetz-Konzept in instrumenteller Sicht nicht weiter eingegangen.

Jede Charakterisierung eines Konzepts durch die Angabe "wesentlicher" Konzeptmerkmale kann nicht vollständig zufriedenstellen, sofern nicht der essentialistische oder der nominalistische Standpunkt geteilt werden. Der Nominalismus behauptet, es sei möglich, die "Wesenheit" eines Begriffs - hier: eines Konzepts - subjektunabhängig zu erkennen. Der Verf. kann dieser Ansicht aus fundamentalen erkenntnistheoretischen Gründen nicht folgen, die in der Literatur eingehend dargelegt sind. Aber auch der nominalistische Ansatz, durch die willkürliche Definition eines Begriffs dessen Inhalt - letztlich dogmatisch - festzulegen, führt hier nicht weiter. Denn das Ziel, die Charakteristika herauszuarbeiten, die allen, in der einschlägigen Literatur dargelegten zahlreichen Varianten des Petrinetz-

Konzepts[1]) gemeinsam zukommen, lassen sich nicht durch definitorische Setzung erkennen.

---

1) Diese Variantenvielfalt findet in zwei Phänomenen ihren Ausdruck, die auch von **Priese (1979a)**, S. 7, angesprochen werden.
Erstens hat bis heute noch keine Publikation vermocht, sich als wissenschaftlich allgemein anerkanntes Standardwerk zum Petrinetz-Konzept durchzusetzen. Es existiert keine allseits akzeptierte Festlegung, was ein Petrinetz "an sich" sei. Zwar zeichnen sich in neuester Zeit unter den europäischen Anhängern des Petrinetz-Konzepts Bemühungen zur Standardisierung von Definitionen und Notationen ab; vgl. **Best (1985e)**. Doch diese Ansätze beziehen die außereuropäischen, insbesondere die US-amerikanischen Konzeptanhänger nicht ein. Darüber hinaus haben sie noch nicht einmal in Europa einhellige Akzeptanz gefunden.
Zweitens erscheint ein Großteil der Schriften zum Petrinetz-Konzept als sogenannte "graue Literatur" in der Gestalt von Forschungsberichten, Memoranden oder Tagungsbeiträgen, die nicht in allgemein zugänglicher Weise veröffentlicht werden, sondern nur in eng begrenzten Kreisen interessierter Personen kursieren. Diese graue Petrinetz-Literatur gelangt oftmals nicht über die Grenzen ihres Entstehungs-Kreises hinaus. Da auch die persönliche Kommunikation zwischen solchen Kreisen häufig sehr dürftig ausfällt, sind mehrere "Petrinetz-Gemeinden" entstanden, die jeweils ihre eigene Variante des Petrinetz-Konzepts kultivieren. Eine Konvergenz dieser Varianten in Richtung auf eine einheitliche Vorstellung, was ein Petrinetz "an sich" sei, kann zur Zeit (noch) nicht beobachtet werden.
Auf der anderen Seite darf aber auch nicht übersehen werden, daß gerade die Variantenvielfalt die inhaltliche Fülle des Petrinetz-Konzepts wesentlich prägt. Der mangelnde Standardisierungserfolg kann insofern als Positivum betrachtet werden, als das Konzept gegenüber fruchtbaren Fortentwicklungen offengehalten, vor erkenntnisbehindernden Standards geschützt wird. Das Petrinetz-Konzept bleibt gegenüber Modifizierungen, die sich aus dem jeweils verfolgten Zweck der Konzeptanwendung ergeben, zugänglich. Vgl. zu dieser Offenheit des Petrinetz-Konzepts auch die Anmerkungen bei **Oberquelle (1980)**, S. 483; **Degli Antoni (1980a)**, S. 9.
Schon *Petri* hat in seiner grundlegenden Arbeit darauf hingewiesen, daß das von ihm angeregte Netz-Konzept keineswegs als (formal) abgeschlossen betrachtet werden dürfe; vgl. **Petri (1962)**, S. 4.

Es bleibt nur der dritte Weg, die einschlägige Literatur hinsichtlich einer maximalen Schnittmenge gemeinsamer Merkmale von Petrinetzen zu untersuchen[2]. Darüber hinaus soll es sich um Merkmale handeln, die für das Petrinetz-Konzept charakteristisch sind, also anderen Konzepten nicht in der gleichen oder ähnlichen Kombination zukommen.

Des weiteren wird der Anspruch aufgehoben, sämtliche in der Literatur zum Petrinetz-Konzept vertretenen Varianten von Petrinetzen erfassen zu können Vielmehr erfolgt eine subjektive Auswahl derjenigen Varianten, die nach Ansicht des Verf. die wichtigsten Richtungen des Petrinetz-Konzepts repräsentieren. Als Kriterien der Wichtigkeit einer Richtung wurden die Anzahl von Referenzverweisen in der Petrinetz-Literatur, die Einschätzung der inhaltlichen Tiefe dieser Richtung und das Gewicht ihrer Anhänger auf wissenschaftlichen Veranstaltungen zum Petrinetz-Konzept herangezogen.

Bei dieser Vorgehensweise tritt jedoch alsbald die Schwierigkeit zu Tage, daß die maximale Schnittmenge gemeinsamer und charakteristischer Merkmale inhaltlich derart eng ausfällt, daß eine solche "Charakterisierung" des Petrinetz-Konzepts nicht mehr den inhaltlichen Reichtum der als wichtig erachteten Konzeptvarianten widerzuspiegeln vermag.

Daher folgt der Verf. einem vierten Weg, der sich grundsätzlich am Schnittmengen-Ansatz orientiert, aber das Petrinetz-Konzept unter verschiedenen Perspektiven beleuchtet. Auf diese Weise wird es möglich, durch mehrfachen Perspektivenwechsel den konzeptionellen Reichtum von Petrinetzen zu verdeutlichen, ohne auf die Herausarbeitung von gemeinsamen und charakteristischen Merkmalen zu verzichten, die jeweils für den Bereich derjenigen Petrinetz-Literatur gelten, die sich unter die aktuelle Sichtweise des Petrinetz-Konzepts subsu-

---

2) Vgl. zu dieser Vorgehensweise die subtile Begründung bei **Holthoff (1988)**, S. ??ff. (derzeit im Druck), für die ähnliche Problematik, die Charakteristika des Wirtschaftlichkeitsbegriffs aus der betriebswirtschaftlichen Literatur herauszuarbeiten.

mieren läßt. Es werden zwei Hauptperspektiven unterschieden. Die erste charakterisiert das Petrinetz-Konzept aus der Sicht seiner historischen Entwicklung. Die zweite beleuchtet das Petrinetz-Konzept aus der Sicht verwandter Konzepte.

2 Petrinetze in historischer Sicht

2.1 Petri's Theorie informationsverarbeitender Systeme

Das Petrinetz-Konzept geht auf die Dissertation "Kommunikation mit Automaten"[3] von *Carl Adam Petri* aus dem Jahr 1962 zurück[4]. *Petri* setzte sich mit der Theorie informationsverarbeitender Systeme im allgemeinsten, also nicht notwendig automatisierten Sinne auseinander. Das Schwergewicht seiner Untersuchungen lag auf der Kommunikation zwischen den Systemkomponenten, die zur Erfüllung des Systemzwecks die Aktivitäten der Komponenten koordiniert. Diese Kommunikation wird als ein Informationsfluß realisiert, der zwischen den koordinierten Komponenten durch den Austausch von physikalischen Signalen erfolgt[5]. In fast allen Varianten des Petrinetz-Konzepts spielt noch heute der Fluß von Objekten durch die jeweils betrachteten Systeme eine dominierende Rolle. Allerdings ist der Objektbegriff nicht mehr als Informationen ohne innere Struktur ("Signale") beschränkt, sondern umfaßt Informationen mit komplexer Eigenstruktur ("Datenvektoren") ebenso wie materielle Güter, z.B. Werkstücke.

Petri betrachtete die physikalische Verwirklichung des Informationsflusses in prinzipiell realisierbaren informationsverarbeitenden Systemen unter sehr allgemeinen Voraussetzungen, die zu nur wenigen und - hinsichtlich des Ausschlusses unzulässiger Gestaltungsal-

---

3) Vgl. Petri (1962). Diese Arbeit beruhte ihrerseits auf dem Konzept der Transitionsnetze, die seit Beginn der sechziger Jahre eingehender studiert wurden; vgl. Petri (1980a), S. 1.

4) Vgl. **Hack (1972)**, S. 8; **Misunas (1973)**, S. 475; **Baer (1973a)**, S. 49; **Wendt (1974b)**, S. 209; **Hack (1975a)**, S. 13; **Ullrich (1976)**, S. 2.5; **Peterson (1977)**, S. 226; **Meldman (1977)**, S. 33; **Murata (1977a)**, S. 412; **Zisman (1977)**, S. 26; **Holt,A. (1979)**, S. 39; **Genrich (1979a)**, S. 124; **Oberquelle (1979a)**, S. A.1; **Genrich (1980a)**, S. 23; **Peterson (1981)**, S. 3 u. 271; **Rosenstengel (1982)**, S. 2; **Bauer (1982)**, S. 56.

5) Vgl. **Petri (1962)**, S. 4 u. 44; **Petri (1967)**, S. 123, 126, 132f. u. 135.

ternativen - schwachen Konzept-Prämissen führten. Er nahm lediglich an[6]:

- Es existiert mindestens eine quantitative Größe. Diese findet in der späteren Konzept-Fortentwicklung ihren Niederschlag als Netz-Markierung[7].
- Es gelten Erhaltungssätze für die quantitative(n) Größe(n)[8] und für die verarbeitete Information[9].
- Es werden charakteristische Reaktionsprinzipien von den Aktionen des informationsverarbeitenden Systems eingehalten[10].

Auf der Basis dieser drei, aus der theoretischen Physik entlehnten Grundannahmen entwickelte *Petri* eine Theorie informationsverarbeitender Systeme. Diese Systeme sind dadurch gekennzeichnet, daß sie einerseits aus physikalisch realisierbaren Schaltelementen konkret implementiert werden können[11] (Konstruktivitäts-Postulat) und anderseits die Realisierung desjenigen Informationsflusses sicherstellen, der zur Erfüllung der Systemzwecks die Systemkomponenten koordinieren muß. Wesentlich hierbei ist, daß der physikalische Fluß von Informationsträgern auf der theoretischen Ebene als ein Netz beschrieben wird[12] (daher die Konzeptbezeichnung "Petrinetze").

Ein solches Netz gibt den strukturellen Zusammenhang derjenigen Ereignisse wieder, die durch die informationsflußerzeugenden Aktionen ("Schaltakte") der Schalt-

---

6) Vgl. **Petri (1962)**, S. 45.

7) Vgl. **Petri (1980a)**, S. 1.

8) Jede quantitative Größe (Markenanzahl) bleibt im Hinblick auf "konservative" Aktionen des informationsverarbeitenden Systems erhalten; vgl. **Petri (1962)**, S. 107f.

9) Die Informationserhaltung gilt für den Fall "regenerativer" Systeme (Netze); vgl. **Petri (1962)**, S. 112f. u. 117. Erhaltungsgesetze für Informationen in Petrinetzen hebt auch **Genrich (1980c)**, S. 721, hervor.

10) Vgl. **Petri (1962)**, S. 107ff.

11) Vgl. **Petri (1962)**, S. 45; **Petri (1967)**, S. 123.

12) Vgl. zum folgenden **Petri (1962)**, S. 47f.

elemente des informationsverarbeitenden Systems konstituiert werden. Diese Schaltakte stellen Ereignisse dar, in denen Signale erzeugt und fortgeleitet oder aber empfangen und vernichtet werden. Dem physikalischen Signal-Fluß im informationsverarbeitenden System entspricht als theoretisches Äquivalent der Informationsfluß im Netz. Jede "Momentaufnahme" des Informationsflusses im Netz zeigt die aktuelle Verteilung der Signale im zugrundeliegenden System.

Petri erhob den Anspruch, allgemeinste reale Phänomene der Informationsverarbeitung und Kommunikation[13)] durch seine Netzkonstruktion theoretisch erfassen zu können[14)], sofern diese Phänomene auf logischen Verknüpfungen der Aktionen von Schaltelementen beruhen[15)]. Des weiteren sollte es mit Hilfe kombinatorisch-topologischer Methoden für die Netzanalyse möglich sein, reale informationsverarbeitende Systeme einfacher konfigurieren und programmieren zu können, als es konventionelle Theorien der Informatik - etwa die Theorie abstrakter Automaten - zuließen[16)].

Dieser Anspruch blieb allerdings im Rahmen der Werke *Petri*'s programmatischer Natur; er wurde nicht konkret ausgelöst. Dagegen legte er aber das konzeptionelle Fundament für die Konstruktion informationsflußdarstellender Netze, die - wegen ihrer Bedeutung für alle späteren Fortentwicklungen auf dem Gebiet der Petrinetze - hinsichtlich ihrer konzeptionellen Grundlagen detaillierter gewürdigt werden.

---

13) Kommunikation wird hier als Informationsaustausch zwischen informationsverarbeitenden Systemen verstanden.

14) Vgl. **Petri (1967)**, S. 123.

15) *Petri* betrachtete diese Qualifizierung nicht als real wirksame Restriktion, da er seine Netzkonstruktion für jede "wirklich durchführbare" (**Petri (1967)**, S. 123) Informationsverarbeitungsaufgabe als geeignet erachtete.

16) Vgl. **Murata (1977c)**, S. 2.

2.2 Kombinatorische und automatentheoretische Grundlagen

Ausgangspunkt für die Konzipierung von Netzen, die Informationsflüsse beschreiben sollen, ist die Analyse kombinatorischer Systeme auf automatentheoretischer Basis. Innerhalb des Erkenntnisrahmens solcher Systeme wird von *Petri* das Problem untersucht, welche Klassen von Input-Signalfolgen durch einen Automaten erkannt und - seiner Spezifikation entsprechend - zu korrekten Output-Signalfolgen verarbeitet werden können. Die formale Funktionsweise des Automaten wird durch ein fest vorgegebenes kombinatorisches System festgelegt, das - z.B. als "Maschinentafel"[17] - beschreibt, nach welchen Regeln eingehende Symbolfolgen in ausgehende Symbolfolgen transformiert werden. Die wesentliche Automatenleistung liegt also in der Neukombination von Symbolen, die seitens des physikalisch ausgerichteten Petrinetz-Konzepts in spezieller Weise als "Signale" interpretiert werden. Dieses Automatenkonzept stellt ein weithin akzeptiertes Paradigma der Beschreibung und Analyse informationsverarbeitender Systeme dar.

Es läßt sich zeigen, daß auf der Basis eines kombinatorischen Systems, das zum informationsverarbeitenden Symbolkombinieren nur die Operationen der Sequenzbildung, der Selektion und der Iteration zuläßt ("iteratives kombinatorisches System")[18], nicht jede beliebige Input-Signalfolge in jeder gewünschten - und formal definierbaren - Weise verarbeitet werden kann. Es handelt sich um rekursive Signalfolgen und Verarbeitungsopera-

---

17) Das Konzept der "Maschinentafeln" wird z.B. im Kontext der Turing-Automaten ausführlich dargelegt.

18) Vgl. Petri (1962), S. 14f.

tionen[19], wie sie z.B. in der Syntax der Programmiersprache ALGOL zugelassen sind[20].

Die Klasse informationsverarbeitender Automaten, deren interne Funktionsweise auf iterativen kombinatorischen Systemen beruht, ist koextensiv mit der Klasse der endlichen, deterministischen, synchronen, digitalen Automaten[21]. Die Input-Signalfolgen, die von diesen Automaten verarbeitet werden können, heißen reguläre Ausdrücke[22]. Um ein allgemeingültiges informationsverarbeitendes System zu konzipieren, muß diese Einschränkung auf reguläre Ausdrücke aufgehoben werden. Zu diesem Zweck benutzt *Petri* zur Spezifikation der Automaten-Funktionsweise rekursive statt iterative Systeme. Die wesentliche Neuerung besteht in der Einführung eines vierten Operators, der die Definition rekursiver Informationsverarbeitung zuläßt[23]. Automaten, die

---

19) Die Rekursivität eines Konzepts läßt sich in grober natürlichsprachlicher Annäherung als beliebig tiefe Verschachtelung seiner Komponenten umschreiben, bei der eine Komponente höherer (Schachtelungs-)Stufe in ihrer eigenen Definition die Definition der eingeschachtelten Komponenten der nächsttieferen Stufe voraussetzt. Auf diese Weise setzt jede höhere Komponente die Kenntnis der tieferen Komponenten voraus. Stets muß auf der tiefsten Stufe eine Komponente als Startpunkt der rekursiven Komponenten-Verschachtelung definiert werden, die auf keine andere Komponente mehr Bezug nimmt (Rekursions-Initialisierung). Ein typisches Beispiel rekursiver Konzepte ist die vollständige Induktion als mathematisches Beweisprinzip. Im Gegensatz zur rekursiven Rückbezüglichkeit von Komponenten-Definitionen auf bereits definierte Komponenten zeichnen sich iterative Konzepte dadurch aus, daß eine Komponente, die ohne Bezugnahme auf andere Komponenten definiert ist, wiederholt ausgeführt ("iteriert") wird. Näheres zu rekursiven Konzepten - insbesondere zu deren präziser Formaldefinition - findet sich vor allem im Zusammenhang mit der zahlentheoretischen Analyse rekursiver Funktionen, Mengen und Prädikate; vgl. z.B. **Kleene (1952)**, S. 270ff. u. 325ff.; **Peter (1957)**, S. 30ff. u. 172ff.; **Hermes (1978)**, S. 114ff.; sowie die Quellenangaben in **Zelewski (1986d)**, S. 15f.

20) Vgl. **Petri (1962)**, S. 23 u. 31f.

21) Vgl. **Petri (1962)**, S. 16 mit Beweisführung auf S. 19ff.

22) Vgl. **Genrich (1973b)**, S. 1.

23) Vgl. **Petri (1962)**, S.24f.

einen solchen Rekursions-Operator umfassen, stellen die Turing-Automaten dar[24]. Ihre interne Funktionsweise wird jeweils durch ein rekursives kombinatorisches System beschrieben, das Sequenzbildung, Selektion, Iteration und Rekursion als grundlegende Operationen zuläßt.

Solche Turing-Automaten oder rekursiven kombinatorischen Systeme gelten im Sinne der *Church*-These als allgemeingültige Konzepte zur Behandlung beliebiger Informationsverarbeitungs-Aufgaben. Die *Church*-These besagt[25], daß die Klassen der - im weitesten Sinne - berechenbaren Funktionen einerseits und der rekursiven Funktionen anderseits koextensiv sind. Wegen der Unmöglichkeit, den informalen Begriff der Berechenbarkeit im weitesten Sinne präzise zu definieren und mit dem formal definierten Begriff der Rekursivität exakt zu vergleichen, kann die Gültigkeit dieser These zwar nicht streng bewiesen werden[26]. Doch sie wird in der einschlägigen Literatur allgemein anerkannt[27]. Im Kontext des Petrinetz-Konzepts entsprechen berechenbare Funktionen beliebigen Informationsverarbeitungs-Aufgaben. Denn jede sprachlich formulierte Aufgabe läßt sich zumindest durch die abstrakte Gödelisierungs-Operation[28] in die inhaltlich äquivalente Berechnung von Funktionswerten transformieren.

Obwohl diese Turing-Automaten in Informatik und Automatentheorie ein weit verbreitetes und leistungsfähiges Erkenntnisinstrument darstellen, besitzen sie den -

---

24) Vgl. **Turing (1937)**, S. 231ff. u. 241ff.; **Brucker (1981)**, S. 148ff. u. 153ff.; **Zelewski (1986d)**, S. 12ff. (mit weiterführenden Quellenangaben).

25) Vgl. **Church (1936)**, S. 356ff.; **Kleene (1952)**, S. 300 u. 317ff.; **Zelewski (1986d)**, S. 15ff.

26) Vgl. **Kleene (1952)**, S. 317; **Stegmüller (1973)**, S. 46; **Zelewski (1986d)**, S. 17.

27) Vgl. **Peter (1957)**, S. 202ff.; **Zelewski (1986d)**, S. 17/Fn. 1) u. S. 18f.

28) Diese Operation beruht erstens auf der Eindeutigkeit der Zerlegung natürlichzahliger Terme in Primzahl-Faktoren sowie zweitens auf einer Zuordnung zwischen den Symbolen des Alphabets einer Sprache einerseits und den Exponenten der vorgenannten Primfaktoren anderseits.

angesichts des Konstruktivitäts-Postulats *Petri's* - entscheidenden Nachteil, ein Konzept zu bilden, das physikalisch nicht realisiert werden kann. Denn Turing-Automaten sind hinsichtlich der Länge ihres "Bandes", auf dem Input- und Output-Informationen extern sequentiell gespeichert werden, unbeschränkt - und somit potentiell unendlich[29]. Entweder steht ihnen ex ante ein - zumindest in einer Richtung - unendlich langer Bandspeicher zur Verfügung. Oder dieser externe Speicher kann ex post, d.h. während der Erfüllung einer Informationsverarbeitungs-Aufgabe, über alle physikalischen Längenbeschränkungen hinweg erweitert werden.

Die physikalische Unmöglichkeit solcher Turing-Automaten - und damit der enge Bezug von *Petri's* Gedanken zur Speziellen Relativitätstheorie *Einstein's* - läßt sich durch folgendes Gedankenexperiment verdeutlichen. Es werde unterstellt, es sei möglich, mit einem solchen Automaten jede Informationsverarbeitungs-Aufgabe in endlicher Zeit zu erfüllen, die in der Syntax eines rekursiven kombinatorischen Systems formuliert werden kann. Dann müßte - wie *Petri* nachgewiesen hat - eine Signalausbreitungsgeschwindigkeit, welche die Lichtgeschwindigkeit übertrifft, oder eine unendlich große Informationsdichte angenommen werden[30]. Dies ist jedoch physikalisch unmöglich, sofern die Ergebnisse der Speziellen Relativitätstheorie bzw. der Quantenmechanik als korrekte Realitätserkenntnis akzeptiert werden. *Petri* setzte die Gültigkeit dieser beiden Theorien - in

---

29) Vgl. **Petri (1962)**, S. 6 u. 23f.

30) Vgl. **Petri (1962)**, S. 39ff.; **Peterson (1981)**, S. 271.

Übereinstimmung mit dem herrschenden physikalischen Paradigma[31] - voraus[32].

Der Kerngedanke *Petri's* bestand darin, den Widerspruch zwischen den Forderungen nach Allgemeingültigkeit einerseits und physikalischer Realisierbarkeit anderseits in bezug auf informationsverarbeitende Systeme dadurch aufzulösen, daß er den weithin akzeptierten Rekursions-Operator durch einen neuartigen Operator ersetzte, ohne die umfassende Ausdrucksfähigkeit rekursiver kombinatorischer Systeme preiszugeben. Er setzte neben die Operatoren für die Sequenzbildung, Selektion und Iteration[33] den "Nebenläufigkeits"-Operator[34]. Dieser Operator definiert formal, daß die betroffenen Komponenten eines informationsverarbeitenden Systems kausal voneinander unabhängig ("nebenläufig") ihre Operationen ausführen.

Mit der Hilfe dieses neuen Operators gelang es *Petri*, Turing-Automaten - trotz ihrer theoretischen Unbeschränktheit - so in nebenläufig operierende Komponenten zu zerlegen, daß jede Komponente physikalisch realisiert werden kann und zugleich die Gesamtheit aller Komponenten genau die Funktion des zugrundeliegenden abstrakten Turing-Automaten erfüllt. Die ebenso

---

31) Es wird zwar auch die abweichende Ansicht vertreten, es könne physikalische "Fernwirkungen" mit Signalausbreitungs-Geschwindigkeiten geben, welche die Lichtgeschwindigkeit übertreffen. Dieser Standpunkt, der beispielsweise im Rahmen der Diskussion über die Existenz sogenannter "Tachyonen" (überlichtschnelle Elementarteilchen) vertreten wird, gilt jedoch als "exotische Spekulation". Zumindest wird im allgemeinen bestritten, daß durch solche Tachyonen, deren Existenz von manchen physikalischen Formalismen nicht ausgeschlossen wird, nicht zur Ausbreitung von wirkungsvermittelnden Signalen beitragen können.

32) Vgl. zur Begrenzung der Signalausbreitungs-Geschwindigkeit durch die Lichtgeschwindigkeit **Petri (1962)**, S. 5, 9 u. 33; **Petri (1983)**, S. 8. Vgl. zur Begrenzung der Informationsdichte durch die Unschärferelation **Petri (1962)**, S. 5, 10f. u. 33; **Petri (1983)**, S. 8.

33) Diese Operationen tragen in der Dissertation *Petri's* abweichende Bezeichnungen.

34) Vgl. **Petri (1962)**, S. 76; **Genrich (1973b)**, S. 1.

physikalisch realisierbare Wechselwirkung zwischen diesen Komponenten ist auf ihre unmittelbare Komponenten-Nachbarschaft begrenzt und rein kausaler Natur. Ein informationsverarbeitendes System, das aus solchen nebenläufig operierenden Komponenten besteht, wird folglich durch eine lokale und kausale Koordinierung seiner Komponenten charakterisiert[35]. Es kann durch Schaltwerke implementiert werden, deren technische Realisierung keine prinzipiellen Schwierigkeiten bereitet[36].

Die Segmentierung eines informationsverarbeitenden Systems in nebenläufig operierender Komponenten und deren lokal-kausale Koordinierung gewährleisten zwar seine physikalische Realisierungsmöglichkeit. Doch es bleibt - zur Erfüllung des Anspruchs auf Allgemeingültigkeit - nachzuweisen, daß ein solches System tatsächlich alle Informationsverarbeitungs-Aufgaben zu bewältigen vermag, die sich auf der Grundlage rekursiver kombinatorischer Systeme oder der äquivalenten Turing-Automaten formulieren lassen.

Dieser Nachweis ist grundsätzlich auf zwei Weisen möglich. Erstens kann von der lokal-kausalen Koordinierung nebenläufig operierender Komponenten ausgegangen und auf dieser Basis demonstriert werden, daß derart strukturierte informationsverarbeitende Systeme die rekursive Ausdrucksmächtigkeit von Turing-Automaten besitzen. Zweitens ist es aber auch möglich, das Konzept der Turing-Automaten zugrundezulegen und hierin die Koordinierung von nebenläufig operierenden Komponenten eines informationsverarbeitenden Systems einzubetten. *Petri* wählte die letzte Alternative.

Einerseits sind Turing-Automaten potentiell unbeschränkt. Anderseits wird - in Anlehnung an *Einstein's* Spezielle Relativitätstheorie - keine unendlich große Signalausbreitungs-Geschwindigkeit zugelassen. Daher

---

35) Vgl. **Petri (1962)**, S. 89f.

36) Im Gegensatz zu dieser unproblematischen Hardware-Realisierung bereitet dagegen die Implementierung asynchroner Koordinierungsmechanismen als Kontroll-Software noch erhebliche - allerdings nicht technische, sondern ablauf-logische - Schwierigkeiten.

ist eine zeitliche Koordinierung ("Synchronisierung") der Komponenten a priori ausgeschlossen[37]. Dies bedeutet insbesondere, daß die Synchronisationsmechanismen, die in heute üblichen Computer-Architekturen zur Koordinierung der Komponenten-Operationen verwendet werden, aus der Sicht des Petrinetz-Konzepts untauglich sind[38].

Petri beschritt daher einen neuartigen Weg, um die Koordinierung nebenläufig operierender System-Komponenten, die von jedem Zeitbezug befreit ("asynchron"), d.h. rein lokal-kausaler Natur ist, in das Konzept der Turing-Automaten aufzunehmen. Zu diesem Zweck führte er ein formalisiertes Konstrukt ein, das er als "Netz" bezeichnete.

---

37) Eine solche Koordinierung der Komponenten-Operationen setzte voraus, die Gleichzeitigkeit zwischen den Geschehnissen von Ereignissen in den Komponenten einerseits und der Werte eines synchronisierenden globalen (d.h. systemübergreifenden) Zeitparameters - etwa einer zentralen "System-Uhr" oder eines zentralen "Takt-Generators" - anderseits feststellen zu können. Dies ist aber unter den o.a. relativistischen Voraussetzungen nicht möglich. Diese führen des weiteren dazu, daß auch auf die Operationsgeschwindigkeiten der Komponenten kein Bezug genommen werden kann. Denn das Messen absoluter Geschwindigkeiten würde - im Kontext der Speziellen Relativitätstheorie - die Beobachtungsmöglichkeit gleichzeitiger Ereignisse erfordern.

38) Vgl. Petri (1962), S. 14, hinsichtlich des Ausschlusses der Synchronisierung durch zentrale System-Uhren oder durch Bezugnahme auf (absolute) Operationsgeschwindigkeiten von Komponenten.

2.3 Netze für die Koordinierung der Komponenten informationsverarbeitender Systeme

Ein Netz soll die asynchrone Koordinierung der Komponenten eines Turing-Automaten leisten, der fortan in seiner Funktion als informationsverarbeitendes System angesprochen wird. Obwohl ein solches "Turing"-System als Ganzes potentiell unendlich groß ist, muß das Netz nicht notwendig unendlich sein[39]. Es reicht aus, wenn es sich in jeder Richtung beliebig erweitern läßt. Dies wird durch seine spezielle Konstruktionsweise[40] gewährleistet. Sie ermöglicht, das Netz - ausgehend von einem Startpunkt - je nach Koordinierungserfordernissen an seinen aktuellen Rändern sukzessiv auszudehnen, ohne daß eine nicht-lokale Kommunikation zwischen Startpunkt und Randzonen zu Koordinierungszwecken erforderlich wäre[41]. Das Konstruktionsprinzip des Netzes ist endlich, läßt aber - in Übereinstimmung mit dem unbeschränkten Bandspeicher von Turing-Automaten - dennoch unbeschränkte Netzerweiterungen zu; ein solches Netz ist potentiell unendlich[42].

Das Netz enthält alle Ereignisse, die im Turing-System den Informationsfluß erzeugen, der zur Erfüllung einer vorgegebenen Informationsverarbeitungs-Aufgabe erforderlich ist. Diese Ereignisse werden ausschließlich aufgrund lokal-kausaler Mechanismen koordiniert, die sich immer als physikalische Wechselwirkungen realisieren lassen. *Petri* erhob den Anspruch[43], auf diese Weise:

---

39) Die unendliche Netzgröße wird zu Unrecht von **Peterson (1981)**, S. ; 271, behauptet.

40) Vgl. hierzu **Petri (1962)**, S. 88ff.

41) Vgl. **Petri (1962)**, S. 47.

42) **Petri (1962)**, S. 103f., spricht diesen Sachverhalt als Äquivalenz zu unendlichen Netzen an.

43) Vgl. **Petri (1962)**, S. 47.

- ein informationsverarbeitendes System mit endlichen, physikalisch realisierbaren Mitteln zu konstruieren,
- das hinsichtlich seiner Verarbeitungsfähigkeit ebenso mächtig wie ein - nur theoretisch möglicher - Turing-Automat ist.

Es gelang ihm zwar, die physikalische Realisierungsmöglichkeit von netz-koordinierten, turing-äquivalenten informationsverarbeitenden Systemen überzeugend nachzuweisen.

Doch bleibt die Einlösung seines zweiten Postulats nach Einschätzung des Verf. offen. Denn *Petri* baute seine Netzkonstruktion auf ein kombinatorisches System ohne den Rekursions-Operator auf, der für die Ausdrucksmächtigkeit von Turing-Automaten ausschlaggebend ist. Die Ausführungen in der Dissertation *Petri*'s zu den Beziehungen zwischen Rekursions- und Nebenläufigkeits-Operator bleiben schemenhaft; es fehlt eine formalisierte Definition dieser Beziehung, die hinsichtlich der behaupteten Turing-Äquivalenz präzise überprüft werden könnte[44]. Selbst *Petri* räumt ein, daß diese problematische Beziehung noch offen sei[45].

---

44) Petri (1962), S. 125, zeigt nur auf, daß sich einzelne irreguläre Ausdrücke, die per definitionem von endlichen, deterministischen, synchronen, digitalen Automaten nicht verarbeitet werden können, mit der Hilfe seines Netz-Konzepts als Input erkennen und zu einem korrekten Output verarbeiten lassen. Sein Schluß hieraus, alle irregulären Ausdrükken, die von rekursiven Turing-Automaten bewältigt werden, könnten auch auf der Basis des Netz-Konzepts verarbeitet werden ist jedoch nicht stringent. Erstens wird eine unzulässige Generalisierung von einzelnen exemplarischen irregulären Ausdrücken auf die Gesamtheit aller rekursiv-formulierbaren irregulären Ausdrücke vorgenommen. Zweitens nimmt *Petri* in seinen Beispielen nicht explizit auf den Rekursions-Operator als Instrument zur Bildung der irregulären Ausdrücke Bezug. Daher könnte deren Irregularität auch nicht-rekursiven Ursprungs sein, d.h. aus der Betrachtung nicht-endlicher, asynchron koordinierter Automaten resultieren. Allerdings vermag der Verf. nicht zu überblicken, ob die Zulässigkeit solcher Automaten mit der Anwendung des Rekursions-Operators äquivalent ist. In diesem Fall blieb aber immer noch der Einwand der unzulässigen Generalisierung bestehen.

45) Vgl. Petri (1962), S. 127f.

Später wurden von anderen Autoren streng formale Netz-Definitionen in die Fortentwicklung des Petrinetz-Konzepts eingebracht, die erlaubten, die Beziehung zwischen Rekursions- und Nebenläufigkeits-Operator zu analysieren. Es zeigte sich, daß solche Netze für die Koordinierung nebenläufig operierender System-Komponenten im allgemeinen nicht die Ausdrucksmächtigkeit von Turing-Automaten besitzen. Allerdings existieren besondere Netz-Klassen - wie die Petrinetze mit "Inhibitor-Kanten", "Nulltest-Fähigkeit" oder "Prioritäts-Schalten" -, die sowohl untereinander als auch zum Konzept der Turing-Automaten äquivalent sind.

Da im frühen Werk *Petri*'s eine formale Netz-Definition in einer der vorgenannten Weisen fehlt, kann letztlich nicht geklärt werden, ob seine vagen Ausführungen zur Turing-Äquivalenz auf einem Netz-Verständnis im erstgenannten allgemeinen oder im zweitgenannten besonderen Sinne beruhten. Wesentlich ist aber, daß der von *Petri* erstmals erhobene Anspruch des Petrinetz-Konzepts auf gleichzeitige Realisierbarkeit und Turing-Äquivalenz zumindest nachträglich eingelöst wurde.

2.4 Zusammenfassende Charakterisierung von Petri's Konzept informationsverarbeitender Systeme

Aus der Dissertation *Petri's* über das Thema, die nebenläufig operierenden Komponenten eines informationsverarbeitenden Systems mit Hilfe des neuartigen Konzepts "Netz" zu koordinieren, lassen sich - in historischer Perspektive - erste Aufschlüsse über charakteristische Merkmale des Petrinetz-Konzepts ableiten. Da dieses Konzept später in der Weise verallgemeinert wurde, daß Netze nicht notwendig auf den Kontext der Informationsverarbeitung eingeschränkt bleiben, wird nachfolgend von Systemen schlechthin gesprochen.

Die Entfaltung des Petrinetz-Konzepts nahm seit Mitte der sechziger Jahren eigenständige Züge an; es emanzipierte sich vom speziellen Erkenntnisinteresse *Petri's*, das sich durch die Attribute "physikalisch", "systemtheoretisch" und "informationstechnisch"[46] umschreiben läßt. Das Petrinetz-Konzept in seiner heute vorliegenden Gestalt erfüllt daher einerseits nicht mehr alle Spezifika, die sich aus der Arbeit *Petri's* ergeben, ist anderseits aber auch um andere Spezifika erweitert. Daher kann der Versuch, aus historischer Perspektive Charakteristika des Petrinetz-Konzepts aus der Dissertation von *Petri* abzuleiten, nur erste Hinweise liefern, die später teilweise revidiert werden müssen[47].

---

46) Vgl. zur Fixierung *Petri's* auf Informationsflüsse, Kommunikations-Phänomene oder informationsverarbeitende Systeme: **Petri (1962)**, S. 1, 44 u. 103; **Petri (1963)**, S. 386; **Petri (1967)**, S. 135; **Nutt (1972b)**, S. 5; **Wien (1974)**, S. 2; **Gostelow (1975)**, S. 345; **Lockemann (1975)**, S. 9; **Peterson (1977)**, S. 223 u. 226; **Scheschonk (1977)**, S. 3; **Eggert (1978)**, S. 39; **Kimm (1979)**, S. 169; **Oberquelle (1979a)**, S. A.1; **o.V. (1979b)**, S. 14; **Genrich (1980a)**, S. 23; **Starke (1980)**, S. 0; **Ramamoorthy (1980)**, S. 441; **Zuberek (1980)**, S. 88; **Peterson (1981)**, S. 3; **Valk (1981b)**, S. 141; **Kupka (1981)**, S. 14; **Hura (1982)**, S. 433; **Vidal-Naquet (1982b)**, S. 41; **Hansen (1983)**, S. 132.

47) Vgl. hierzu die Charakterisierung des Petrinetz-Konzepts - gemäß seines aktuellen Erscheinungsbilds - im 3. Abschnitt dieses Arbeitsberichts.

Als wesentliche Aspekte des Petrinetz-Konzepts ergeben sich - unter den vorgenannten Vorbehalten - folgende Anforderungen an ein System, das in Komponenten zerlegt vorgestellt wird, die nebenläufig operieren können und mit Hilfe eines Netzes zur Erfüllung des Systemzwecks koordiniert zusammenwirken sollen:

- Die aktiven Elemente ("Schaltelemente", "Ereignisse") eines Systems dürfen in der theoretischen Systemspezifizierung nur derart definiert werden, daß sie sich als endliche und diskrete physikalische Objekte realisieren lassen[48].
- Die Definition der aktiven Elemente muß auf (mindestens) eine quantitative Größe Bezug nehmen, Erhaltungssätze erfüllen und Reaktionsprinzipien beachten[49].
- Trotz der endlichen System-Definition können infolge der Möglichkeit, die koordinierenden Netze unbeschränkt zu erweitern, in einem solchen System unendliche Prozesse ablaufen[50].
- Es werden physikalische Prinzipien berücksichtigt, welche die Systemkonstruktion real begrenzen[51].

---

48) Vgl. **Petri (1962)**, S. 2, 45f. u. 48; **Petri (1963)**, S. 386; **Petri (1967)**, S. 123, 125 u. 134.

49) Der Bezug auf Erhaltungssätze, die *Petri* infolge seiner engen Anlehnung an eine physikalische Konzeptbildung betonte, wurde bei der späteren Entfaltung des Petrinetz-Konzepts nicht aufrechterhalten, weil eine Emanzipation von der einseitigen physikalischen Ausrichtung erfolgte. Die quantitative Größe wird dagegen im Markierungs-Konzept als Charakteristikum von Petrinetzen herausgestellt. Markierungen werden zwar schon von **Petri (1962)**, S. 114ff., und **Petri (1963)**, S. 387f., als Stellen-Markierungen behandelt, aber erst später explizit in das Netz-Konzept integriert. Auch die Reaktionsprinzipien finden erst später in der Schaltregel ihren expliziten Niederschlag.

50) Vgl. **Wien (1974)**, S. 2.

51) Bei diesen Prinzipien handelt es sich um die Begrenzung der Signalausbreitungs-Geschwindigkeit durch die Lichtgeschwindigkeit und um die Begrenzung der Informationsdichte durch die Unschärferelation.

- Auf metrische Systemeigenschaften wird an keiner Stelle Bezug genommen[52].
- Es spielen nur topologische[53] und kombinatorische[54] Konzepte für die Definition und Analyse von Systemen und Prozessen eine Rolle.
- Es gibt keine zeitliche Synchronisierung der Operationen der System-Komponenten (Asynchronie)[55]. Dies bedeutet für die aktiven System-Elemente (Ereignisse):
  = Sie können nur in lokal-kausaler Weise miteinander wechselwirken[56].
  = Wenn keine solche Wechselwirkung vorliegt, können die Elemente nebenläufig, d.h. kausal voneinander unabhängig operieren[57].

---

52) Vgl. **Petri (1962)**, S. 1f. u. 46ff.; **Holt,A. (1975d)**, S. 162.

53) Vgl. **Petri (1962)**, S. 2, 4, 39, 46 u. 48; **Hack (1975a)**, S. 22; **Murata (1977c)**, S. 2.

54) Vgl. **Petri (1962)**, S. 4, 14ff., 39 u. 48; **Petri (1967)**, S. 127; **Murata (1977c)**, S. 2; **Symons (1980b)**, S. 32.

55) Vgl. **Petri (1962)**, S. 3f. u. 46; **Nutt (1972b)**, S. 5; **Peterson (1981)**, S. 3 u. 271.

56) Vgl. **Petri (1962)**, S. 89f.; **Baumgarten (1978)**, S. 51; **Petri (1979c)**, S. 82; **Peterson (1981)**, S. 3; **Valk (1981b)**, S. 141; **Reisig (1986a)**, S. 1.

57) Vgl. **Genrich (1979a)**, S. 124; **o.V. (1979b)**, S. 14; **Genrich (1980a)**, S. 23; **Valk (1981b)**, S. 141.

2.5 Eine Skizze der Entfaltung des Petrinetz-Konzepts im Anschluß an die Arbeit Petri's

Trotz des innovativen Charakters seines Netz-Konzepts erregte *Petri's* Arbeit zunächst keine breite wissenschaftliche Resonanz. Von machen Autoren wird sie sogar als eine Schrift qualifiziert, die nur noch von historischem Interesse sei[58]. Dies lag nach Einschätzung des Verf. vor allem daran, daß der intellektuell anspruchsvolle Ansatz des neuartigen Nebenläufigkeits-Operators nicht unmittelbar in eine formal ausformulierte Theorie eingebunden wurde. Eine solche Theorie hätte es gestattet, das Netz-Konzept mit mathematisch vertrauten formalen Instrumenten auf Realprobleme der Informationsverarbeitung anzuwenden[59] und hierbei dessen Leistungsfähigkeit zu erfahren.

Der Durchbruch des Netz-Konzepts gelang erst etwa ein bis anderthalb Jahrzehnte später und auf einem anderen Kontinent. Er wurde in den USA vor allem durch die Arbeiten von *Commoner*, *Dennis*, *Hack*, *Holt* und *Patil* vermittelt[60]. Diese erfolgten großenteils im Rahmen dreier breit angelegter Projekte auf dem Gebiet der informationstechnischen Grundlagenforschung, die dem Petrinetz-Konzept größere Beachtung zukommen ließen. Es handelte sich um das Projekt "MAC"[61], das im Jahr 1975 zur richtungsweisenden "Conference on Petri Nets and Related Methods" führte, am Massachusetts Institute of

---

58) Vgl. z.B. **Peterson (1981)**, S. 271.

59) Vgl. **Genrich (1973b)**, S. 1.

60) Vgl. **Hack (1972)**, S. 8; **Baker,H. (1972)**, S. 1; **Nutt (1972b)**, S. 8; **Misunas (1973)**, S. 475; **Hack (1975a)**, S. 13; **Ullrich (1976)**, S. 2.5; **Peterson (1977)**, S. 226; **Murata (1977a)**, S. 412; **Murata (1977c)**, S. 2; **Meldman (1977)**, S. 33; **Zisman (1977)**, S. 26; **Peterson (1981)**, S. 3f.; **Fernandez (1981)**, S. 24; **Bauer (1982)**, S. 56; **Rosenstengel (1982)**, S. 2; **Petri (1983)**, S. 1.

61) Das Akronym "MAC" wurde - wegen des zu Projektbeginn offenen Entwicklungsfortschritts - bewußt zweideutig gewählt: Es vertritt sowohl "Man And Computers" als auch "Maschine-Aided Cognition". Vgl. **McCorduck (1979)**, S. 247/Fn. 3).

Technology[62], die Studie "Information Systems Theory Project" der Applied Data Research, Inc.[63] und das Projekt "Development of Theoretical Foundations for Description and Analysis of Discrete Information Systems" der Massachusetts Computer Associates, Inc.[64].

Die nunmehr einsetzende Akzeptanz des Petrinetz-Konzepts beruhte vor allem auf zwei Faktoren:

- Erstens wurden die Untersuchungen auf eine Klasse relativ einfach strukturierter Netze eingeschränkt[65], die nur einen kleinen Ausschnitt aus dem wesentlich anspruchsvolleren Konzept *Petri's* abdeckten[66].
- Zweitens wurde für diese Netzklasse ein anschauliches und einfach verständliches Instrumentarium auf der Basis graphischer Netz-Darstellung geschaffen, das auf konkrete informationstechnische Problemstellungen angewendet wurde[67].

Diese US-amerikanischen Arbeiten und Projekte beeinflußten die Ansichten über die Relevanz des Petrinetz-Konzepts derartig nachhaltig, daß sie mitunter als dessen "zweite Geburt" betrachtet werden[68]: Denn erst im Rahmen dieser Anstrengungen sei der heute etablierte formale Apparat des Petrinetz-Konzepts – insbesondere ihre mengen-theoretische Tupel-Notation und ihre gra-

---

62) Vgl. **Dennis (1970a)**; **Peterson (1977)**, S. 226.

63) Vgl. **Holt,A. (1968)**; **Holt,A. (1970b)**; **Hack (1975a)**, S. 8.

64) Vgl. **Massachusetts Computer Associates (1974a)**; **Massachusetts Computer Associates (1974b)**; **Massachusetts Computer Associates (1974c)**; **Massachusetts Computer Associates (1975)**.

65) Vgl. **Hack (1975a)**, S. 22.

66) Später wurde diese Netzklasse als Typus der Synchronisations-Netze ("Synchronisationsgraphen") formal präzise beschrieben.

67) Vgl. Hierbei handelte es sich vor allem um die Analyse von – damals – neuartigen parallelen Computer-Architekturen; vgl. z.B. **Holt,A. (1968)**, S. 257ff. u. 289ff.; **Dennis (1970b)**, S. 55ff.; **Noe (1971)**, S. 366ff. u. 374ff.

68) Vgl. **Peterson (1977)**, S. 226; **Meldman (1977)**, S. 33; **Zisman (1977)**, S. 26; **Peterson (1981)**, S. 3f.

phentheoretisch fundierte Darstellungsweise - hervorgebracht worden. Ebenso gehe die explizite Bezeichnung "Petrinetze" auf diese Phase der Konzeptentfaltung zurück.

Zwar trifft dieser weitgehende US-amerikanische Anspruch auf die geistige Urheberschaft sachlich nicht zu[69]. Denn bereits im Jahr 1967 wurde von *Petri* selbst die heute übliche Notation und Darstellungsweise der Petrinetze eingeführt[70]. Ebenso wurde die Theorie der Synchronisations-Netze schon im Jahr 1969 von *Genrich* formuliert, dem es gelang, erste Erkenntnisse über diese Netzklasse abzuleiten[71].

Doch muß festgehalten werden, daß der wesentliche Anstoß, das Petrinetz-Konzept als wissenschaftlich fruchtbaren Ansatz aufzugreifen, in den USA erfolgte. Um so erstaunlicher ist es, daß von den o.a. Forschern, die diesen Durchbruch leisten, seit Ende der siebziger Jahre keine wesentlichen Impulse zur Fortentwicklung des Petrinetz-Konzepts ausgingen.

Stattdessen verlagerte sich der Schwerpunkt der Petrinetz-Forschung wieder zurück in das Geburtsland dieses Konzepts zur Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, an der mittlerweile - bis heute - auch *Petri* selbst wirkte. Von hier gingen wesentliche Anregungen aus, das Petrinetz-Konzept in vielfältigen Richtungen fortzuentwickeln.

Weitere Forschungsschwerpunkte bildeten sich seit etwa der zweiten Hälfte der siebziger Jahre - innerhalb Europas - vor allem in Frankreich[72], Großbritannien, Dänemark, Polen und in der DDR[73] heraus. Etwas später kamen Italien und Finnland hinzu. Diese Zentren betrei-

---

69) Vgl. **Genrich (1978b)**, S. 84.

70) Vgl. **Petri (1967)**, S. 124, 130 u. 133f.

71) Vgl. **Genrich (1971b)** als eine aktualisierte Version des historischen, nicht mehr nachgedruckten Originals vom 15.01.1969. Dieser Beitrag *Genrich's* wird auch von **Baker,H. (1972)**, S. 1, und **Petri (1983)**, S. 1, hervorgehoben.

72) Vgl. **Andre (1980a)**, S. 321ff.

73) Vgl. z.B. **Starke (1980)**.

ben zwar eine bewußt selbständige - und oftmals inhaltlich divergente - Entfaltung des Petrinetz-Konzepts. Doch hat sich seit Ende der siebziger Jahre ein reger kommunikativer und auch personaler Austausch zwischen ihnen entwickelt. Er fand seine Institutionalisierung vor allem in den "Advanced Courses"[74], in dem jährlich veranstalteten "European Workshop on Application(s) and Theory of Petri Nets"[75] sowie in den Publikationsreihen der "Petri Net Newsletter"[76] und der "Advances in Petri Nets"[77].

Außerhalb Europas findet das Petrinetz-Konzept derzeit in Australien, in Japan und in der UdSSR die größte Resonanz. Seit Beginn der achtziger Jahre hat das Petrinetz-Konzept auch in den USA erneut erhebliche Beachtung erlangt, allerdings wird sie von einer neuen Forscher-Generation ohne nennenswerte Bezüge zu den o.a. Projekten getragen.

Allgemein läßt sich "weltweit" ein Trend zunehmender Akzeptanz der wissenschaftlichen Fruchtbarkeit des Petrinetz-Konzepts und eine wachsende Anzahl von Anwendungen dieses Konzepts zur Behandlung konkreter Aufgabenstellungen[78] verzeichnen[79].

---

74) Vgl. **Brauer (1980)**; **Brauer (1987a)**; **Brauer (1987b)**.

75) Vgl. **Girault (1982d)**; **Pagnoni (1983)**; **o.V. (1983d)**; **o.V. (1984c)**; **o.V. (1985a)**; **o.V. (1986b)**; **o.V. (1987b)**.

76) Veröffentlicht von der Gesellschaft für Informatik/Special Interest Group "Petri Nets and Related System Models".

77) Veröffentlicht vom Springer-Verlag (Berlin-Heidelberg-New York ...) in der Fachserie "Lecture Notes in Computer Science"; vgl. **Rozenberg (1985)**; **Rozenberg (1986b)**.

78) Vgl.die Auflistung solcher Anwendungen in **Zelewski (1988c)** (in Vorbereitung).

79) Vgl. **Miller (1974)**, S. 9; **Lockemann (1975)**, S. 9; **Peterson (1977)**, S. 249; **Crespi-Reghizzi (1977)**, S. 177; **Memmi (1978c)**, S. 505; **Oberquelle (1980)**, S. 483; **Hruschka (1980a)**, S. 269; **Zuse (1980b)**, S. 1; **De Cindio (1982)**, S. 269; **Stahlknecht (1982)**, S. 119.

3 Petrinetze als Ausprägungen verwandter Konzepte

3.1 Petrinetze in systemtheoretischer Sicht

Aus dem Blickwinkel der Systemtheorie stellen Petrinetze Systeme dar[80], die durch folgende Merkmale ausgezeichnet werden[81]:

- Es handelt sich um formale[82] Systeme.
- Die Struktur der Systeme ist diskret und endlich. Sie läßt sich durch endliche Mengen diskreter Objekte beschreiben (Stellen, Transitionen, Marken-Arten)[83].

---

80) Vgl. **Lautenbach (1973)**, S. 1; **Herzog (1973)**, S. 3f.; **Peterson (1977)**, S. 226; **Scheschonk (1977)**, S. 3f.; **Eggert (1978)**, S. 39; **Genrich (1979a)**, S. 124; **Petri (1979c)**, S. 81; **Genrich (1981)**, S. 109; **De Cindio (1983b)**, S. 41; **Genrich (1983a)**.

81) Infolge dieser Merkmale, die Petrinetze als eine besondere Systemklasse definieren, vermag sich der Verf. nicht der mitunter vorgetragenen Ansicht anzuschließen, die Petrinetz-Theorie stelle eine Ausprägung der allgemeinen Systemtheorie dar. Vgl. zu diesem Allgemeinheitsanspruch **Herzog (1973)**, S. 3; **Eggert (1978)**, S. 39; **De Cindio (1983b)**, S. 41.

82) Ein Konzept heißt formal, wenn es aus Komponenten zusammengesetzt gedacht wird und die Vorschriften zur Komposition von Komponenten nur auf die Bezeichnungen dieser Komponenten Bezug nehmen. Hiermit wird jede Anbindung der Vorschriften an semantisches Wissen über die "Bedeutung" der zu komponierenden Komponenten oder an pragmatisches Wissen über dem Kompositionszweck ausgeschlossen. Die Vorschriften für die Komponenten-Komposition werden in ihrer Gesamtheit als Syntax bezeichnet. Ein (rein) formal definiertes Konzept ist folglich ein solches, dessen Komponenten ausschließlich nach den Vorschriften einer konzeptspezifischen Syntax zusammengesetzt werden.

83) Vgl. **Massachusetts Computer Associates (1974c)**, S. 151; **Rosenstengel (1983)**.

- Das System-Verhalten manifestiert sich durch den Fluß beliebig - ggf. auch unendlich[84] - vieler Objekte[85] (Marken)[86].
- Die Systeme besitzen eine innere Dynamik. Diese wird durch atomare Ereignisse (Transitionen) und durch Prozesse, die Komplexe aus mehreren Ereignissen darstellen, vermittelt.
- Es handelt sich um selbst-modifizierende Systeme, da die Entfaltung der systeminternen Dynamik den jeweils aktuellen Systemzustand aus sich heraus verändert (Schaltregel).
- Die Ereignisse brauchen in den Prozessen keiner sequentiellen Vollordnung zu unterliegen, sondern bilden - sofern es sich um nebenläufige ("parallele") Ereignisse handelt - nur eine Halbordnung (nebenläufige Aktivierung)[87]. Die Halbordnung von Ereignissen konstituiert eine interne oder eine externe Nebenläufigkeit der betroffenen Prozesse je nachdem, ob es sich um nebenläufig aktivierte Ereignisse desselben Prozesses bzw. verschiedener Prozesse handelt.

---

84) Da die Definition der Markierungen von Petrinetzen auf die Menge natürlicher Zahlen eingeschränkt ist, können maximal abzählbar-unendlich viele Objekte erfaßt werden. Überabzählbare Objekt-Mannigfaltigkeiten, wie sie im Rahmen rationaler oder reeller Zahlen auftreten würden, lassen sich nicht darstellen.

85) Solche Objekte können in der Regel als Ressourcen interpretiert werden. Exemplarische Konkretisierungen wären materielle Objekte, Energiequanten oder Informationen. Im Falle logischer Systeme sind die Objekte abstrakterer Natur; dort vermitteln sie die Gültigkeit logischer Formeln.

86) Vgl. Noe (1971), S. 370; **Petri (1976b)**, S. 1; **Petri (1977a)**, S. 140; **Sifakis (1977a)**, S. 75; **Petri (1980a)**, S. 1 u. 3.

87) Vgl. **Herzog (1973)**, S. 3; **De Cindio (1983b)**, S. 41; **Reisig (1986a)**, S. 1.

- Die Anordnung von Ereignissen in Prozessen und die Koordination von Prozessen erfolgen ausschließlich aufgrund von Kausalbeziehungen. Ex existieren keine originären[88] zeitlichen Anordnungs-Beziehungen (asynchrone Schaltregeln)[89].
- Die Koordinierung zwischen Prozessen kann nur mit Hilfe lokaler Kausalbeziehungen erfolgen[90]; es ist nur eine dezentrale System-Kontrolle[91] vorgesehen[92]).
- Konflikte zwischen dem Eintreten unterschiedlicher Ereignisse und dem Ablaufen verschiedener Prozesse lassen sich explizit darstellen (konfliktionäre Aktivierung)[93].

---

88) Die derivative Berücksichtigung temporaler Netzaspekte ist allerdings durch Zeit-Petrinetze - und ihre Fortentwicklung in der Gestalt von Synthetischen Netzen - möglich. Aber auch bei diesen Netz-Typen werden die Ereignis-Anordnung und die Prozeß-Koordinierung letztlich auf kausale Wirkungsbeziehungen zurückgeführt, die auf temporale Determinanten in gleicher Weise Bezug nehmen wie auf andere, atemporale Einflußgrößen.

89) Vgl. **Massachusetts Computer Associates (1974c)**, S. 151; **Nutt (1972b)**, S. 5.

90) Vgl. **Murata (1977a)**, S. 415.

91) Der hier verwendete systemtheoretische Kontrollbegriff ist vom betriebswirtschaftlichen Terminus "Kontrolle" zu unterscheiden. Die Kontrolle eines Systems umfaßt sämtliche Mechanismen, welche die Ausführung der systeminternen Prozesse koordinieren.

92) Vgl. **Murata (1977a)**, S. 415. Globale System-Kontrollen werden im allgemeinen über einen systemeinheitlichen Zeit-Parameter definiert. Da die Petrinetz-Theorie jedoch keine originären zeitlichen Koordinierungsmechanismen kennt, kann eine globale, zeitabhängige System-Kontrolle allenfalls derivativ durch Zeit-Petrinetze verwirklicht werden. Es würde jedoch der grundsätzlichen Orientierung der Petrinetz-Theorie an kausalen Wirkungsbeziehungen zuwiderlaufen, Petrinetzen eine solche zeitbezogene globale System-Kontrolle nachträglich aufzupfropfen.

93) Vgl. **Massachusetts Computer Associates (1974c)**, S. 151; **Nutt (1972b)**, S. 5.

- Wenn nicht alle dargestellten Konflikte durch zusätzliche Informationen (Netzdeterminanten) eindeutig aufgelöst werden, liegt ein indeterministisches Systemverhalten vor (indeterministische Schaltregel).

Aus systemtheoretischer Sicht bemerkenswert ist, daß Petrinetze eine innere Komplexität aufweisen, welche die vorherrschende - allerdings unzulässig verkürzte - Systemdefinition sprengt und hierdurch das tatsächliche Spektrum von Erkenntnisobjekten der Systemtheorie verdeutlicht. Zumeist werden Systeme als Gebilde aus Elementen und Beziehungen zwischen diesen Elementen definiert, mitunter noch um Eigenschaften von Elementen als dritte Konstituente ergänzt.

Elemente - im Sinne von atomaren Objekten - stellen in der Petrinetz-Theorie aber nur die Stellen, Transitionen und Marken-Arten dar. Eigenschaften dieser Elemente sind Marken-Kapazitäten der Stellen sowie - gegebenenfalls - die Schaltzeiten der Transitionen und die diversen Markenattribute. Beziehungen zwischen diesen Elementen finden ihren Ausdruck in den Kanten der Flußrelation und in der Ausgangsmarkierung, die Stellen jeweils Anzahlen von Kopien der Marken-Arten zuordnet. Weitere Komponenten von Petrinetzen lassen sich jedoch von den Konstituenten der vereinfachten Systemdefinition nicht mehr erfassen.

So stellen z.B. Kantengewichte Eigenschaften von Kanten, also Eigenschaften einer Beziehung zwischen Elementen (Stellen und Transitionen) dar. Die logischen Verknüpfungen der adjazenten Kanten einer Transition bedeuten Eigenschaften einer teilsystem-artigen System-komponente[94]), die ihrerseits aus einem Element (der Transition) und Beziehungen (adjazenten Kanten) dieses Elements zu anderen Elementen (den inzidenten Stellen) besteht. Noch komplexere Verhältnisse liegen bei der Schaltregel vor, die Beziehungen zwischen Elementen (Stellen, Transitionen und Marken-Arten), Eigenschaften dieser Elemente (Marken-Kapazitäten der Stellen, Schaltzeiten der Transitionen, Attribute von Kopien der Marken-Arten), Eigenschaften von Beziehungen zwischen diesen Elementen (Kantengewichte) und Eigenschaften von Teilsystemen (logische Kantenverknüpfungen).

Diese - nicht erschöpfenden - Beispiele zeichnen Petrinetze als strukturell überaus reichhaltige Systeme aus, die einer unverkürzten, rekursiv-offenen[95]) Systemdefinition bedürfen. In diesem Verständnis sind Systeme Gebilde, die aus Komponenten, Eigenschaften von Komponenten und Beziehungen zwischen Komponenten bestehen. Einfachste Komponenten ohne innere Struktur sind die Elemente. Alle anderen Komponenten setzen sich aus

---

94) Durch den Begriff der System-Komponente wird der systemtheoretische Elementbegriff in rekursiver Weise verallgemeinert: Jedes Element - als Objekt ohne innere Struktur - gilt eine atomare Komponente. Jedes Objekt, das aus Elementen, Eigenschaften und Beziehungen gebildet und als Einheit betrachtet wird, stellt eine zusammengesetzte, nicht-atomare Komponente dar. Durch Anwendung der Zusammensetzungs-Operation auf bereits vorhandene Komponenten resultiert eine Hierarchie von Komponenten zunehmender innerer Komplexion. An der Spitze dieser Hierarchie steht das Gesamtsystem als oberste Komponente. Die Elemente bilden als unterste Komponenten das Fundament der Hierarchie. Komponenten, die weder oberste noch unterste Komponente(n) sind, können je nach gewählter Abstraktionsstufe als Teilsysteme mit komplexer innerer Struktur oder - unter Vernachlässigung der sie bildenden untergeordneten Komponenten - als Elemente des Gesamtsystems betrachtet werden.

95) Dieses Attribut bezieht sich auf die Operation der rekursiven Synthese fortschreitend komplexerer Systemkomponenten, die in der voranstehenden Fußnote skizziert wurde. Da prinzipiell keine Beschränkungen der Operations-Anwendung bestehen, also beliebig tiefe Komponenten-Verschachtelungen gebildet werden können, handelt es sich um eine - bezüglich komplexitätserhöhender Systemerweiterungen - "offene" Systemdefinition.

einfacheren Komponenten, deren Eigenschaften oder[96] deren Beziehungen zusammen.

96) Die Verwendung des Junktors "oder" - im inklusiven, das "und" umfassenden Sinn - ermöglicht es z.B. auch, Eigenschaften von Beziehungen (als Eigenschaften von Komponenten, die nur aus Beziehungen bestehen) sowie Beziehungen zwischen oder Eigenschaften von Eigenschaften (als Beziehungen zwischen bzw. Eigenschaften von Komponenten, die nur aus gebildet wurden) zu erfassen.

3.2 Petrinetze in modelltheoretischer Sicht

Im Rahmen der Systemtheorie wurden Petrinetze als formale - d.h. rein syntaktisch definierte - Objekte ohne Fremdbezug aufgefaßt. Diese enge Perspektive wird durch den modelltheoretischen Ansatz dadurch erweitert, daß sowohl Bezüge zu anderen, von Petrinetzen verschiedenen Objekten (semantische Dimension) als auch zu Zwecken der Petrinetz-Anwendung (pragmatische Dimension) hergestellt werden. Hierbei werden Petrinetze in syntaktischer Hinsicht auch weiterhin vornehmlich als spezielle Erscheinungsform von Systemen angesehen[97].

Unter diesen Voraussetzungen sind Petrinetze Systeme (Modelle), die andere Systeme (Modellierungs-Objekte) abbilden (modellieren)[98]. Charakteristisch für solche Netz-Modelle ist, daß die modellierten Systeme durch folgende Merkmale gekennzeichnet werden:

- Es handelt sich um Systeme, deren Verhalten durch "parallele" Prozesse, d.h. Prozesse mit interner oder externer Nebenläufigkeit, geprägt wird (nichtsequentielle Systeme)[99].

---

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

98) 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 (1976a)**, S. 615; **Petri (1976b)**, S. 1; **Peterson (1977)**, S. 223, 230 u. 234; **Krieg (1977)**, S. 1; **Zervos (1977)**, S. 6; **Genrich (1978a)**, S. 214; **Oberquelle (1979a)**, S. A.1; **Griese (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 (1982a)**, S. 96; **Hura (1982)**, S. 433.

99) Vgl. **Hack (1972)**, S. 2; **Lautenbach (1973)**, S. 1; **Genrich (1973b)**, S. 1; **Best (1974)**, S. 1; **Schmid,H. (1974)**, S. 165; **Patil (1975a)**, S. 2; **Peterson (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 (1982)**, S. 433; **Miglioli (1982)**, S. 311; **Müller-Silva (1984a)**, S. 43;

- Die Systemstruktur besteht zumeist aus interagierenden Subsystemen[100], die nebenläufig koordiniert werden und durch den Austausch von Objekten[101] nur lose gekoppelt sind[102] (verteilte Systeme)[103].
- Prozesse und Subsysteme konkurrieren um knappe Ressourcen[104].

---

100) Diese Zerlegung eines Gesamtsystems in solche Subsysteme erfolgt in der Regel derart, daß die Prozesse innerhalb der Subsysteme in der Gestalt sequentieller Ereignis-Ketten geschehen. Der nichtsequentielle Charakter des Gesamtsystems wird somit auf der obersten Modellierungsebene als Nebenläufigkeit der Prozesse, welche die Aktivitäten der Subsysteme koordinieren, besonders deutlich. Die Subsystem-Zerlegung eines verteilten Gesamtsystems kann sowohl auf der räumlichen Separation der Subsysteme (vgl. z.B. **Prinoth (1981)**, S. 199) als auch auf ihrer funktionalen Spezialisierung beruhen.

101) Als solche Objekte kommen in erster Linie Informationen ("Nachrichten") zwecks immaterieller oder Ressourcen zwecks materieller Koordinierung in Betracht.

102) Der Begriff der losen Kopplung bezieht sich auf den Sachverhalt, daß kein Teilsystem das Verhalten eines anderen Teilsystems unmittelbar durch Erteilen von Anweisungen beeinflussen kann. Stattdessen bestimmen die Teilsysteme ihre Aktionen autonom, nehmen hierbei allerdings auf Rahmenbedingungen Bezug, zu denen u.a. die aktuell verfügbaren Informationen oder Ressourcen rechnen. Da Teilsysteme mit anderen Teilsystemen solche Objekte zwecks Koordinierung ihrer Verhaltensweisen auszutauschen vermögen, können sie sich hierdurch mittelbar - durch Veränderung der Randbedingungen - gegenseitig beeinflussen. Die Theorie lose gekoppelter Systeme wird - abgesehen von einigen Randbemerkungen - ohne Bezug zur Petrinetz-Theorie ausführlich diskutiert bei **Wedde (1975)**; **Wedde (1980b)**, S. 6ff.

103) Vgl. **Dennis (1973)**, S. 111f.; **Ullrich (1974)**, S. 150; **Fernandez (1975)**, S. 1; **Prinoth (1983)**, S. 200ff.; **De Cindio (1983b)**, S. 41.

104) Vgl. **Holt,A. (1968)**, S. 14; **Holt,R. (1972a)**, S. 186ff., dessen Ausführungen sich noch auf einen Vorläufer der Petrinetz-Theorie beziehen; **Noe (1974)**, S. 387; **Gostelow (1975)**, S. 345; **Peterson (1977)**, S. 234; **Agerwala (1979)**, S. 90; **Müller,B. (1981)**, S. 199; **Bauer (1981)**, S. 410 (nur bezüglich des Konkurrenz-Aspekts); **Jensen (1983a)**, S. 8.

Die Modelltheorie ist keineswegs auf die voranstehende systemtheoretische Interpretation der Netz-Modelle eingeschränkt. Vielmehr erweist sie sich gegenüber beliebigen Interpretationen ihrer Modellierungs-Objekte als offen. Da eine erschöpfende Untersuchung dieser - potentiell unbegrenzten - Interpretationsmannigfaltigkeit nicht möglich ist und eine Wiederholung ähnlicher Erkenntnisse wenig fruchtbar erscheint, wird nur exemplarisch[105] auf zwei Interpretationsansätze eingegangen, die im Bereich betriebswirtschaftlicher Modellbildung neben der systemtheoretischen Variante herausragende Bedeutung besitzen. Es handelt sich um die entscheidungs- und um die handlungstheoretische Deutung von Modellierungsmodellen.

105) Eine weitere, "exotische" Variante der modelltheoretischen Charakterisierung von Petrinetzen begreift die Petrinetz-Theorie als "Signalmechanik" (**Petri (1967)**, S. 123). Die Petrinetz-Theorie entspreche durch ihre strenge Ausrichtung an kausalen, atemporalen Wirkungsmechanismen ("Wechselwirkungen") dem Verständnis der physikalischen Wirklichkeit, wie es von der Speziellen Relativitätstheorie vermittelt wird. Folglich seien Petrinetze per constructionem homomorphe Abbilder der physikalischen Wirklichkeit (sofern deren adäquate Erfassung durch die Relativitätstheorie anerkannt wird). Vgl. zu solchen Interpretationen von Petrinetzen als relativistischen Modellen von Realitätsausschnitten **Petri (1967)**, S. 123; **Hack (1975a)**, S. 22.

Aus handlungstheoretischer Sicht sind Petrinetze - in einer ersten Variante - spezielle Handlungs-Modelle mit folgenden charakteristischen Eigenschaften[106]:

- (Komplexe[107]) Handlungen werden als Pläne interpretiert, die aus Bedingungen (Stellen) und atomaren Aktionen (Transitionen) bestehen.
- Aktionen können ausgeführt werden, wenn für sie spezifische Vorbedingungen erfüllt und ebenso spezifische Nachbedingungen (noch) nicht erfüllt sind (Markierung inzidenter Stellen).
- Wenn eine Aktion ausgeführt wird, ändert sie die Erfüllungsstati ihrer Vor- und ihrer Nachbedingungen jeweils in ihr Gegenteil (Schalten einer Transition).

In einer zweiten Variante stellen Petrinetze Handlungs-Modelle in der besonderen Weise dar, daß Aktionen und Rollen von handelnden Personen hervorgehoben werden[108].

Beide Varianten zeichnen sich durch die Nebenläufigkeit der modellierten Handlungs-Komplexe aus. Die atomaren Aktionen müssen nicht sequentiell aufeinander folgen, sondern können sich auch beliebig überlappen oder sogar zeitgleich erfolgen, soweit sie die kausalen Abhängigkeiten ("Präzedenzrelationen") einhalten, welche durch das Geflecht ihrer Vor- und Nachbedingungen konstituiert werden.

---

106) Vgl. **Genrich (1980e)**.
Zur Modellierung von Handlungs-Plänen kann auch der Petrinetz-Typus der Bedingung/Ereignis-Netze herangezogen werden. Er ist zwar nicht auf die Modellierung von Handlungen beschränkt. Doch er entspricht durch seine Interpretation von Stellen als Bedingungen und von Transitionen als Ereignisse, welche die Erfüllungsstati der vor- und nachgelagerten Bedingungen in der oben beschrieben Weise verändern, genau der o.a. Konzeptualisierung von Handlungs-Modellen. Vgl. zu solchen Bedingung/ Ereignis-Netzen **Best (1985e)**, S. 8ff.

107) Atomare Handlungen ohne innere Struktur sind keine Objekte der Modellierung durch Petrinetze.

108) Vgl. **Oberquelle (1987a)**, S. 175ff. Dieser Punkt wird noch ausgebaut.

Im Gegensatz zur reichhaltigen Charakterisierung der Semantik von Petrinetzen aus handlungstheoretischer Perspektive erweist sie sich aus dem Blickwinkel der Entscheidungstheorie als überraschend inhaltsarm. Denn Petrinetze stellen degenerierte Entscheidungs-Modelle dar, die weitgehend auf die Abbildung des Entscheidungsfelds reduziert sind.

Der Entscheidungsträger kann nur hinsichtlich der seltenen Variante lokaler Entscheidungsregeln[109] explizit modelliert werden. Der Ziel- und Präferenzkomplex des Entscheidungsträgers wird seitens der Entscheidungstheorie jedoch in der Regel als globale Determinante der Modellauswertung vorausgesetzt. Analog zu der Unmöglichkeit, mit Hilfe der Petrinetz-Theorie globale System-Kontrollen in originärer Weise zu modellieren, können Petrinetze ebenso wenig den global gültigen Ziel- und Präferenzkomplex des Entscheidungsträgers unmittelbar abbilden[110].

Hinsichtlich des Entscheidungsfelds ist für Petrinetze auf die Charakteristika zu verweisen, die zuvor in bezug auf System- und Handlungs-Modelle dargelegt wurden. Denn die Entscheidungstheorie ist gegenüber der Art der Konzeptualisierung von Entscheidungsfeldern offen, läßt also auch die system- bzw. handlungstheoretische Ausdeutung zu[111].

---

109) Solche Entscheidungsregeln erlangen allerdings als "Prioritätsregeln" für Maschinenbelegungen bei Flexiblen Fertigungssystemen erhebliche Bedeutung.

110) Es gilt jedoch - wie bereits bezüglich der Realisierung globaler System-Kontrollen angedeutet - die Möglichkeit der mittelbaren Abbildung von Ziel- und Präferenzsystem während der Auswertung von Petrinetzen im Rahmen der Erreichbarkeitsanalyse.

111) Die Offenheit impliziert die Zulässigkeit beliebiger weiterer Konzeptualisierungsansätze. Diese werden hier jedoch aus den o.a. Gründen für den Verzicht, das Spektrum möglicher Ansätze erschöpfend zu behandeln, nicht berücksichtigt.

Die modelltheoretische Charakterisierung von Petrinetzen - sei es als System-, Handlungs- oder Entscheidungs-Modelle - erstreckt sich vorrangig auf den semantischen Aspekt, den rein syntaktisch definierten Komponenten eines Petrinetzes entsprechende Komponenten des jeweils modellierten Objekts zuzuordnen. Hierdurch wird der Vorwurf, die Petrinetz-Theorie sei - jenseits ihres formalen Selbstbezugs - gehaltlos, entkräftet. Diese Vorhaltung gründet auf der Behauptung, die Petrinetz-Theorie lasse nur "uninterpretierte Modelle" zu[112], deren Stellen und Transitionen keine Bedeutung besäßen, so daß keine "bedeutungs-", keine "sinnvollen" Informationen über Objekte außerhalb dieser Theorie gewonnen werden könnten. Mittels der Petrinetz-Theorie ließen sich nur "abstrakte" Erkenntnisse erzielen, die bereits in ihrer formalen Definition implizit enthalten seien, aber nichts über die modellierten Objekte aussagten[113]. Diese Behauptung erweist sich als falsch, weil die Interpretation von Netz-Modellen als System-, Handlungs- oder Entscheidungsmodelle den geforderten Bezug auf Fremdobjekte konstituiert. Die Erkenntnisse, die durch Anwendung des Petrinetz-Theorie auf ein Netz-Modell gewonnen werden, gelten daher auch in dem Ausmaß für die modellierten Objekte, in dem die Validität des Netz-Modells sichergestellt ist[114].

---

112) Vgl. **Raubold (1972)**, S. 212; **Peterson (1977)**, S. 230.

113) Vgl. **Peterson (1977)**, S. 230.

114) Das Validitätsproblem, ob ein Modell das modellierte Objekt tatsächlich "adäquat" in dem Sinne abbildet, daß die im Modell geltenden Erkenntnisse in der gleichen Weise auch auf das Modellierungs-Objekt zutreffen, soll in keiner Weise verkannt werden. Nur stellt es ein fundamentales Problem der Modelltheorie dar, das für alle Modelle - nicht nur spezifisch für Petrinetze - gilt.

Über die oben skizzierten allgemeinen Netz-Interpretationen hinaus bietet im Einzelfall das Konzept der Beschriftung die Möglichkeit, jeder Netzkomponente entsprechende Komponenten des modellierten Fremdobjekts als individuelle Designata zuzuordnen[115]. Durch diese Erweiterung der formalsprachlichen Netz-Syntax durch natürlichsprachliche Beschriftungen der rein formal definierten Netzkomponenten wird eine inhaltlich offene, im Grundsatz an beliebige Modellierungs-Objekte anpassungsfähige Netz-Semantik begründet.

Darüber hinaus verweisen die handlungs- und die entscheidungstheoretische Interpretation von Netz-Modellen auf die pragmatische Dimension der Petrinetz-Theorie. Derart interpretierte Petrinetze dienen dem Zweck Handlungen bzw. Entscheidungen zu gestalten, d.h. vor ihrer Realisierung zu planen oder auch während ihrer Realisierung zu steuern.

---

115) Vgl. **Han (1978a)**, S. 166; **Han (1979)**, S. 271; **Genrich (1980c)**, S. 698; **Bauer (1981)**, S. 410; **Rosenstengel (1982)**, S. 51.

3.3 Petrinetze in mengentheoretischer Sicht

Die mengentheoretische Deutung der Petrinetz-Theorie erstreckt sich - wie die oben behandelte systemtheoretische Charakterisierung - wieder auf Petrinetze als rein formal bestimmte Objekte. Die mengentheoretische Betrachtungsweise liegt auch der formalen Darstellung des Petrinetz-Konzepts des Abschnitt 4.1 zugrunde.

Ihr zufolge sind Petrinetze Tupel[116] (TRM_1,..., TRM_m;REL_1,...,REL_n) aus m voneinander unabhängig definierten Trägermengen TRM_i (m=2,3,...) und aus n Relationen REL_j (n=1,2,...), die über diesen Trägermengen oder hieraus bereits gebildeten Relationen definiert sind[117]. Die Trägermengen werden zumindest durch die Stellenmenge S und die Transitionenmenge T gebildet. Die Relationen umfassen mindestens die Flußrelation F. Diese mengentheoretische Minimal-Charakterisierung wird - je nach Netz-Typus - durch weitere Trägermengen und Relationen erweitert. Im Fall der Stelle/Transition-Netz handelt es sich beispielsweise um die Menge MA der Marken-Arten, um die Kapazitäts- (K) und die Gewichtungsfunktion[118] (G), um die Funktionen der Ausgangsmarkierung (M_0) und der Schaltregel (SR) sowie um die -

116) Ein l-Tupel ist ein geordnetes Objekt (x_1,...,x_l) aus l Komponenten x_i (i=1,...,l). Jede Komponente nimmt - im Gegensatz zu den ungeordneten Elementen einer Menge - im Tupel stets die gleiche Position ein. Tupel lassen Komponenten beliebiger, vor allem auch unterschiedlicher Art zu. Im Gegensatz hierzu werden Vektoren, die Tupeln formal sehr ähnlich sind, im Regelfall über gleichartigen Grundmengen für ihre - ebenfalls geordneten - Komponenten definiert.

117) Relationen stellen ihrerseits Mengen einer höheren Abstraktionsstufe dar. Sie bestehen aus Mengen von Tupeln, deren Elemente aus zuvor gebildeten Relationen oder aus originären Trägermengen stammen.

118) Funktionen sind Sonderfälle von Relationen, die jeweils zwischen einem Definitions- und einem Wertebereich definiert sind. Funktionen stellen eindeutige Verknüpfungen ("Abbildungen") des Definitionsbereichs mit dem Wertebereich in der Weise dar, daß jedem Elemente aus dem Definitionsbereich höchstens ein Element aus dem Wertebereich zugeordnet wird.

ebenfalls als Relationen formulierten - Netz- und Konsistenzbedingungen (NB bzw KB).

Für die Petrinetz-Theorie kennzeichnend ist, daß die Präzedenzrelation über der Menge der Schaltakte von Transitionen, die - von einer Ausgangsmarkierung aus startend - ausgeführt werden, zur Kategorie der Halbordnungen gehört[119]. Die Schaltakte sind weder im sequentiellen Sinne der Komponenten eines Tupels vollständig geordnet noch im Sinne der Elemente einer Menge vollständig ungeordnet. Vielmehr unterliegen Teilmengen dieser Elemente einer sequentialisierenden Anordnungsbeziehung. Zwischen den Elementen anderer Teilmengen, die bezüglich der vorgenannten nicht notwendig disjunkt sind, bestehen dagegen keine Anordnungsbeziehungen.

Diese komplexe formale Halbordnung läßt sich im systemtheoretischen Kontext dadurch verdeutlichen, daß den Schaltakten von Transitionen die Geschehnisse von Ereignissen zugeordnet werden. In dieser materiellen Interpretation bedeutet die o.a. Halbordnung, daß Petrinetze sowohl kausale Wirkungsmechanismen auszudrükken gestatten, die zu sequentiellen Anordnungsbeziehungen zwischen Ereignissen führen[120], als auch nebenläufige Ereignisse zu modellieren vermögen, die untereinander vollständig ungeordnet sind.

119) Vgl. **Shapiro,R. (1969)**, S. 24; **Shapiro,R. (1972)**, S. 3.28.

120) Die kausale Beziehung zwischen "vorher" erfolgender Ursache und "nachher" eintretender Wirkung konstituiert eine atemporale, vollständig geordnete Präzedenzrelation zwischen Ursache und Wirkung.

3.4 Petrinetze in graphentheoretischer Sicht

Der graphentheoretischen Perspektive unterliegen Petrinetze nicht unmittelbar. Sie werden vielmehr nur hinsichtlich ihrer graphischen Repräsentation betrachtet; diese wird vereinfachend mit dem Begriff "Petrinetz" gleichgesetzt.

Unter diesen Voraussetzungen ist ein Petrinetz ein Graph $G=(S,T;F)$, für den gilt:

- Der Graph ist bipartit[121)] oder bichromatisch[122)], d.h. seine Knotenmenge $X=S \cup T$ ist in zwei disjunkte und exhaustive Teilmengen - die Stellen und die Transitionenmenge (S bzw. T) - zerlegt.
- Es liegt ein gerichteter Graph ("Digraph"[123)]) vor[124)], dessen Kanten aus der Menge F jeweils eine eindeutige Ausrichtung besitzen.
- Es handelt sich um einen endlichen Graphen[125)], weil die Knotenmenge ebenso endlich ist wie die hierüber definierte Kantenmenge.

---

121) Vgl. **Baker,H. (1973a)**, S. 1; **Jaffe (1977)**, S. 8; **Rammig (1979)**, S. 20.

122) Vgl. **Hack (1972)**, S. 11; **Windisch (1979)**, S. 9; **Priese (1983)**, S. 224.

123) "Digraph" steht für "Directed Graph".

124) Vgl. **Hack (1972)**, S. 11; **Baker,H. (1972)**, S. 1; **Byrn (1974)**, S. 2.6; **Jaffe (1977)**, S. 8; **Windisch (1979)**, S. 9; **Priese (1983)**, S. 224.

125) Vgl. **Byrn (1974)**, S. 2.6; **Rosenstengel (1982)**, S. 6; **Nelson (1982)**, S. 53.

- Der Graph gehört zur Klasse der Monographen, deren (gerichteten) Kanten jeweils nur genau einen Kantenursprung und genau eine Kantenspitze besitzen[126].
- Der Graph enthält obligatorisch eine variable Beschriftung seiner Stellen-Knoten[127] in Gestalt der Markierungen[128].
- Fakultativ können weitere, aber konstante Beschriftungen aller Komponenten des Graphen hinzukommen[129].

Während bei der system- und der modelltheoretischen Charakterisierung von Petrinetzen die Nebenläufigkeit von Ereignissen und Prozessen dominiert, steht im Vordergrund der graphentheoretischen Betrachtung die bipartite Knotenmenge. Sie stellt eine ungewöhnliche Er-

---

126) Abweichender Ansicht ist **Byrn (1974)**, S. 2.6, der Petrinetze der Klasse der Multigraphen zurechnet. Solche Graphen lassen Multikanten mit jeweils mehreren Kantenursprüngen oder -spitzen zu. Dies gilt für Petrinetz-Graphen jedoch nur dann, wenn die - originär bipartite - Knotenmenge durch Ausklammerung der Stellenmenge in eine monochrome Knotenmenge transformiert wird. Besitzt eine Stelle im originären Petrinetz-Graphen mindestens zwei Eingangs- oder mindestens zwei Ausgangskanten, führt dies im transformierten Multigraphen - unter Fortfall der betroffenen Stelle und Zusammenfassen ihrer Ein- und Ausgangskanten - zu einer Multikante mit entsprechend vielen Kantenursprüngen bzw. -spitzen. Marken belegen dann nicht mehr die Stellen, sondern die Kanten, in denen die Stellen verdeckt integriert wurden. Bei solchen Transformationen handelt es sich um eine artifizielle Transformation von Petrinetz-Graphen, deren Erkenntniswert dem Verf. nicht ersichtlich ist. Sie ist auch in der Petrinetz-Literatur nicht mehr aufgenommen worden. Daher wird sie nicht weiter berücksichtigt.

127) Im o.a. Fall der Multigraphen handelt es sich entsprechend um eine variable Kanten-Beschriftung.

128) Vgl. **Genrich (1971a)**, S. 13; **Lautenbach (1973)**, S. 7; **Rosenstengel (1979)**, S. 10; **Genrich (1981)**, S. 111; **Rosenstengel (1982)**, S. 18f.

129) Vgl. **Baker,H. (1972)**, S. 1; **Genrich (1981)**, S. 109 u. 111; **Valk (1981b)**, S. 141.
Vgl. hierzu auch die modelltheoretische Bedeutung von Beschriftungen als Verweise auf Komponenten des jeweils modellierten Objekts.

scheinung im Rahmen der konventionellen Graphentheorie dar[130]. Sie bildet das graphentheoretische Äquivalent einer Dualität, welche das gesamte Petrinetz-Konzepts als Charakteristikum durchzieht[131]. Diese Dualität äußert sich in der Differenzierung zwischen passiven und aktiven Konzept-Komponenten[132]. Erste drücken - als Stellen - einen statischen Sachverhalt aus, der je nach Netzinterpretation eine andere Bedeutung anzunehmen vermag, wie z.B. den Zustand eines Systems, die Restriktion eines Entscheidungs-Modells oder eine logische Formel. Die aktiven Komponenten - die Transitionen - involvieren dagegen stets eine Veränderung derjenigen Sachverhalte, die von den passiven Komponenten gebildet werden.

Oftmals wird der graphen- mit dem system- und dem modelltheoretischen Ansatz in der Weise geknüpft, daß Petrinetze als graphische Modelle von Systemen betrachtet werden[133]. Hieran wird der Anspruch geknüpft[134], alle Merkmale des modellierten Systems mittels des Petrinetz-Graphen entweder unmittelbar oder mittels der o.a. Beschriftungen repräsentieren zu können[135]. Da natürlichsprachliche Beschriftungen zugelassen sind, wird dieser Anspruch zumindest bezüglich aller Systemmerkmale, die sich in natürlicher Sprache beschreiben

---

130) Bemerkenswert ist auch, daß Petri in seiner Dissertation (**Petri (1962)**), die das historische Fundament der seitdem entfalteten Petrinetz-Theorie bildet, diese Bipartitheit von Petrinetz-Graphen noch nicht erkannte, zumindest nicht explizit darstellte.

131) Vgl. **Hack (1975a)**, S. 22; **Scheschonk (1977)**, S. 3.

132) Vgl. **Reisig (1986a)**, S. 9.

133) Vgl. **Rosenstengel (1982)**, S. 6.

134) Vgl. die Ausführungen zum korrespondierenden Anspruch der Allgemeinen Netztheorie.

135) Vgl. **Valk (1981b)**, S. 141.

lassen, erfüllt[136]. Daher spielt die Beschriftungsmöglichkeit hinsichtlich der Modellierungsfähigkeit von Petrinetz-Graphen eine herausragende Möglichkeit.

Weit größere Beachtung hat aber bei der Charakterisierung von Petrinetzen als Graphen die Möglichkeit gefunden, Graphen nicht nur als mathematische Objekte G=(S,T;F) formal zu behandeln, sondern sie auch "graphisch" zu visualisieren[137]. Diese graphische Darstellung des formalen Objekts "Graph" wirkt sich vor allem hinsichtlich der pragmatischen Dimension aus, Petrinetze als Kommunikationsinstrumente über die modellierten Systeme zu verwenden. Die Präzision der formalen mathematischen Ausdrucksweise geht hierbei allerdings verloren.

---

136) In der vorliegenden Arbeit werden Sachverhalte, die sich nicht natürlichsprachlich beschreiben lassen, nicht berücksichtigt. Daß die Existenz solcher Sachverhalte aber durchaus thematisiert werden kann, zeigen die Diskussionen zur "tacit knowledge"-These, die davon ausgeht, es gebe "verschwiegenes", d.h. natürlichsprachlich nicht ausdrückbares, aber dennoch anwendbares Wissen. Vgl. zu dieser These **Zelewski** (1986a), S. 893ff., und die dort angeführten Quellen.

137) Vgl. **Holt,A.** (1971), S. 202; **Hack** (1972), S. 2 u. 7; **Hack** (1975a), S. 13; **Merlin** (1976a), S. 615; **Petri** (1976b), S. 11; **Tourres** (1976), S. 217; **Murata** (1977c), S. 2; **Agerwala** (1978a), S. 149; **Agerwala** (1979), S. 85; **Petri** (1979c), S. 83; **Priese** (1979), S. 4; **Han** (1979), S. 270f.; **Pakas-Skewes** (1979), S. 9; **Memmi** (1979), S. 92; **Oberquelle** (1980), S. 505; **Ramamoorthy** (1980), S. 441; **Hackmann** (1981), S. 372; **De Cindio** (1982), S. 269; **Scheschonk** (1982), S. 104; **Girault** (1982a), S. 0.1.

3.5 Petrinetze in topologischer Sicht

Der graphentheoretische Ansatz wird durch die topologische Betrachtungsweise von Petrinetzen in mathematischer Hinsicht verallgemeinert. Die topologische Theorie befaßt sich mit allen Eigenschaften von Objekten, die invariant sind gegenüber ausgezeichneten umkehrbar eindeutigen und umkehrbar stetigen ("topologischen") Abbildungen[138]. Ohne hier auf die mathematischen Details solcher Abbildungen einzugehen, lassen sie sich jedoch in einer groben, informalen Annäherung als Abbildungen beschreiben, welche die abgebildeten Objekte in beliebiger Weise verformen - insbesondere auch deren quantitativen Eigenschaften verändern - dürfen, solange kein unstetiges Zerschneiden der Objekte erfolgt[139]. Daher stellt die Topologie eine - im Vergleich zur Graphentheorie - sehr abstrakte Theorie dar, die nur noch auf wenige qualitative Objekteigenschaften Bezug nimmt.

Der topologische stimmt mit dem o.a. mengentheoretischen Ansatz insofern überein, als Petrinetze nur mit der Hilfe von Mengen und Relationen, die über diesen Mengen oder zuvor gebildeten Relationen definiert sind, charakterisiert werden. Bei der mengentheoretischen Betrachtungsweise wird jedoch die Menge der natürlichen Zahlen zur Definition von Kapazitäts-, Gewichtungs- und Markierungsfunktion, von Konsistenzbedingungen und Schaltregel herangezogen. Hierdurch werden Petrinetze als quantitativ bestimmte Objekte charakterisiert, die eine innere Metrik[140] zulassen[141]. Aus topologischer

---

138) Vgl. **Seifert (1934)**, S. 1; **Seifert (1980)**, S. 1.

139) Vgl. **Winfree (1983)**, S. 101; **Thurston (1984)**, S. 112.

140) In grober Annäherung läßt sich eine Metrik als die Definition eines Maßstabes für den Vergleich des Abstands zwischen den Elementen einer Menge umschreiben.

141) Metriken, die spezifisch im Rahmen der Petrinetz-Theorie gelten, werden im Zusammenhang mit dem Konzept der Synchronie-Abstände untersucht; vgl. **Lautenbach (1978)**, S. 227ff.

Sicht wird dagegen jede Netz-Metrik, jede numerische Quantifizierung der Eigenschaften von oder der Beziehungen zwischen Petrinetz-Komponenten grundsätzlich ausgeschlossen[142]. Hierin wird der hohe, von allen metrisch-quantitativen Merkmalen absehende Abstraktionsgrad des topologischen Ansatzes nochmals deutlich.

In den topologischen Umgang von Petrinetzen gehen - wie es schon bei der Graphentheorie der Fall war - nur noch die Knotenmenge $X=S\cup T$ und die Kantenmenge F ein. Als weiterführende Abstraktion wird von der Kantenrichtung abgesehen[143], da sie unter den verformenden topologischen Abbildungen nicht notwendig erhalten bleibt. Petrinetze werden nur noch als ungerichtete Graphen betrachtet. Mit Hilfe dieser modifizierten Kantenmenge F wird auf der Knotenmenge X eine "Netztopologie" NT als Menge von Teilmengen der Menge X gebildet. Die Beschreibung der charakteristischen Eigenschaften dieser topologischen Menge NT würde eingehendere topologische Kenntnisse voraussetzen, die hier nicht näher dargelegt werden sollen[144]. Das Tupel PR=(X;NT) bildet einen "Petri-Raum"[145]. Dieser stellt eine spezielle Ausprägung des allgemeinen Konzepts topologischer Räume[146] dar: einen elementaren und primitiven topologischen Raum[147].

---

142) Vgl. **Holt,A. (1975d)**, S. 162.

143) Folglich ist die Kantenmenge nicht mehr als Flußrelation $F\subseteq((S\times T)\cup(T\times S))$, sondern nur noch als Relation $F\subseteq(X\times X)$ definiert; vgl. **Petri (1973)**, S. 142; **Fernandez (1975)**, S. 5.

144) Formal ist die Topologie TOP mit P(X) als Menge ("Potenzmenge") aller Teilmengen TX der Referenzmenge X definiert durch:
$TOP=\{TX\subseteq X \mid \bigwedge (x_i,x_j\in X): \ldots$
$((x_i\in X \wedge (x_i,x_j)\in F) \rightarrow x_j\in TX)\}\subseteq P(X)$
Vgl. **Petri (1973)**, S. 142; **Fernandez (1975)**, S. 5. Vgl. allgemein zu Begriff und Eigenschaften topologischer Mengen **Fernandez (1976a)**, S. 2.

145) Vgl. **Petri (1973)**, S. 142; **Fernandez (1975)**, S. 5ff.

146) Vgl. zur Theorie topologischer Räume als Kern der topologischen Theorie **Fernandez (1976a)**, S. 2f.

147) Vgl. **Petri (1976b)**, S. 30; **Genrich (1976b)**, S. 27, Abb. 17; **Schiffers (1977)**, S. 1f.

Mit Hilfe eines weiteren topologischen Konzepts, den Homomorphismen[148], lassen sich Petri-Räume um die übrigen, über Knoten und Kanten hinausgehenden Komponenten von Petrinetzen - wie z.B. Markierungen[149] und Netzbeschriftungen - erweitern. Da Knoten und Kanten jedoch den Kern der topologischen Charakterisierung von Petrinetzen bilden, werden diese beiden Netzkomponenten auch als topologische Netzbestandteile bezeichnet.

Die Einordnung - einer abstrahierten Form - von Petrinetzen in die anspruchsvolle topologische Theorie läßt erahnen, welche mathematische Tiefe mit der Formalisierung des Petrinetz-Konzepts verknüpft ist.

---

148) Vgl. Bei Homomorphismen handelt es sich um lineare topologische Abbildungen.

149) Eine Markierung stellet in topologischer Sicht einen Homomorphismus dar, der eine Teilmenge der Knotenmenge X - die Menge aller Knoten vom Stellen-Typus - auf die Menge der natürlichen Zahlen abbildet.

3.6 Petrinetze in automatentheoretischer Sicht

Die Erkenntnisobjekte der Automatentheorie sind durch ihre Funktion definiert, Ströme eingehender Objekte - den "Input" - durch interne Verarbeitung in Ströme ausgehender Objekte - den "Output" - zu transformieren.

Petrinetze lassen sich unter diesem Blickwinkel als Netzwerke ("Superautomaten") aus verteilten, lose gekoppelten sequentiellen Automaten kennzeichnen. Jeder Automat besteht aus einer Transition oder einem Teilnetz, in dem die Schaltakte der zugehörigen Transitionen vollständig geordnet sind, also eine sequentielle Schaltfolge bilden[150].

Das Nebenläufigkeitspotential der Petrinetz-Theorie ist darauf beschränkt, die Funktionsweisen der verteilten Automaten miteinander zu koordinieren. Hierbei werden die Automaten durch einen Markenfluß, der das gesamte Automaten-Netzwerk durchsetzt, nach dem bereits oben erläuterten Prinzip der losen Kopplung in der Weise koordiniert, daß die Marken sowohl In- als auch Output der Automaten-Aktivitäten darstellen. Die automateninterne Input-Output-Transformation erfolgt ebenso als ein Markenfluß, der sich jedoch innerhalb der Grenzen der jeweils betroffenen Automaten-Teilnetze abspielt.

---

150) Solche Teilnetze können - unter Ausblendung des umgebenden Rest-Petrinetzes - als selbständige Petrinetze betrachtet werden. Dann gehören sie zur Netzklasse der Zustandsnetze, deren Randknoten ausschließlich durch Transitionen gebildet werden. Die Ausgangsmarkierung dieser Netze besteht insgesamt aus höchstens einer Marke. Die Transitionen besitzen jeweils höchstens eine Eingangs- und höchstens eine Ausgangskante. Aufgrund dieser strukturellen Eigenschaften kann in einem Zustandsnetz unter jeder (zulässigen) Markierung höchstens eine Transition schalten. Hierdurch wird erzwungen, daß jeder Prozeß, der durch die Schaltakte der Transitionen eines Zustandsnetzes definiert ist, aus Schaltsequenzen besteht. Folglich sind in Zustandsnetzen nebenläufige Prozesse per constructionem ausgeschlossen.

Die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Automaten werden durch Stellen realisiert[151]. Sie üben die Funktion von Speichern für die Marken aus, die zwecks loser Kopplung zwischen den Automaten ausgetauscht werden[152].

Eine spezielle Deutung von Petrinetzen ergibt sich, wenn sie aus der Perspektive der Theorie informationsverarbeitender Automaten betrachtet werden. Die Koordinierung der einzelnen sequentiellen Automaten, die sich als Computer des von Neumann-Typus auffassen lassen, erfolgt dann durch den Austausch von Informationen. In diesem Sinne stellen Petrinetze abstrakte Modelle "paralleler" Computer-Architekturen dar, in denen die Kontrolle sequentieller informationsverarbeitender (Teil-) Prozesse nebenläufig geschieht. Die Marken repräsentieren Informationen, die entweder von den Automaten direkt verarbeitet werden[153] oder aber diese Verarbeitungsprozesse zwecks Koordinierung der Automaten-Aktivitäten steuern ("kontrollieren"[154])[155]. Marken ohne innere Struktur, d.h. Kopien der Marken-Art "ø", ent-

---

151) Hinzu kommen die Kanten, welche die Stellen mit den Transitionen, die jeweils einen atomaren Automaten darstellen, oder mit den Ein- und Ausgangstransitionen von zusammengesetzten Automaten verbinden.

152) Eine spezielle Klasse von Petrinetzen, die Fifo-Netze, wurde derart konzipiert, daß die voranstehende Charakterisierung der Petrinetze explizit auf die Definition ihrer Transitionen, Stellen und Marken übertragen wird. Insbesondere wird für den Markenabzug von den o.a. Stellen mit Speicher-Funktion die Fifo-Regel unterstellt ("First in/first out): Diejenigen Marken, die auf einer Stelle zuerst eingetroffen sind, werden beim Schalten einer nachgelagerten Transition auch wieder als erste abgezogen.

153) Der entsprechende Marken(teil)fluß wird in der Regel als "Datenfluß" bezeichnet.

154) Vgl. hierzu die Anmerkungen zum systemtheoretischen Kontrollbegriff, der von seinem betriebswirtschaftlichen Pendant im Sinne des betriebswirtschaftlichen Steuerungsbegriffs inhaltlich abweicht. Dieser systemtheoretische Kontrollbegriff wurde ursprünglich in der Automatentheorie konzipiert.

155) Der zugehörige Marken(teil)fluß wird zumeist als "Kontrollfluß" angesprochen.

sprechen atomaren Signalen. Marken mit innerer Struktur stellen dagegen komplexe Informationen ("Datenvektoren") dar[156]. Diese automaten- und zugleich informationstheoretische Charakterisierung von Petrinetzen läßt das bedeutsame Potential zu Trage treten, das die Petrinetz-Theorie der Gestaltung paralleler Computer-Architekturen eröffnet[157].

---

156) Hierbei determiniert jedes Markenattribut den Wert eines Feldes des korrespondierenden Datenvektors.

157) Die Nutzung dieses Potentials liegt auch den meisten praktischen Anwendungen der Petrinetz-Theorie zugrunde.

3.7 Petrinetze in kalkültheoretischer Sicht

Aus der Perspektive der Kalkültheorie sind Petrinetze rein formal definierte Objekte[158]: Weder werden ihre Komponenten durch Zuordnung von Bedeutungen interpretiert (fehlende Netzsemantik) noch wird mit den Netzen ein - außerhalb ihrer selbst liegender - Zweck verfolgt (Nichtexistenz einer Netzpragmatik). Petrinetze fehlt in diesem Verständnis jegliche Fremdreferenz; ihre Anwendung erfolgt als Selbstzweck[159].

Ein Kalkül[160] besteht aus einer - nicht notwendig endlichen - Menge formaler Objekte ("Ausdrücke") und aus einer endlichen Menge formaler Regeln, die festlegen, welche Operationen auf diesen Objekten ausgeführt werden können. Diese Regelmenge wird auch als Syntax des Kalküls bezeichnet. Die Menge aller Ausdrücke des Kalküls[161] läßt sich mit Hilfe der Syntax in rekursiver Weise aus einer - abermals nicht notwendig endlichen - Menge ("Alphabet") atomarer formaler Objekte ("Zeichen") herleiten[162]. Somit stellt das Paar aus

---

158) Vgl. **Pakas-Skewes (1979)**, S. 45.

159) Aus der Sicht der neueren, vor allem soziologisch ausgerichteten Systemtheorie stellen derart charakterisierte Petrinetze "selbst-referentielle" Systeme dar.

160) Vgl. **Carnap (1960)**, S. 79 u. 102; **Carnap (1968)**, S. 4 u. 120; **Stegmüller (1983)**, S. 73.

161) Wenn der Aspekt herausgestellt werden soll, daß die Ausdrücke durch Anwendung der syntaktischen Regeln korrekt aus den Zeichen des zugrundeliegenden Alphabets gebildet wurden, werden diese Ausdrücke auch als zulässige Ausdrücke bezeichnet. Unzulässige Ausdrücke können dagegen auf zwei Weisen - oder durch deren Kombination - entstehen. Erstens ist es möglich, daß solche Ausdrücke Zeichen enthalten, die nicht zum Alphabet gehören. Zweitens können die Ausdrücke durch eine "freie Kombination" aus den Zeichen des Alphabets hervorgegangen sein, die sich nicht durch die Anwendung der kalkülspezifischen Regeln erklären läßt.

162) Denn es gilt: Jedes Zeichen ist ein Ausdruck des Kalküls. Jeder Ausdruck, der aus der Anwendung von Operationen, die in den syntaktischen Regeln definiert sind, auf eine nicht-leere Menge bereits erzeugter Ausdrücke hervorgeht, ist ebenfalls ein Ausdruck des Kalküls.

Alphabet und Syntax die kompakte Beschreibung eines Kalküls dar.

Die Petrinetz-Theorie kann als ein Kalkül betrachtet werden, dessen Ausdrücke jeweils von einem Petrinetz gebildet werden. Daher hängt die Kalkül-Definition von der Auswahl des zugrundegelegten Petrinetz-Typus ab. Ferner ist die Rückführung eines Kalküls auf ein Alphabet-Syntax-Paar nicht notwendig eindeutig. Vielmehr können Kombinationen unterschiedlicher Alphabete und Syntaxen dasselbe Kalkül hervorbringen[163]. Für die nachfolgende Exemplifizierung des kalkültheoretischen Ansatzes wird der Typus der Stelle/Transition-Netze vorausgesetzt[164], da aus ihm alle anderen Petrinetz-Typen - auch im kalkültheoretischen Rahmen - als Verfeinerungen abgeleitet werden können.

Das Alphabet des Kalküls der Stelle/Transition-Netze besteht aus 2 atomaren Netzen AN_1 und AN_2 als "Netz-Zeichen" oder atomaren "Netz-Ausdrücken". Formal sind sie definiert durch:

$AN_1=(\{s_j\},\{t_i\};\{(s_j,t_i)\},K_1,W_1,M_{01})$

mit: $K_1(s_j)=1$, $W_1(s_j,t_i)=1$, $M_{01}(s_j)=0$

$AN_2=(\{s_j\},\{t_i\};\{(t_i,s_j)\},K_2,W_2,M_{02})$

mit: $K_2(s_j)=1$, $W_2(t_i,s_j)=1$, $M_{02}(s_j)=0$

Die Kalkül-Syntax wird durch 2 Regeln bestimmt, die festlegen, wie aus bereits definierten Netz-Ausdrücken durch beliebige, aber maximal endlich viele Regelanwendungen alle Netz-Ausdrücke aus dem Kalkül der Stelle/Transition-Netze gebildet werden können. Hinzu kommt die Initialisierungsregel, welche die einfachsten Stelle/Transition-Netze mit den o.a. Zeichen des Netz-Alphabets identifiziert:

---

163) Für das Kalkül der Stelle/Transition-Netze wird daher nur ein mögliches, aber nicht einzig gültiges Alphabet-Syntax-Paar vorgestellt.

164) Vgl. zu Stelle/Transition-Netzen **Jantzen (1980a)**, S. 167ff.; **Best (1985e)**, S. 10ff.; **Reisig (1986a)**, S. 69ff.

- Initialisierungsregel: Jedes atomare Netz ist ein Stelle/Transition-Netz, wenn die Index-Variablen des atomaren Netzes durch individualisierende Konstanten ersetzt werden.

- Erweiterungsregel: Sei $STN=(S,T;F,K,W,M_0)$[165] ein Stelle/Transition-Netz. Dann ist $STN'=(S,T;F,K',...$ $W',M_0')$ ebenfalls ein Stelle/Transition-Netz, falls mit $c_{Kj}, c_{Wh.k}, c_{Mj} \varepsilon N_0$ als beliebigen natürlichen Zahlen gilt:

  = $K'(s_j)=K(s_j)+c_{Kj}$ für alle Stellen $s_j \varepsilon S$,

  = $W'(x_h,x_k)=W(x_h,x_k)+c_{Wh.k}$ für alle Knoten $x_h, x_k \varepsilon X$ mit $X=S\quad T$,

  = $M_0'(s_j)=M_0(s_j)+c_{Mj}$ für alle Stellen $s_j \varepsilon S$,

  = $M_0(s_j)+c_{Mj} \leq K(s_j)+c_{Kj}$ für alle Stellen $s_j \varepsilon S$ und

  = $W(t_i,s_j)+c_{Wi.j}-W(s_j,t_i)-c_{Wj.i} \leq K(s_j)+c_{Kj}$ für alle Transitionen $t_i \varepsilon T$ und für alle Stellen $s_j \varepsilon S$.

- Verknüpfungsregel: Seien $STN_i=(S_i,T_i;F_i,K_i,W_i,M_{0i})$ und $STN_i=(S_j,T_j;F_j,K_j,W_j,M_{0j})$ zwei Stelle/Transition-Netze mit $K_i(s)=K_j(s)$ und $M_{0i}(s)=M_{0j}(s)$ für alle $s \varepsilon (S_i \cap S_j)$ sowie $W_i(x_h,x_k)=W_j(x_h,x_k)$ für alle $(x_h,x_k) \varepsilon (F_i \cap F_j)$. Dann ist $STN'=(S',T';F',K',W',M_0')$ ebenfalls ein Stelle/Transition-Netz, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

---

165) Vgl. zur formalen Notierung von Stelle/Transition-Netzen z.B. **Reisig (1987a)**, S. 118ff., insb. S. 121 Kurzerklärung der hier verwendeten Symbole:
- N_0/N_+: Menge aller natürlichen Zahlen ein-/ausschließlich Null
- ∞: Platzhalter für eine beliebig große natürliche Zahl mit $c+\infty=\infty+c=\infty$ für alle $c \varepsilon N_+$
- S: Stellenmenge
- T: Transitionenmenge
- F: Flußrelation mit: $F \subseteq ((SxT) \cup (TxS))$
- K: Kapazitätsfunktion mit: $K:S \to N_+ \cup \{\infty\}$
- W: Gewichtungsfunktion mit: $W:(SxT) \cup (TxS) \to N_0$
- M_0: Ausgangsmarkierung(sfunktion) mit: $M_0:S \to N_0$
  $\underline{M_0}$: Vektor der Bilder der Ausgangsmarkierung

$= \quad S' = S_i \cup S_j$

$= \quad T' = T_i \cup T_j$

$= \quad F' = \{(x_h, x_k) \varepsilon (S' \cup T') \mid (x_h, x_k) \varepsilon F_i \vee (x_h, x_k) \varepsilon F_j\}$

$$= \quad K'(s) = \left\{ \begin{array}{ll} K_i(s) & ; \text{ für } s \varepsilon S_i \\ K_j(s) & ; \text{ für } s \varepsilon S_j \end{array} \right\} \text{ für alle } s \varepsilon S'$$

$$= \quad W'(x_h, x_k) = \left\{ \begin{array}{l} W_i(x_h, x_k); \text{für } (x_h, x_k) \varepsilon F_i \\ W_j(x_h, x_k); \text{für } (x_h, x_k) \varepsilon F_j \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{für alle} \\ (x_h, x_k) \varepsilon F' \end{array}$$

$$= \quad M_0'(s) = \left\{ \begin{array}{ll} M_{0i}(s) & ; \text{ für } s \varepsilon S_i \\ M_{0j}(s) & ; \text{ für } s \varepsilon S_j \end{array} \right\} \text{ für alle } s \varepsilon S'$$

Nachfolgend ist ein Stelle/Transition-Netz STN in formaler Notation angeführt, das aus den atomaren Netzen AN_1 und AN_2 durch syntaktische Transformation gemäß den o.a. Regeln abgeleitet wurde[166]:

$STN = (\{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\} = S_{STN}, \{t_1, t_2, t_3, t_4\} = T_{STN};$
$\{(s_1, t_1), (s_1, t_2), (s_2, t_3), (s_3, t_3), (s_4, t_3), (s_4, t_4),$
$(t_1, s_2), (t_2, s_3), (t_2, s_4), (t_3, s_5), (t_4, s_1), (t_4, s_4),$
$(t_4, s_5)\} = F_{STN}, K_{STN}, W_{STN}, M_{0.STN})$

mit: $K_{STN}(s_1) = K_{STN}(s_2) = K_{STN}(s_3) = 1 \quad K_{STN}(s_4) = 2 \quad K_{STN}(s_5) = \infty$
$M_{0.STN}(s_1) = 1 \quad M_{0.STN}(s_2) = (s_3) = (s_4) = (s_5) = 0$
$W_{STN}(s_j, t_i) = 1$ für $(s_j, t_i) \varepsilon (F_{STN} - \{(s_4, t_3), (t_4, s_4)\})$
$W_{STN}(s_4, t_3) = (t_4, s_4) = 2$

---

166) Formal läßt sich der Transformationsprozeß mit IR(O;PL)/ER(O;PL)/VR(O,O') als Anwendung der Initialisierungs-/Erweiterungs-/Verknüpfungsregel auf die Objekte O,O' mit den Parameterlisten PL wie folgt beschreiben:
STN = VR(VR(VR(VR(VR(VR(VR(VR(VR(VR(VR(VR(...
$ER(IR(AN_1; s_j = s_1, t_i = t_1); c_{M1} = 1)$,
$ER(IR(AN_1; s_j = s_1, t_i = t_2); c_{M1} = 1))$,
$IR(AN_2; s_j = s_2, t_i = t_1))$,
$IR(AN_1; s_j = s_2, t_i = t_3))$,
$IR(AN_2; s_j = s_3, t_i = t_2))$,
$IR(AN_1; s_j = s_3, t_i = t_3))$,
$IR(AN_2; s_j = s_4, t_i = t_2))$,
$ER(IR(AN_1; s_j = s_4, t_i = t_3); c_{K4} = 1, c_{W4.3} = 1))$,
$ER(IR(AN_1; s_j = s_4, t_i = t_4); c_{K4} = 1))$,
$ER(IR(AN_2; s_j = s_4, t_i = t_4); c_{K4} = 1, c_{W4.4} = 1))$,
$IR(AN_2; s_j = s_1, t_i = t_4))$,
$ER(IR(AN_2; s_j = s_5, t_i = t_3); c_{K5} = \infty))$,
$ER(IR(AN_2; s_j = s_5, t_i = t_4); c_{K5} = \infty))$
Der komplexe netzerzeugende Term läßt durch seine vielfache Ineinanderschachtelung von Regelanwendungen deutlich die rekursive Konstruktion von Netzen im kalkültheoretischen Ansatz erkennen.

3.8 Petrinetze in produktorischer Sicht

Der produktorische Ansatz steht mit dem kalkültheoretischen in engster Beziehung. Petrinetze werden auch in produktorischer Sicht als rein formal definierte Objekte ("Ausdrücke") aufgefaßt. Darüber hinaus stimmen die produktorischen Regeln für die Netzdefinition mit der o.a. kalkültheoretischen Netzsyntax überein.

Im Rahmen der Kalkültheorie wird aber nur untersucht, aufgrund welcher Regeln zulässige Netz-Ausdrücke gebildet oder bereits vorhandene in andere (nicht-identische) zulässige Netzausdrücke transformiert werden können. Der produktorische Ansatz umfaßt zwar diese beiden Aspekte ebenso, stellt aber einen dritten, neuartigen Gesichtspunkt in den Vordergrund. Es handelt sich um die "Produktion" neuer Varianten des zugrundeliegenden, hinsichtlich seiner Identität unveränderten Netzes. Charakteristisch für solche Produktionen ist es, daß ein Petrinetz seine eigenen Varianten aus sich selbst heraus ohne exogene Einflußnahme hervorzubringen vermag[167].

Ausdruck dieses produktiven Potentials ist die Schaltregel, die festlegt, in welcher Weise die Schaltakte von Transitionen vollzogen werden. Während diese Schaltregel keine explizite Berücksichtigung im kalkültheoretischen Ansatz findet, tritt sie in den Mittelpunkt der produktorischen Betrachtungsweise von Petrinetzen.

167) Wird diese produktorische Betrachtungsweise zur systemtheoretischen hinzugefügt, so stellen Petrinetze Systeme mit der Fähigkeit zur autonomen Selbstmodifizierung dar. Außerhalb der - inhaltlich anders gelagerten - Theorie autopoietischer Systeme, die zur Selbst-Organisation ihrer Struktur imstande sind, stellt die Petrinetz-Theorie nach Wissen des Verf. die einzige Version der Systemtheorie dar, die solche autonomen Systemveränderungen zuläßt.

In produktorischer Hinsicht stellt die Erreichbarkeitsmenge eines Petrinetzes dessen wichtigste Komponente dar. Sie beschreibt die Menge aller Varianten, die ein - durch seine Ausgangsmarkierung gegebenes - Petrinetz durch Schaltakte von Transitionen hervorzubringen vermag[168]. Jede Variante besteht aus dem ursprünglichen Petrinetz, dessen Ausgangsmarkierung durch die jeweils erreichte Folgemarkierung substituiert ist.

In Verbindung mit dem automatentheoretischen Ansatz läßt sich eine weiterführende Modifizierung der produktorischen Betrachtungsweise vornehmen. Die Ausgangsmarkierung wird nicht mehr zur Definition des ursprünglich gegebenen Petrinetzes herangezogen, sondern als Input eines Automaten betrachtet, der von diesem Netz konstituiert wird[169]. Dieser Automat "produziert", wenn er mit dem Input der Ausgangsmarkierung initialisiert wird, durch das markierungsabhängige Schalten seiner Transitionen einen Output, der sich in unterschiedlicher Weise definieren läßt. Als Output können zunächst die Folgemarkierungen betrachtet werden, die durch Schaltakte des Automaten-Netzes erreicht werden. Darüber hinaus sind aber auch Output-Definitionen möglich,

---

168) Die Identität eines Netzes wird bei dieser Betrachtungsweise durch die individuelle Ausprägung aller Komponenten des Tupels der kalkültheoretischen Netzdefinition - mit Ausnahme der Ausgangsmarkierung - hergestellt. Daher beeinflussen Markierungs-Veränderungen oder Abstraktionen von jeglicher Markierung die Netzidentität nicht.

169) Im Gegensatz zum automatentheoretischen Ansatz wird jetzt also das Petrinetz nicht als ein Netzwerk aus mehreren sequentiellen (Teil-)Automaten aufgefaßt. Vielmehr wird das Netz in seiner Gesamtheit als ein Automat angesehen.

die an die Schaltakte der Transitionen im Automaten anknüpfen[170].

Besonders häufig werden die Transitionen mit formalsprachlichen Zeichens beschriftet, so daß jedes Schalten einer Transition dem Erzeugen eines solchen Zeichens entspricht. Der Output des Netz-Automaten bildet dann einen komplexen formalsprachlichen Ausdruck[171].

Werden einerseits die Ausdrucks-Mengen untersucht, die ein solcher Automat bezüglich einer Menge unterschiedlicher Inputs (Ausgangsmarkierungen) zu erzeugen vermag, und wird anderseits die Analyse einzelner Automaten durch die Betrachtung von Klassen strukturgleicher Automaten (Petrinetz-Klassen) abgelöst, resultiert als Untersuchungsobjekt eine ganze Sprache formalsprachlicher Ausdrücke. Petrinetze werden aus dieser Perspektive zu Generatoren von formalen Sprachen[172]; sie stellen eine nebenläufige Definition der Syntax

---

170) Eine Mischform, die sowohl an hervorgebrachte Markierungen als auch an die verursachenden Schaltakte anknüpft, liegt dann vor, wenn der Output des Automaten als Prozeßnetz definiert wird. Solche Prozeßnetze stellen Petrinetze sui generis dar. In ihnen entspricht eine Transition jeweils dem Schalten einer Transition im zugrundeliegenden Automaten-Netz, während ausgezeichnete Stellen-Teilmengen - die sogenannten "Schnitte" - jeweils einer Markierung des zugrundeliegenden Automaten-Netzes zugeordnet ist. Da solche Prozeßnetze das nebenläufige Gesamtverhalten der betrachteten Automaten vollständig und eindeutig beschreiben, bedeutet die Wahl von Prozeßnetzen als Automaten-Output, daß die Automaten exakte Beschreibungen ihrer eigenen Funktionsweise ausgeben. Vgl. zu Prozeßnetzen **Best (1985e)**, S. 13f., der allerdings auf das Suffix "-netz" verzichtet.

171) Es sind jetzt also zwei unterschiedliche Ausdrucks-Arten zu unterscheiden. Erstens stellen die Petrinetze nach Produktorischer Auffassung selbst Ausdrücke dar. Zweitens bringt das "Innenleben" dieser Ausdrücke, die Gesamtheit der internen Schaltakte des zugrundeliegenden Netz-Automaten, als Output Ausdrücke eigener Art hervor. Nachfolgend werden nur noch diese "produzierten" Ausdrücke betrachtet.

172) Vgl. **Starke (1980)**, S. 2.

("Grammatik") dieser Sprachen dar[173]. Da die Ausdrücke, die im Rahmen einer solchen Syntax hervorgebracht werden können, auch als zulässige Kombinationen der Zeichen des zugrundeliegenden Alphabets betrachtet werden können, wird diese Betrachtungsweise der Petrinetz-Theorie mitunter als kombinatorischer Ansatz bezeichnet[174].

Nicht nur der Output eines Netz-Automaten läßt sich als formalsprachlicher Ausdruck interpretieren, sondern ebenso sein Input in Gestalt der Ausgangsmarkierung[175]. Dann stellt ein Petrinetz einen Automaten dar, der gegebene formalsprachliche Ausdrücke in neue formalsprachliche Ausdrücke transformiert. Dies entspricht genau dem Konzept der Produktionssysteme[176], die in jüngster Zeit als "Produktionsregelsysteme" im Rahmen der Künstlichen Intelligenz eine vielbeachtete Renaissance erlebt haben[177]. Aus produktorischer Sicht können Petrinetze also auch als Produktions- oder Produktionsregelsysteme betrachtet werden[178]. Hierbei sind die Regeln der beiden letztgenannten Systeme aus den Schaltregeln der äquivalenten Petrinetze zusammengesetzt.

---

173) Mit diesem Aspekt der Petrinetz-Theorie als einer Theorie zur Erzeugung - oder prozeduralen Definition - formaler Sprachen setzt sich eine Vielzahl von Arbeiten auseinander.

174) Der kombinatorische Ansatz geht auf das Grundlagen-Werk der Petrinetz-Theorie - **Petri (1962)**, S. 13ff. u. 24ff. - zurück, der auch in diesem Arbeitsbericht näher vorgestellt wurde. Vgl. hierzu auch **Petri (1963)**, S. 386; **Genrich (1978b)**, S. 84; **Symons (1980b)**, S. 32; **Genrich (1980c)**, S. 721.

175) Beispielsweise kann jede Stelle mit einem Prädikat assoziiert werden, so daß eine Ausgangsmarkierung der Gültigkeit eines - entsprechend der Markenverteilung über den Stellen - komplex zusammengesetzten Prädikats entspricht.

176) Vgl. **Post (1943)**, S. 197ff., insbesondere S. 199ff.

177) Vgl. zu solchen Produktionsregelsystemen **Davis (1975)**, S. 1ff.; **Zelewski (1986a)**, S. 199ff.

178) Vgl. zur engen Beziehung zwischen Petrinetzen einerseits und Produktions(regel)systemen andererseits **Zelewski (1986a)**, S. 319, 670 u. 745.

3.9 Petrinetze in semiotischer Sicht

Die Betrachtungsweise der Semiotik stellt eine Erweiterung des kalkültheoretischen Ansatzes um modelltheoretische Aspekte dar. Daher führt sie zu keinen grundsätzlichen Erkenntnissen, die über die kalkül- und modellbezogenen Ausführungen hinausgehen.

Die Semiotik befaßt sich mit allen Objekten ("Ausdrücken"), die entweder selbst atomare Zeichen darstellen oder aus solchen zusammengesetzt sind, ohne der kalkültheoretischen Beschränkung auf den syntaktischen Zeichenaspekt zu unterliegen. Infolgedessen bildet ein Petrinetz aus semiotischer Sicht nicht mehr (nur) einen formalsprachlichen Ausdruck, sondern einen sprachlichen Ausdruck schlechthin, dem auch eine semantische und eine pragmatische Dimension zukommt.

Die Syntax der Netzsprache, die aus solchen Ausdrükken gebildet wird, entspricht derjenigen, die oben als Netzkalkül vorgestellt wurde. Die Semantik eines Ausdrucks wird jeweils durch das - ideale oder reale - Objekt konstituiert, dessen Modell das betrachtete Petrinetz darstellt. Der Modellierungszweck liefert die Netzpragmatik. Als Beispiele für die letztgenannte wurden bereits die Gestaltung von komplexen Handlungen oder Entscheidungen angeführt.

4 Die Petrinetz-Theorie als Konkretisierung des Petrinetz-Konzepts

Die Petrinetz-Theorie besteht aus einem Komplex von Aussagen[179] über die Definition von (zulässigen) Petrinetzen, über die Eigenschaften einzelner Petrinetze sowie über die Beziehungen zwischen verschiedenen Petrinetzen[180]. Seitens der Petrinetz-Forschung hat sich eine Zweiteilung[181] der Petrinetz-Theorie in die Zweige der Speziellen und der Allgemeinen Netztheorie etabliert. Diese interne Differenzierung der Petrinetz-

179) Der Begriff "Aussagen" wird hier im prä-logischen, umgangssprachlichen Sinne einer sprachlichen, inhaltlich in sich abgeschlossenen Einheit verstanden. Er umfaßt daher beispielsweise sowohl prädikaten- aus auch "aussagen"-logische Formeln als spezielle Ausprägungen.

180) Hinzu kommen - in der Regel nicht explizit angeführte - mathematische und logische Transformationsregeln zur Ableitung ("a posteriori") neuer gültiger Aussagen aus alten, bereits als gültig nachgewiesenen Aussagen. Ferner muß mindestens eine Aussage als Axiom, d.h. als a priori gültig, vorausgesetzt werden, um das Initialisierungsproblem aller nicht-zyklischen logischen Beweissysteme zu lösen. Dies geschieht jedoch in den meisten Beiträgen zur Petrinetz-Theorie nicht in expliziter Weise. Vielmehr sind die einführenden Aussagen dieser Beiträge, die sich im Regelfall auf die Definition der betrachteten Petrinetz-Typen und elementarer Netz-Eigenschaften erstrecken, als implizit vereinbarte Axiome zu betrachten. Näheres zur Struktur von Beweissystemen zur Überprüfung der Gültigkeit von Aussagen in **Stegmüller (1973)**, S. 12ff.; **Potthoff (1981)**, S. 47ff. i.V.m. 4ff.

181) Mitunter erfolgt sogar eine Dreiteilung, welche die beiden Zweige der Speziellen und der Allgemeinen Netztheorie unter den Oberbegriff der "Reinen Netztheorie" subsumiert werden, dem als Gegenbegriff die "Angewandte Netztheorie" gegenübersteht; vgl. **Peterson (1981)**, S. 5. Die "Angewandte Netztheorie" beschäftigt sich mit den Anwendungen der "Reinen Netztheorie" zur Erfüllung praktischer Aufgaben. Der Verf. folgt dieser Terminologie jedoch nicht, weil er es für semantisch unsauber erachtet, die Anwendung einer Theorie selbst noch als "Theorie" zu bezeichnen. Das Attribut "Angewandt(e)" vermag an diesem Sachverhalt nichts zu ändern.

Theorie setzte zu Beginn der siebziger Jahre mit der Herausbildung der Allgemeinen Netztheorie ein[182].

Die Spezielle Netztheorie[183] erstreckt sich auf die Definition und Analyse einzelner Petrinetze[184]. Sie wird in der einschlägigen Petrinetz-Literatur ausführlich und vorrangig behandelt.

Die Allgemeine Netztheorie[185] betrifft dagegen die Analyse der Beziehungen zwischen den Elementen einer - jeweils analysespezifisch definierten - Klasse von Petrinetzen und deren gemeinsamen Eigenschaften. Sie setzt die Erkenntnisse der Speziellen Netztheorie voraus und ist bislang bei weitem weniger intensiv erforscht als die Spezielle Netztheorie. In der Hauptsache erstreckt sie sich zur Zeit auf die Konstruktion und Untersuchung von Netzmorphismen, die zwischen unterschiedlich abstrakten Petrinetz-Modellen desselben Modellierungs-Objekts vermitteln.

Programmatisch wird allerdings von der Allgemeinen Netztheorie ein sehr umfassender Anspruch erhoben[186], der sie in den Rang einer allgemeinen System- und Modelltheorie erhebt[187]. Es wird proklamiert, im Rahmen der Erkenntnisse der Allgemeinen Netztheorie könne jedes beliebige System:

---

182) Vgl. **Petri (1977a)**, S. 140; **Petri (1979c)**, S. 81; **Petri (1980a)**, S. 3.

183) Vgl. **Petri (1977a)**, S. 140; **Petri (1980a)**, S. 3.

184) Eine abweichende Ansicht vertritt **Fernandez (1975)**, S. 1: Er rechnet der Speziellen Netztheorie nur die Beschäftigung mit Stelle/Transition-Netzen (und den ihnen konzeptionell zugrundeliegenden, konzeptionell einfacheren Bedingung/Ereignis-Netzen; Anmk. des Verf.) zu, während die Allgemeine Netztheorie die Auseinandersetzung mit allen anderen (komplexeren; Anmk. des Verf.) Petrinetz-Typen umfasse.

185) Vgl. **Petri (1977a)**, S. 140; **Petri (1979c)**, S. 81; **Petri (1980a)**, S. 3; **Degli Antoni (1980a)**, S. 7ff.;**Rosenstengel (1982)**, S. 2.

186) Vgl. **Genrich (1981)**, S. 109f.; **Oberquelle (1980)**, S. 483.

187) Vgl. zur Charakterisierung der Petrinetz-Theorie als einer allgemeinen Systemtheorie **Herzog (1973)**, S. 3;**Eggert (1979)**, S. 39; **De Cindio (1983b)**, S. 41.

- hinsichtlich seiner Struktur durch ein Petrinetz als System-Modell adäquat[188] beschrieben werden[189];
- bezüglich aller nicht-strukturellen Sachverhalte[190] durch natürlich- oder formalsprachliche Beschriftungen der Petrinetz-Komponenten modelliert werden.

Diese Programmatik stößt auf der Seite der Anwender der Petrinetz-Theorie, die sich mit deren Modellierungspotential intensiv auseinandergesetzt haben, auf einen skeptisch-verhaltenen bis euphorischen Optimismus, die erhobenen Ansprüche auch tatsächlich einzulösen[191]. So hält *Holt* einerseits die derzeit verfügbaren mathematischen, computertechnischen und physikalischen Instrumente zur Beschreibung und Analyse der Wirkungsmechanismen in komplexen Systemen für grundsätzlich ungeeignet, gibt aber anderseits der Hoffnung Ausdruck, die Petrinetz-Theorie könne diese Kluft schließen[192]. Zur Zeit ist der umfassende Modellierungs-Anspruch noch nicht erfüllt, bedarf die Allgemeine Netztheorie noch der inhaltlichen Fortentwicklung[193].

---

188) Unter adäquater Modellierung wird hierbei die Möglichkeit des Modellierenden verstanden, das zu modellierende Objekt auf einem Abstraktionsniveau darzustellen, das aus einem breiten Spektrum unterschiedlich abstrakter Petrinetz-Modelle gewählt werden kann.

189) **Degli Antoni (1980a)**, S. 7, hält diesen (Teil-)Anspruch schon derzeit für experimentell - d.h. mittels exemplarisch als System-Modelle konstruierter Petrinetze - weitgehend bestätigt.

190) Hierzu zählen beispielsweise die Funktionsweisen einzelner Systemkomponenten oder der System-Zweck. Allerdings findet sich in der - noch raren - Literatur zur Allgemeinen Netztheorie keine präzise Definition struktureller und nicht-struktureller Systemaspekte. Wegen dieses mangelhaften begrifflichen Fundaments kann der o.a. Anspruch auf allgemeine Modellierungsfähigkeit nicht exakt überprüft werden.

191) Vgl. **Holt,A. (1975d)**, S. 162.

192) Vgl. **Holt,A. (1976)**, S. 141.

193) Vgl. **Oberquelle (1980)**, S. 483.

Die Petrinetz-Theorie weist eine bemerkenswerte Vielfalt von Berührungspunkten mit anderen Theorien auf. Dies führte zu einer Kontroverse, ob es sich bei der Petrinetz-Theorie um eine eigenständige mathematische Theorie handele[194] oder ob sie nicht vielmehr einen interdisziplinären Ansatz zur Erkenntniserzielung im Kontext komplexer Erkenntnisprobleme darstelle[195], der den befruchtenden Austausch zwischen den involvierten Disziplinen fördere. Infolge der Existenz streng formaler, in sich geschlossener Darstellungen des Petrinetz-Konzepts, die mit der Erreichbarkeits- und der Invariantenanalyse auch leistungsfähige formale Methoden zur Untersuchung von Petrinetzen umfassen, schließt sich der Verf. der erstgenannten Auffassung an.

Dennoch ist es interessant, die Berührungspunkte der Petrinetz-Theorie mit anderen Theorien als Indikatoren für den inhaltlichen Reichtum der Petrinetz-Theorie anzuführen. Solche theoretischen Nachbarschaftsverhältnisse bestehen in bezug auf die:

- Systemtheorie;
- Modelltheorie;
- Graphentheorie[196];
- Mengentheorie[197] einschließlich der Kategorienlehre[198];
- Topologie[199];

194) Diese Ansicht wird von **Meldman (1971)**, S. 65; **Petri (1976b)**, S. 11; **Cotronis (1977)**, S. 198; **Lauer (1981c)**, S. 144; **Rosenstengel (1982)**, S. 51, vertreten.

195) Vgl. **Genrich (1976b)**, S. 4; **Petri (1979c)**, S. 83; **Hackmann (1981)**, S. 372; **Hackmann (1982)**, S. 1, 22 u. 85.

196) Vgl. **Peterson (1977)**, S. 225; **Girault (1982a)**, S. 14.

197) Vgl. **Petri (1983)**, S. 1f.

198) Vgl. **o.V. (1979b)**, S. 14.

199) Vgl. **Petri (1962)**, S. 2; **Holt,A. (1975d)**, S. 160; **Peterson (1977)**, S. 226; **o.V. (1979b)**, S. 14.

- Logik[200];
- Kalkültheorie;
- Theorie der formalen Sprachen[201];
- Automatentheorie[202];
- Komplexitätstheorie[203];
- Informations- und Kommunikationstheorie[204];
- Kombinatorik[205];
- Gruppentheorie[206];
- Mathematik linear-ganzzahliger Systeme[207], hierbei vor allem: lineare Algebra[208], Vektor-Additions-Systeme[209] und Presburger-Arithmetik[210];
- Geometrie[211];
- theoretische Physik[212], insbesondere die Spezielle Relativitätstheorie;

---

200) Vgl. **Petri** (1962), S. 2; **Holt,A.** (1975d), S. 160; **o.V.** (1979b), S. 14; **Petri** (1980a), S. 13; **Genrich** (1980c), S. 721; **Girault** (1982a), S. 14.

201) Vgl. **Peterson** (1977), S. 225; **Lauer** (1980), S. 452; **Girault** (1982a), S. 14.

202) Vgl. **Holt,A.** (1968), S. 14; **Ullrich** (1976), S. 2.6 u. 2.37; **Peterson** (1977), S. 225; **Lockemann** (1978), S. 79; **Petri** (1979c), S. 83; **Riedemann** (1979), S. 38 u. 69ff.; **Starke** (1980), S. 62f. u. 93ff.; **Lauer** (1980), S. 452; **Girault** (1982a), S. 14.

203) Vgl. **Peterson** (1977), S. 225; **Zelewski** (1986d), S. 56ff.

204) Vgl. **Petri** (1962), S. 44ff.; **Hack** (1975a), S. 15ff.; **Petri** (1980a), S. 13.

205) Vgl. **Petri** (1962), S. 13ff.

206) Vgl. **Holt,A.** (1975d), S. 160.

207) Vgl. **Hack** (1975a), S. 18ff.; **Petri** (1979c), S. 83; **Petri** (1980a), S. 13; **Petri** (1983), S. 2.

208) Vgl. **Petri** (1962), S. 2; **Holt,A.** (1975d), S. 160; **Peterson** (1977), S. 225.

209) Vgl. **Baker,H.** (1972), S. 1.

210) Vgl. **Peterson** (1977), S. 225.

211) Vgl. **Petri** (1967), S. 123.

212) Vgl. **Petri** (1962), S. 44; **Petri** (1963), S. 386; **o.V.** (1979b), S. 14; **Petri** (1980a), S. 13; **Petri** (1983), S. 8.

- Theorie der Transitionssysteme;
- Theorie der lose gekoppelten Systeme;
- Warteschlangen-Theorie[213];
- Theorie der Zuweisungs-Systeme ("assignment systems")[214];
- Theorie der Systeme mit ausfallgefährdeten Komponenten ("Ersatztheorie")[215].

---

213) Vgl. **Ramöller (1976)**, S. 109ff.; **Peterson (1977)**, S. 234; **Han (1978a)**, S. 166f.; **Han (1979)**, S. 270; **Peterson (1981)**, S. 75.

214) Vgl. **Genrich (1980a)**, S. 26.

215) Vgl. **Beyaert (1981)**, S. 79f.