

Einar Smith

Carl Adam Petri

Eine Biographie



Springer Vieweg

Carl Adam Petri



Einar Smith

Carl Adam Petri

Eine Biographie

 Springer Vieweg

Einar Smith
Fraunhofer-Gesellschaft SCAI –
Institut für Algorithmen und wissenschaftliches Rechnen
Sankt Augustin, Deutschland

ISBN 978-3-642-40221-0
DOI 10.1007/978-3-642-40222-7

ISBN 978-3-642-40222-7 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Geleitwort

Carl Adam Petri

Es ist sicher nicht einfach, zur Biographie einer so speziellen und facettenreichen Persönlichkeit, wie Carl Adam Petri sie stets verkörperte, Worte für eine würdige Einleitung zu finden. Zumal wenn man fachfremd wie ich von den Petri-Netzen schon beeinflusst war, bevor ich ihm überhaupt persönlich begegnen durfte. Als Betriebswirt, Schüler und Mitarbeiter von Erich Kosiol, promovierter Bonner Mathematiker, wurde ich am Institut für Industrieforschung der Berliner FU in einer mathematisch geprägten Instituts Umgebung sehr nachhaltig darauf aufmerksam gemacht, dass man inhaltliche Verkürzungen zugunsten vermeintlicher mathematischer Exaktheit in wissenschaftlichen Texten und vor allem jede Form des Modellplatonismus meiden sollte. Zudem seien ohnehin viele der in unserem Fach verwendeten mathematischen Modelle und Algorithmen auf die stark wertbestimmte und damit meist nicht auf exakten Messwerten beruhende Quantifizierung empirischer Gegebenheiten kaum ausreichend fundierbar. Da kamen uns die Konstellationen der Petri-Netze gerade gut zupass: Eindeutige Beziehungen, aber nicht eineindeutige Anforderungen an die Ausgangsbedingungen der Formalisierung unserer Modelle. So war es nur zu verständlich, dass sich meine Mitarbeiter und ich in meinem 1970 an der Universität zu Köln von mir gegründetem „Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Betriebswirtschaftliche Planung“ gerne und gewinnend mit Petri-Netzen beschäftigten. Udo Winand und Bernd Rosenstengel veröffentlichten so schon 1983 ihre „Petri-Netze – Eine anwendungsorientierte Einführung“.

Als ich dann im Mai 1981 – nach einiger Zeit im Aufsichtsrat – die Leitung der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) übernehmen durfte, stand er mir plötzlich persönlich im Schloss Birlinghoven gegenüber: „Carl Adam Petri“. Wir begrüßten uns irgendwie im Sinne einer thematischen Verbindung. Und ich erwartete Fragen nach der weiteren Ausrichtung seines Instituts oder – wie ja meist nicht unüblich in derartigen Gesprächen – Überlegungen zu Budget-Ergänzungen. Doch Carl Adam, wie wir ihn schon damals intern nannten, bat mich, für internationale Einladungen, die an ihn sehr verdienstvoll ergangen waren, von meiner Chef-Seite her die notwendigen Reisege-

nehmigungen doch bitte nicht zu erteilen. So brauche er als C.A.P. keine Gründe für eine Ablehnung zu erfinden. Hallo dachte ich, diese Zusammenarbeit macht ja von Anfang an richtig Spaß. Und so blieb es dann auch über all die vielen Jahre. Er hielt mich – meist mit vielen Power Point-Folien – auf dem Laufenden. Darin wurde sehr gut erkennbar, wie stark er sich seiner paradigmatischen Erweiterung der – wie es mir als anwendungsorientiertem Nutzer erschien – klassischen Mathematik widmete.

Vielleicht habe ich vieles von dem, was er mir vortrug und erläuterte, nur bedingt verstanden, geblieben ist eine ungebrochene Zuneigung und persönliche Hochachtung. Was sich mir aber besonders eingeprägt hat, ist die hohe wissenschaftliche Anerkennung, die er weltweit erfahren durfte. Sicher diente ihm und seinem engeren Schüler- und Mitarbeiter-Kreis die Ressource GMD auch zu weitreichender internationaler Präsenz, aber letztlich war und ist er zugleich einer der profiliertesten internationalen Repräsentanten unserer „Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung“ im Sinne einer Großforschungseinrichtung für Angewandte Mathematik und Computer Science/Engineering“ in Birlinghoven, Sankt Augustin.

Carl Adam Petri hat sich in besonderem Maße um „seine“ Wissenschaftsorganisation und sein Institut verdient gemacht. Die GMD war ihm stets zu großem Dank verpflichtet. Nicht zuletzt darum wünsche ich mir nun schon seit sehr vielen Jahren, dass es gelingen möge, eine „Carl Adam Petri-Stiftung“ ins Leben zu rufen und so zu gestalten, dass seine vielen wichtigen Konzepte und Anregungen, erheblich über Netze und Nebenläufigkeit hinausgehend, nicht im schnellen Ablauf unserer Zeiten versickern mögen, sondern stets wieder, auch außerhalb universitärer Kontexte, aufgegriffen und konstruktiv weiter entwickelt werden können.

Als Institutsleiter war Petri in meiner Wahrnehmung nicht nur eine inspirierende und äußerst kollegiale Persönlichkeit, sondern zugleich auch immer ein unermüdlicher Motor für neue Entwicklungen. Er begegnete mir immer wieder als besonders emergente Persönlichkeit. So berichtete mir etwa Ulrich Trottenberg, sein langjähriger Mit-Direktor im gemeinsamen Institut, über sehr intensive Diskussionen im Zusammenhang mit dem äußerst innovativen von Ulrich Trottenberg und Wolfgang Giloi wesentlich entwickelten SUPRENUM-Projekt: „Inhaltlich vertraten wir, Carl Adam als theoretischer Informatiker und ich als praxis- und anwendungsorientierter Numeriker, sehr unterschiedliche grundsätzliche Positionen: Während ich mich bei der SUPRENUM-Konzeption um eine parallele Rechnerarchitektur bemühte, welche die Parallelisierung der schnellsten numerischen Verfahren konzeptionell unterstützte und deren effiziente Implementierung ermöglichte, waren für Carl Adam in erster Linie die grundsätzlichen Architekturprinzipien und die Nebenläufigkeit der algorithmischen Strukturen von Interesse. Auch bei der Diskussion des Multigrid-Prinzips ging es Carl Adam um das möglichst genaue Verständnis der Mehrebenen-Struktur, die ihn offensichtlich faszinierte. Dabei waren ihm aber auch die adaptiven Aspekte und die Breite der Anwendbarkeit des Prinzips in Physik, Chemie und anderen naturwissenschaftlichen und technischen Disziplinen sehr wichtig.“ Und genau deswegen habe ich Carl Adam Petri immer als einen so notwendigen Quer- und Weiterdenker zwischen Mathematik, Theoretischer Informatik und aus dieser Sicht an-

wendenden Disziplinen sehr geschätzt. Dass SUPRENUM und andere hoffnungsträchtige Projekte aufgrund der grundsätzlichen Innovationsschwäche der deutschen IKT-Industrie sowie wegen der Kurzatmigkeit bundesdeutscher Förderbereitschaft auf diesen Gebieten sich nicht längerfristig marktwirtschaftlich durchsetzen konnten, mindert nicht die wissenschaftlichen Leistungen. Erfreulicherweise haben sich ja gerade die wissenschaftlichen Konzepte und „Produkte“ von Carl Adam Petri völlig unabhängig davon weltweit verbreitet und völlig zu Recht ihre globale Anerkennung gefunden. Sicher auch ein Glanzpunkt für den Informatik-Standort Deutschland.

So begrüße ich es und freue ich mich sehr, dass die nun vorgelegte Petri-Biographie entstehen konnte. Dr. Einar Smith hat in vorbildlicher Weise recherchiert und aus enger persönlicher Kenntnis heraus ein sehr informatives und beeindruckendes Lebensbild des Menschen und Wissenschaftlers Carl Adam Petri nachgezeichnet. Dies zugleich mit einer „nebenläufigen“ gut erläuternden Einführung in die Welt der Petri-Netze. Im Namen aller Schüler und Freunde von Carl Adam Petri erlaube ich mir hiermit, ihm dafür besonderen Dank auszusprechen. Sicher wäre diese wertvolle Biographie in der vorbildlichen Art nicht ohne die nachhaltige Initiative von Ulrich Trottenberg und die Unterstützung zahlreicher Petri-Schüler sowie die Förderung durch den Vorstand der Fraunhofer Gesellschaft möglich geworden. Auch dafür sei Dank gesagt.

Umfassend angelegte Biographien von herausragenden Persönlichkeiten beleuchten auch stets die zeitgeschichtlichen Gegebenheiten der beschriebenen Lebenswege. So werden in dieser Schrift Auseinandersetzungen von Carl Adam Petri mit den geistigen Strömungen seiner Zeit, seine Verbundenheit mit wissenschaftlichen Persönlichkeiten in aller Welt und sein Engagement für die ihn tragenden Organisationen sichtbar und begreifbar gemacht. Nicht zuletzt deswegen möchte ich diesem Werk eine breite Aufmerksamkeit und viele gerade auch jüngere interessierte Leser wünschen. Autor und Verleger haben sich damit um Carl Adam Petri verdient gemacht.

Sylt, im September 2013

Norbert Szyperski

Vorwort

Carl Adam Petri ist 2010 im Alter von 83 Jahren gestorben. Den größten Teil seines Berufslebens war er Institutsleiter bei der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) in Sankt Augustin bei Bonn, die 2001 mit der Fraunhofer Gesellschaft (FhG) zusammengelegt wurde.

In Anerkennung seiner Bedeutung für die GMD, für die informatische Grundlagenforschung und für die Informatik insgesamt beschloss der Vorstand der FhG 2012, ein Projekt zur Aufarbeitung des Werks und Wirkens Petris einzurichten. Maßgeblich vorangetrieben hatte diese Idee schon seit längerem Prof. Ulrich Trottenberg, langjähriger Kollege Petris in der Institutsleitung.

Ein wesentlicher Teil des Projekts sollte die Erstellung einer Biographie sein. Ich bin sehr dankbar, dass mir diese Aufgabe angetragen wurde, weil ich so wenigstens einen Teil von dem weitergeben kann, was mir im Laufe der Jahre von meinem verehrten Lehrer und Freund Carl Adam zugeflossen ist. Durch viele lange Gespräche hat er mir mit großer Geduld seine radikale und visionäre Auffassung der Informatik erschlossen und mir den Weg zur eigenen Arbeit gewiesen. Auch nach seiner Pensionierung und sogar als er von Krankheit bereits schwer gezeichnet war, nahm er immer wieder Gelegenheiten wahr, seine Erkenntnisse mit mir zu teilen.

Die weltweite Verbreitung der nach ihm benannten Petrinetze hat eine eigene Dynamik entwickelt; für das Wachstum der Anwendungen und der Literatur ist kein Ende abzusehen. Das gibt mir hier die Möglichkeit, mich eher „ideengeschichtlich“ auf die Ursprünge und Hintergründe und insbesondere auch auf die Person Carl Adam Petris zu konzentrieren.

Das schließt auch Forschungsarbeiten und Ansätze ein, die in die Netztheorie eingegangen sind, selbst wenn man diese Grundlagen auf den ersten Blick im Einzelnen nicht immer erkennt. Wenn man Petrinetze als Pilzkörper auffasst, soll hier also eher das erzeugende Myzel betrachtet werden.

Den roten Faden bildet die Chronologie der Hauptperson, wobei aber immer dort, wo inhaltliche Zusammenhänge es nahelegen, natürlich der Erläuterung der Gedanken in ihren Wechselbeziehungen der Vorrang eingeräumt wird.

Bei der Vorbereitung und Ausarbeitung waren mir neben den Erinnerungen aus eigenen Gesprächen mit Carl Adam Petri auch immer die Beiträge seiner engen Mitarbeiter Hartmann Genrich und Wolfgang Reisig sehr nützlich. Besonders dankbar bin ich für die

vielen erhellenden persönlichen Hintergrundinformationen, die mir Carl Adams Sohn Tobias gegeben hat.

An schriftlichem Material habe ich mich ebenfalls ausgiebig auf Beiträge von Tobias Petri gestützt, der eine ganze CD mit Daten, Geschichten und Fotos seines Vaters zusammengestellt hat. Sehr nützlich war auch der Text einer längeren Laudatio, die ein Kollege und Freund Carl Adams, Lu Ruqian von der chinesischen Akademie der Wissenschaften, zu Petris 60. Geburtstag gehalten hat.

Als wichtigstes Material stand mir aber eine Sammlung von über 300 handgeschriebenen A4-Seiten zur Verfügung, aus der Petri möglicherweise selbst eine Autobiographie zusammenstellen wollte. Wo trotzdem noch Daten fehlten, habe ich ausgiebig von jenem Netz Gebrauch gemacht, an dessen Vorläufer, dem ARPA-Netz, Petri in den 1960er Jahren konstruktiv mitgearbeitet hat: dem Internet.

Das Buch wendet sich sowohl an informatisch vorgebildete Leser, mit oder ohne Kenntnisse auf dem Gebiet der Petrinetze, wie auch an „interessierte Laien“, bei denen die Lektüre möglicherweise die Lust an der Beschäftigung mit Netzen hervorruft; aber auch an Leser, die nur eine bemerkenswerte Persönlichkeit der Zeitgeschichte kennenlernen möchten. Der Text ist so angelegt, dass Überspringen der formalen Einzelheiten das Gesamtverständnis möglichst wenig beeinträchtigt.

Für eine weitergehende Beschäftigung mit Leben und Werk Petris sei noch erwähnt, dass Anfragen nach der oben genannten CD an ca-petri@t-online.de gerichtet werden können. Tobias Petri hat auch freundlicherweise dem Deutschen Museum in München den Nachlass seines Vaters übertragen, wo dieser akribisch gesichtet, geordnet und archiviert wurde, und nun interessierten Forschern zur Verfügung steht. Dort befindet Petri sich in bester Gesellschaft u.a. mit Ernst Mach und nicht zuletzt Konrad Zuse.

Für Anregungen und Anmerkungen bedanke ich mich bei Tobias Petri, bei Wolfgang Reisig von der Humboldt-Universität Berlin sowie bei der Diplom-Architektin Cornelia Jung, die mich durch kritisches Hinterfragen immer wieder zu allgemeinverständlicheren Formulierungen gedrängt hat. Tobias Petri bin ich auch deshalb zu Dank verpflichtet, weil er freundlicherweise die Verwendung von Zeichnungen und Fotos aus dem dem Privatarchiv seines Vaters gestattet hat. Wolfgang Reisig hat die Veröffentlichung tatkräftig unterstützt, indem er u.a. den Kontakt zum Springer-Verlag hergestellt hat. Dafür bin ich ihm sehr dankbar. Schließlich möchte ich mich bei allen Beteiligten im Springer-Verlag und insbesondere bei Frau Dorothea Glaunsinger für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit bedanken.

Sankt Augustin, im Juni 2013

Einar Smith

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kindheit und Jugend	9
2.1	Vorschulalter	10
2.2	Machtergreifung	11
2.3	Volksschule	12
2.4	Gymnasium	13
2.5	Begegnung mit der Erkenntnistheorie	13
2.6	Naturwissenschaften	14
2.7	Flakhelfer	16
2.8	Luftwaffe	17
2.9	Kriegsgefangenschaft	18
3	Studium, Berufliche Anfänge und Familiengründung	19
3.1	Abitur, die Dritte!	20
3.2	Studium	21
3.3	Rechenzentrum Hannover	21
3.4	Familie	23
3.5	Bonn	26
4	Promotion mit Automaten	27
4.1	Kommunikation mit Automaten	28
4.2	Alternative Ansätze	34
4.3	Wirkung der Dissertation	35
5	Reifejahre	37
5.1	Asynchroner Informationsfluss	37
5.2	Rechenzentrum Bonn	38
5.3	Israel	39
5.4	Amerika	40
5.5	Physikalischer Determinismus	42
5.6	Reversible Logik	44

6	GMD – Heimat der Petrinetze	51
6.1	Bedingungs-Ereignis-Systeme	53
6.2	Konfusion	54
6.3	Kontakt	60
6.4	Synchronieabstand	62
6.5	Enlogische Struktur	63
6.6	Stellen-Transitions-Netze	64
6.7	Verbreitung	66
7	Netzfaltungen, Morphismen und Topologie	69
7.1	Faltungen	69
7.2	Netz-Topologie	72
7.3	Petri und Zuse	73
8	Nichtsequentielle Prozesse und Concurrency-Theorie	77
8.1	Signalräume	78
8.2	Diskrete Dichte	80
8.3	Diskrete Vollständigkeit	84
8.4	Kombinatorische Mathematik	87
9	Kommunikationsdisziplinen	89
9.1	Die Disziplinen	91
9.2	Kanal-Instanz-Netze	92
10	Theorie des Messens	93
10.1	Klassische Auffassung	94
10.2	Petris Ansatz	94
10.3	Empirische Indifferenz	95
10.4	Referenzskalen	97
10.5	Petris Doppelskala	99
10.6	Konflikt und Konfusion	100
10.7	Die zwei Wurzeln der Concurrency-Theorie	100
10.8	Vollständige K-dichte Messskalen	101
10.9	Rückwirkungen der Messordnungen auf Prozesse	102
11	Die Erfolgsjahre	105
11.1	Weitere Institutsaktivitäten	109
11.2	Zeit und Stochastik	110
11.3	Advanced Course	111
11.4	Ehrungen	111
11.5	Werner-von-Siemens-Ring	112
11.6	Weitere Ehrungen	113

12	Die späten Jahre	115
12.1	Rentner	116
12.2	Netztheoretische Grundlagen der Physik	117
12.3	Formale Pragmatik	118
12.4	Abschließende Bemerkungen	120
Literatur		123
Sachverzeichnis		125

Petrinetze sind ein weltweit in verschiedenen Anwendungsgebieten anzutreffendes Modell verteilter Systeme, so im Bankwesen, in der Ökonomie, Telekommunikation, Workflow-Management, Konfliktlösung, Prozess-Steuerung, Biochemie und System-Biologie. Durch ihre äußerst einfachen Grundsätze und ihre graphische Ausdrucksweise machen sie komplizierte Zusammenhänge auch dem Nicht-Fachmann zugänglich und bieten zugleich tiefgehende mathematische Analysemethoden an.

Weniger bekannt ist, dass der Begründer der Netzmodellierung, Carl Adam Petri, die Arbeiten an den Netzen maßgeblich im Rahmen seiner Tätigkeit in der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) in Sankt Augustin bei Bonn vorangetrieben hat. Petris Entwicklung, sein Werk und Wirken bis zu seinem Abschied von der GMD aus Altersgründen – und auch darüber hinaus – sind Gegenstand der vorliegenden Biographie.

Vom Leser werden keine Vorkenntnisse über Petrinetze erwartet, aber das Verständnis der Grundbegriffe erleichtert natürlich den Zugang. Die sollen in dem vorliegenden einleitenden Kapitel erläutert werden. Wie weit? Um mit einem der Lieblingspoeten Petris, Bob Dylan, zu sprechen: „Nur so weit, dass ich sagen kann, ich wäre da gewesen.“

Petrinetze Die Grundidee der Petrinetze ist sehr einfach: Ein Netz besteht aus *Stellen* (dargestellt durch Kreise), auf denen durch Markierung ein möglicher Zustand als *vorliegend* angezeigt werden kann, und *Transitionen* (dargestellt durch Kästchen), die eine Veränderung des Zustands erlauben. Je nach Zusammenhang spricht man statt „Zustand“ oft auch von „Bedingung“. Von einer Bedingung sagt man auch eher, dass sie *erfüllt* ist als dass sie vorliegt. Statt von „Transition“ spricht man auch oft von „Ereignis“.

Beispiel

Abbildung 1.1a zeigt eine Situation, bei der eine Lampe ausgeschaltet ist, ausgedrückt durch die Marke auf der Stelle „aus“. Die Transition „geht an“ ist *aktiviert*, weil die Eingangsstelle markiert ist. Durch den *Eintritt* der Transition wird die Marke entfernt, und stattdessen die Ausgangsstelle „an“ markiert.



Abb. 1.1 a zeigt die Situation vor Eintritt der Transition „geht an“, b das Resultat

Abb. 1.2 Fiat lux! Zeichnung
von C. A. Petri



Abbildung 1.2 zeigt Petris Sohn Tobias bei der Beobachtung des Systems in Abb. 1.1.

In dem obigen Beispiel hat die Transition „geht an“ nur *eine* Eingangs- und *eine* Ausgangsstelle. Die Leistungsfähigkeit der Netze erwächst aber daraus, dass es eben auch mehrere sein können. Allgemein gilt: Für die *Aktivierung* einer Transition ist erforderlich, dass *alle* Eingangsstellen markiert sind. Die Transition zieht dann die Marken von den Eingangsstellen ab und markiert stattdessen alle Ausgangsstellen.

Beispiel

In Abb. 1.3a ist die Transition A aktiviert, weil beide Eingangsbedingungen a und b erfüllt sind. (b) zeigt das Resultat nach Eintritt von A. Jetzt sind die beiden Ausgangsstellen c und d markiert. Die Transition B in (c) ist nicht aktiviert, weil zwar a erfüllt ist, nicht aber b.

Nebenläufigkeit, Sequenz und Konflikt Das wesentliche Merkmal von Petris Ansatz ist es, von *Nebenläufigkeit* als Grundphänomen auszugehen. Betrachten wir ein typisches Beispiel.

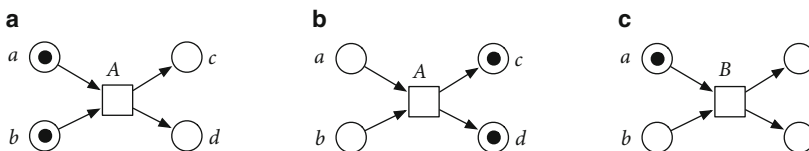


Abb. 1.3 In a ist A aktiviert. Eintritt erzeugt b. In c ist B nicht aktiviert

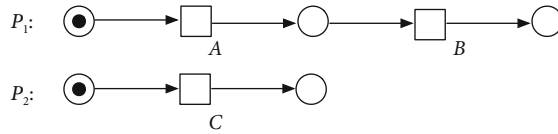
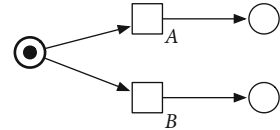


Abb. 1.4 Sequentielle Ausführung von A und B in P_1 . Dazu nebenläufige Ausführung C in P_2

Abb. 1.5 Konflikt. Eintritt einer der Transitionen A oder B hebt die Vorbedingung für die andere auf



Beispiel

Gegeben sei ein System aus zwei Prozessoren P_1 und P_2 wie in Abb. 1.4 dargestellt.

P_1 möge die Aktionen A und B *sequentiell* ausführen. Dadurch ist lokal eine strukturelle Beziehung „ B nach A “ festgelegt. Unabhängig davon möge in P_2 eine Aktion C ablaufen. Damit ist C *nebenläufig* zu sowohl A als auch zu B . Diese strukturelle Unabhängigkeit bleibt bestehen, auch wenn beispielsweise ein Beobachter eine zeitliche Reihenfolge A - C - B feststellt.

Mit größerer Distanz zwischen den Systemkomponenten verliert der Begriff der zeitlichen Reihenfolge an Realitätsgehalt, während Begriffe wie *strukturelle Abhängigkeit* bzw. *Unabhängigkeit* zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Neben Sequenz und Nebenläufigkeit gibt es noch eine dritte Möglichkeit der Beziehung zwischen Transitionen, den *Konflikt*, der dann vorliegt, wenn der Eintritt einer Transition eine andere deaktiviert.

Beispiel

Eine solche Situation ist in Abb. 1.5 dargestellt. Hier kann *entweder* A oder B eintreten, aber nicht beide. Tritt etwa A ein, ist die notwendige Vorbedingung für B nicht mehr erfüllt.

Die drei betrachteten Beziehungen zwischen Transitionen – Sequenz, Nebenläufigkeit und Konflikt – erfassen tatsächlich schon alle Fundamentalsituationen, die in Petrinetzen auftreten. Abbildung 1.6 zeigt eine Zeichnung Petris, in der er diese Phänomene illustriert. (Die *Likeness* spielt hier zunächst keine Rolle; sie wird in Kapitel 10 erläutert.) Nebenläufigkeit (englisch *concurrency*) ist dabei die *differentia specifica* zu klassischen Systemmodellen, die Abläufe grundsätzlich als entlang einer Zeitschiene angeordnet auffassen. Ein großer Teil der Arbeiten Petris befasst sich unter der Überschrift „Concurrency-Theorie“ mit den Grundlagen und Gesetzen der Nebenläufigkeit.

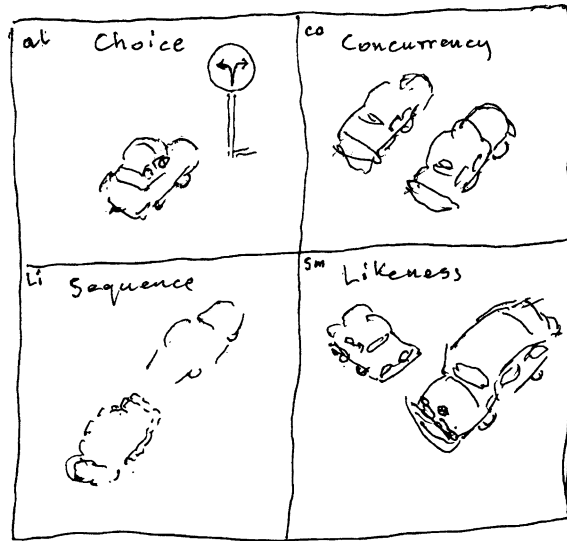
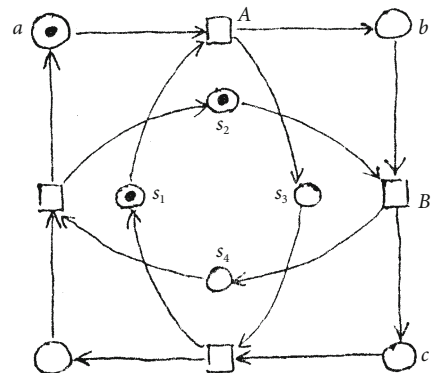


Abb. 1.6 Fundamentalsituationen. (*al* bezeichnet die Relation der Alternative, *co* Concurrency, *li* steht für *Line* zur Bezeichnung der Sequenz, *sm* für *Similarity*)

Abb. 1.7 Vier Jahreszeiten.
Handgezeichnete Skizze aus
[12]



Die vier Jahreszeiten Abbildung 1.7 zeigt ein etwas größeres Netz. Es ist unter der Bezeichnung *Vier Jahreszeiten* bekannt, weil man sich die Zustände an den Ecken eben als die vier Jahreszeiten vorstellen kann.

Petri hat dieses Netz aber auch verwendet, um einige Aspekte quantenmechanischer Oszillatoren zu erläutern. Die bekannteste Verwendung ist aber sicher diejenige als Logo verschiedener internationaler Konferenzen und Veröffentlichungen.

In der dargestellten Situation ist die Transition A aktiviert, weil die Eingangsstellen a und s_1 markiert sind. Tritt A ein, werden diese Marken entfernt und dafür die Stellen b und s_3 markiert. Die Marke auf s_2 wird durch diese Aktion nicht beeinflusst. In der neuen

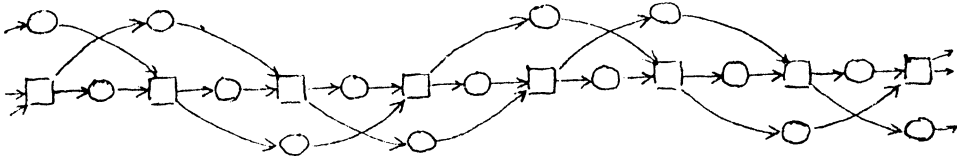
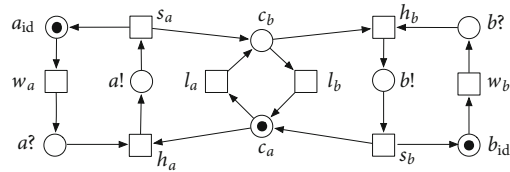


Abb. 1.8 Prozess des Jahreszeiten-Ablaufs

Abb. 1.9 Geregelter Zugriff der Akteure a und b auf einen gemeinsamen Drucker



Konstellation ist jetzt B aktiviert, und B kann die Markierung von b und s_2 in eine von c und s_4 überführen, wobei diesmal die Marke auf s_3 unbeeinflusst bleibt.

Abbildung 1.8 stellt einen sogenannten *Prozess* des Vier-Jahreszeiten-Systems dar. Man erhält ihn einfach durch Verschieben der Marken gemäß der Transitionsregel und einer entsprechenden Entfaltung des Netzes als Protokoll des Ablaufs.

Verteilter Zugriff Abschließend soll noch ein etwas umfangreicheres Beispiel vorgestellt werden, in dem alle bisher betrachteten Phänomene in einem für verteilte Systeme typischen Zusammenhang vorkommen. Abbildung 1.9 zeigt das Modell eines Systems, in dem zwei Akteure a und b geregelt auf eine gemeinsame Ressource, sagen wir einen Drucker, zugreifen.

Es muss gewährleistet sein, dass *jeweils* nur *ein* Akteur Zugriff hat, und andererseits, dass jeder, der Bedarf anmeldet, auch zum Zuge kommt. Die beiden Akteure befinden sich gerade in einem Zustand, in dem sie den Drucker nicht benötigen, dargestellt durch die Marken auf den Stellen a_{id} und b_{id} (Die Kennzeichnung „id“ steht für „idle“, englisch für untätig). In dieser Situation kann z. B. a seinen Bedarf anmelden. Dies wird dargestellt durch Eintritt von w_a , wonach dann die Bedingung $a?$ erfüllt wird (graphisch dargestellt durch Verschieben der Marke).

Die Druckersteuerung verfügt über einen Mechanismus, mit dem sie abwechselnd den Bedarf der Akteure abfragt. Dies ist dargestellt durch den inneren Kreis $c_a-l_a-c_b-l_b$. Die Marke auf c_a zeigt, dass Akteur a an der Reihe ist. Damit ist jetzt h_a aktiviert. Eintritt von h_a zieht die beiden Eingangsmarken ab und legt eine Marke auf $a!$, womit die exklusive Nutzung für a gekennzeichnet ist. Die Transition s_a beendet die Nutzung; a kehrt in den Zustand „idle“ zurück, c_b erhält eine Marke, und der Drucker steht somit für Akteur b zur Verfügung.

Die weiteren Details des Modells brauchen hier nicht beleuchtet zu werden. Es sollte ja lediglich zur Illustration der Grundphänomene in Netzen dienen. Der Leser sei ermutigt, Situationen der Nebenläufigkeit, Sequenz und Konflikt zu identifizieren.

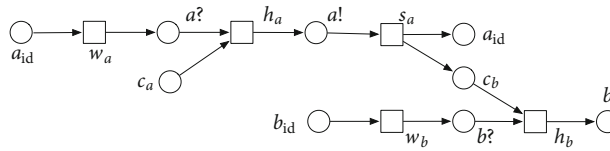


Abb. 1.10 Nichtsequentieller Prozess des Systems in Abb. 1.9

Abb. 1.11 Ein interaktives Brettspiel



Abbildung 1.10 illustriert einen möglichen Ablauf des Systems. Formal handelt es sich dabei um einen sogenannten *nichtsequentiellen Prozess*. Nebenläufigkeit und strukturelle Abhängigkeit spiegeln sich in der Prozess-Struktur wider. Konflikte erscheinen in Prozessen nicht, da ja von einem Konflikt in einem Ablauf nur *ein* Zweig vorkommt. Marken werden in einer Prozess-Darstellung nicht benötigt, weil jedes Vorkommen bereits für sich selbst steht. Bei dem hier betrachteten Prozess kommt zum Beispiel a_{id} *zwei* Mal vor.

Literatur Zu Petrinetzen gibt es weltweit eine schier unermessliche Anzahl von Veröffentlichungen, sowohl theoretischer als auch anwendungsorientierter Natur. Der in den 1980er Jahren unternommene Versuch, ein Gesamtverzeichnis aufzustellen, würde heute vermutlich jeden vernünftigen Rahmen sprengen.

Als Einstieg seien die Bücher [18, 19] von Wolfgang Reisig empfohlen, einem der engsten Mitarbeiter Petris.

Brettspiel 1997 wurde Petri der *Werner-von-Siemens-Ring* verliehen (Dazu mehr in Kapitel 11.5). Zu diesem Anlass entwickelte Hartmann Genrich in der GMD das Petri-Puzzle in Abb. 1.11, in dem verschiedene Aspekte der Netze spielerisch eingeübt werden konnten.

Aus der Spielanleitung: „Dieses Petri-Puzzle ist ein Spielzeug, an dem man sich erfreuen und etwas Neues erfahren kann. Es hat die Gestalt eines Brettspiels und handelt vom Zusammenspiel einer unbeschränkten Anzahl von Akteuren in einem System.“

Die Regeln betreffen das Markenspiel der Netze, enthalten aber bemerkenswerterweise auch Anleitungen dazu, „das Spielbrett *während* eines Spiels zu vergrößern oder zu verkleinern“. Auf die Idee hinter dieser letzteren Regel werden wir noch zurückkommen.

Leider war die Auflage des Puzzles so klein, dass es heute von Sammlern als Rarität gehütet wird. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass es in absehbarer Zukunft als interaktives Spiel im Internet zur Verfügung gestellt werden kann.

Inhaltsverzeichnis

2.1 Vorschulalter 10

2.2 Machtergreifung 11

2.3 Volksschule 12

2.4 Gymnasium 13

2.5 Begegnung mit der Erkenntnistheorie 13

2.6 Naturwissenschaften 14

2.7 Flakhelfer 16

2.8 Luftwaffe 17

2.9 Kriegsgefangenschaft 18

Carl Adam Peter Petri wurde am 12. Juli 1926 in Leipzig geboren. Der Name Petri geht auf einen schwedischen Vorfahren Olof Pettersson (1493–1552) zurück, der seinen Namen zu Olaus Petri latinisierte. Olaus Petri gilt als der bedeutendste Wegbereiter der protestantischen Reformation in Schweden. Im 16. oder 17. Jahrhundert wanderte ein Zweig der Petri-Familie nach Deutschland aus. Viele der Vorfahren Carl Adams waren protestantische Pastoren in Norddeutschland. Aus der schwedischen Ahnenreihe erklärt sich auch die Schreibweise des Vornamens Carl mit C, die anders als in Deutschland in Schweden sehr geläufig ist.

Carl Adams Vater Max Petri (1888–1972) war ein gelehrter Mann. Nach einer klassischen Gymnasialbildung an der Thomasschule in Leipzig studierte er in Lausanne, Kiel und Leipzig Mathematik und wurde 1914 in Leipzig für eine Arbeit in Algebraischer Geometrie mit Auszeichnung promoviert. Er sprach mehrere Sprachen und beschäftigte sich ausgiebig mit vergleichender Sprachwissenschaft. Während des ersten Weltkriegs wirkte er als Dolmetscher an der russischen Front.

Die Mutter Elfriede geb. Dietze (1896–1970) war Schneiderin. Sie entstammte einer Familie von Handwerkern aus Thüringen.

2.1 Vorschulalter

Carl Adam wuchs als Einzelkind auf. Die Familie bewohnte eine enge Dreizimmerwohnung in der Ludwigstraße 76 im Leipziger Vorort Volkmarsdorf. Die materiellen Verhältnisse waren bescheiden. Der Vater verdiente den Unterhalt für die Familie zeitweise durch Aushilfsarbeiten wie das Austragen von Postpaketen. Nach dem Tod seines Vaters Max sen. 1922 half er jahrelang im Betrieb seiner Mutter Luise Petri geb. Oehlkers (1863–1957) aus, die das bisher von ihrem Mann geleitete Handelsgeschäft für Bucheinbandstoffe weiterführte, ein in der Bücherstadt Leipzig nicht unbedeutender Wirtschaftszweig. Carl Adams Mutter übernahm Schneiderarbeiten und konnte so zum Unterhalt beitragen.

Einen weiteren, nicht unwesentlichen Grund für die karge finanzielle Lage erfuhr Carl Adam erst nach dem Tod des Vaters 1972: Dieser war zuvor bereits einmal verheiratet gewesen und musste noch Unterhalt für seine geschiedene Frau und eine gemeinsame Tochter bezahlen. Wie Tobias Petri vermutet, lag darin möglicherweise auch der Grund, warum er zunächst keine einträgliche Arbeit anstrebte, wenn er den Lohn doch immer hätte weiterreichen müssen. Irgendwann war es dann für eine Karriere zu spät. Ende der 30er Jahre wurde er Versicherungsmathematiker, im Krieg beriet er die Firma Rheinmetall bei der Beschaffung von Rechenmaschinen und führte numerische Berechnungen für das Militär aus. Nach dem Krieg wurde er Gymnasiallehrer für Mathematik, Russisch und alte Sprachen, wobei in Leipzig als Teil der sowjetischen Besatzungszone Russisch das wichtigste Fach wurde.

Intellektuelle Einflüsse Die intellektuelle Entwicklung des jungen Carl Adam war durch die schwierigen Verhältnisse aber nicht behindert. Leipzig verblieb bis zum Beginn des zweiten Weltkriegs eine vergleichsweise liberale und geistig aufgeschlossene Stadt. Ein großer Bekannten- und Freundeskreis des Vaters, bestehend aus Kaufleuten und Gelehrten aus aller Welt, konnte noch unbehelligt im Hause Petri verkehren. Die Hausbibliothek der Petris profitierte von einer eigentlich bedauerlichen Tatsache: Im Zuge der Weltwirtschaftskrise waren viele Buchbinder in finanzielle Schwierigkeiten geraten und bezahlten jetzt Bucheinbandstoffe mit Büchern statt mit Geld.

Abb. 2.1 Gelegentlich musste auch Carl Adam bei den Schneiderarbeiten seiner Mutter helfen. Zeichnung Petris um 2002



Carl Adam wurde so schon als Kind intensiv mit vielfältigen Gedanken, Sprachen und Büchern konfrontiert. Er hatte bereits mit drei Jahren lesen gelernt, und in dem geistigen Umfeld seines Vaters erwuchs insbesondere das Interesse für Physik und Chemie.

Von Seiten der Mutter waren die intellektuellen Einflüsse dagegen eher gering. Ihre Familie war von einfacher Bildung und von einer Mischung aus christlichem Glauben und volksnahe Aberglauben geprägt. In diesem Spannungsfeld zwischen Rationalem und Mystischem versuchte Carl Adam Erklärungen zu finden, so zum Beispiel für die Wunder des Alten Testaments. Dies ging offenbar so weit, dass bei seiner Mutter die Hoffnung entstand, der Sohn könne später Theologe werden. Allerdings entschied sich Carl Adam für die rationale Seite. Er erinnert sich: „Als ich vier war, bemerkte ich, dass meine Mutter ein ägyptisches Traumbuch benutzte, um das Familienleben zu regeln. Als das Regeln zur Bessenseheit wurde, warf ich das Buch in den Ofen und beobachtete, wie es verbrannte. Ich wurde dafür aufs schwerste getadelt, und belehrt, was Sünde ist. Da aber bald danach mein Vater lächelte, beruhigte ich mich wieder.“

Diese Episode sollte aber nicht ohne Folgen bleiben: „So kam es, dass ich im Alter von fünf Freuds populäre Werke über Träume, über ‚Fehlleistungen‘ und über Witze las – natürlich heimlich. Ich war tief bewegt und bekam Angst vor den Erwachsenen, weil sie anscheinend tief durch mich durchblicken konnten.“

Dieses Unbehagen gegenüber der Psychologie ist sicher weit verbreitet, aber im Fall Carl Adam hatte es eine bemerkenswerte Konsequenz. Er erinnert sich: „Mit knapp sechs wurde ich einem Einschulungstest unterzogen. Ich bestand den ersten Test nicht, und wurde wegen unzureichender Reife zurückgewiesen. Mir war ein quadratisches Stück Glanzpapier gezeigt worden, und der Direktor hatte gefragt, was ich darüber sagen könnte. Ich befürchtete eine psychologische Falle, und glaubte nicht, dass ihn eine direkte Antwort befriedigen könnte. Ich hatte die Situation pragmatisch so bewertet, dass mein geringer Status vor allem Höflichkeit erforderte. Daher war meine Antwort: ‚Sehr schön‘. So gewann ich ein volles Jahr meines Lebens zum Spielen und Lesen.“

2.2 Machtergreifung

Am 30. Januar 1933 wurde Adolf Hitler zum Reichskanzler ernannt. Am 23. März wurde das sogenannte Ermächtigungsgesetz erlassen, das die nationalsozialistische Diktatur etablierte. In einer Volksabstimmung ließ Hitler sich am 19. August 1934 seine absolute Macht zusätzlich durch Volkswillen „bestätigen“. „Der Führer ruft dich! So tue Deine Pflicht“ hieß es auf den Wahlplakaten. Um Repressalien zu vermeiden, gingen die Petris zur Abstimmung, um tätliche Angriffe des Nazi-Mobs zu vermeiden nahmen sie den kleinen Carl Adam mit, dem sie eine große „Ja“-Plakette angeheftet hatten.

Das eine war die scheinbare öffentliche Zustimmung, das andere die private Ablehnung, die sich darin äußerte, dass man sich insgeheim über die Machthaber lustig machte. Zu Hause hatte die Familie einen sprechenden Papagei und einen Kanarienvogel, denen sie



Abb. 2.2 Der kleine Carl Adam, rechts mit Vater



Abb. 2.3 Carl Adam mit Ja-Plakette. Zeichnung Petris um 2002

die Namen Dölfi und Joseph gegeben hatten, in Anspielung auf Adolf Hitler und Joseph Goebbels. Zum Glück ist das nie den falschen Leuten zu Ohren gekommen.

2.3 Volksschule

Mit sieben wurde Carl Adam dann 1933 eingeschult. Er erwies sich als hochbegabter Schüler, so dass sich der Schulleiter für seine anfängliche Fehleinschätzung entschuldigte und ihn ein Jahr überspringen ließ. Wer Petri kannte wird bestätigen können, dass dem Direktor

im Grunde kein Vorwurf zu machen war. Auch im späteren Leben waren Petris Aussagen häufig von der Art, dass der Zuhörer nicht wusste, ob es sich um eine triviale Bemerkung handelte oder ob sich dahinter eine tiefe Erkenntnis verbarg.

2.4 Gymnasium

Nach der Grundschule kam das Gymnasium. Wie vor ihm bereits sein Vater wurde Carl Adam an der berühmt-ehrwürdigen Thomasschule angenommen, ein humanistisch-altsprachlich und musisch geprägtes Gymnasium. Es war diese Thomasschule, an der einst Johann Sebastian Bach als Kantor gewirkt hatte. Bei der Aufnahmeprüfung kam ihm zugute, dass er bereits einige Lateinkenntnisse vorweisen konnte. Die Prüfung bestand auch aus einem musikalischen Teil. Da wirkte sich positiv aus, dass Carl Adam bereits Geige, Klavier und Flöte spielte. Neben Instrumentenkenntnissen und einer guten Stimme war es aber auch erforderlich, eine kurze Tonfolge ohne Zusammenhang, die nur einmal auf dem Klavier vorgespielt wurde, korrekt nachzusingen. Auch dies gelang.

Es blieb die Frage des Schulgeldes, das die Familie nicht hätte aufbringen können. Carl Adam gehörte aber zu den drei besten Schülern seines Jahrgangs und erhielt daher im Januar 1936 ein Stipendium der Stadt Leipzig.

2.5 Begegnung mit der Erkenntnistheorie

Zur Belohnung schenkte ihm sein Vater ein 400 Seiten starkes Buch *Ergebnisse und Probleme der Naturwissenschaften* von dem Physiker und Naturphilosophen Bernhard Bavink, das möglicherweise aus der Konkursmasse eines insolventen Buchdruckers stammte. Carl Adam verschlang das Buch (zumal es, wie er später betonte, erfreulicherweise so gut wie keine Mathematik enthielt). Er las es mehrmals, das neue Schuljahr am Gymnasium begann erst nach Ostern.

Eine Aussage Bavinks machte ihm allerdings schwer zu schaffen, nämlich die, dass das Selbstbewusstsein (also die Erkenntnis des eigenen Ichs, der eigenen Persönlichkeit) keiner ernsthaften wissenschaftlichen Analyse zugänglich sei, sondern nur der eigenen Introspektion. Carl Adam war empört: Hatte nicht gerade Freud weit mehr als nur Introspektion angeboten? Hatten die großen Philosophen vergebens gelehrt? Hatte Bavink Heisenberg nicht verstanden? Carl Adam beschloss, dass es nun an ihm war, die Rätsel des Selbstbewusstseins zu lösen. Laut einer späteren Aufzeichnung argumentierte er etwa wie folgt:

Meine einfache Antwort war, dass mein Selbstbewusstsein nicht nur mir allein gehörte, und daher nicht durch Analyse meiner Gehirnaktivität beobachtet werden konnte. Ich sah, dass, wenn ich allein auf der Welt wäre, ich nicht ein geistiges Bild meines Ichs erzeugen könnte. Ich müsste es von anderen Menschen *gleichartig wie ich* übernehmen. Nur diese könnten ein mentales Bild von mir erzeugen, so wie ich von ihnen. Ich dachte, dass diese gegenseitigen Abbildungen ein riesiges Netz erzeugen würden, das die ganze Weltgeschich-

te und alle Menschen wie auch mich selbst einschließen würde. Dieses Netz verband alle Bewusstseine, es war selbst das Bewusstsein. Davon war ich völlig überzeugt. Dann stellte ich fest, dass mein Bild von anderen nur unvollständig war, nur Projektionen, die viele Details ausließen. Betrachtete ich nun mein eigenes Bild in Anderen – was dann zu der einzig möglichen Art des Bildes von mir selbst führte – so würde dies dann doppelt ungenau, erst durch die Anderen verfälscht und dann noch einmal durch mich. Und das war das Ende der Geschichte. Diese Einsicht stimmte mich sehr traurig.

Er fasste seine Erkenntnis in dem Gesetz zusammen: Ein Teil des Universums kann kein präzises vollständiges Bild in einem anderen Teil besitzen.

Bemerkenswert ist, dass in dieser Argumentation sowohl Elemente der Hegelschen Philosophie anklingen, als auch solche der Unendlichkeitsbetrachtungen der modernen mathematischen Mengenlehre.

2.6 Naturwissenschaften

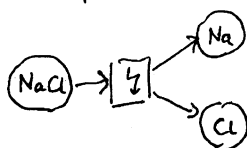
Seine schulischen Leistungen am Gymnasium waren durchweg gut. Latein und Griechisch machten ihm keine Schwierigkeiten. In der Unterstufe war er Ersatzsänger im berühmten Thomanerchor. Besonders fiel aber sein naturwissenschaftliches Interesse und Talent auf. Einer der Lehrer verschaffte ihm Zugang zur Leipziger Nationalbibliothek, wo auch nach der durch die Nazis veranlassten Bücherverbrennung 1933 die Werke von jüdischen Autoren noch verfügbar waren. Insbesondere Einsteins Ideen über Relativität von Zeit und Raum, Gleichzeitigkeit und Kausalität taten es ihm an.

Chemie Von einem Freund seines Vaters, der Direktor und Eigentümer einer gut ausgestatteten Privatschule gewesen war, die von den Nazis zwangsweise geschlossen wurde, bekam er einige Geräte und Chemikalien aus dem Schullabor. Zu Hause konnte er damit chemische Reaktionen prüfen, Kristalle züchten und mit einem aus dem häuslichen Gasherd abgezweigten Bunsenbrenner Glasstäbe auseinanderziehen, so dass daraus Glashaare von definierter Biegsamkeit entstanden. Damit konstruierte er sich eine eigene Mikrogrammwaage, mit der er über Jahre arbeiten konnte.

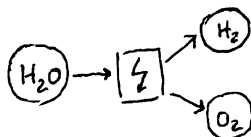
Seine schulischen Leistungen waren gut – *außer in Leibesübungen*. 1938 wurden sie mit Mangelhaft bewertet, ein Jahr später ein wenig besser mit Ausreichend. Für das NS-Regime hatte aber insbesondere im Hinblick auf den kommenden Krieg körperliche Ertüchtigung höchsten Stellenwert. Im Spätsommer 1939 schickte man Carl Adam zur Förderung seiner sportlichen Leistungen in ein Ferienlager. Es scheint aber, dass ihn auch hier die *mens sana* mehr interessierte als ein *corpus sanum*. Auf dem Innenumschlag eines mitgebrachten Buchs über organische Chemie skizzierte er sein Wissen und Verständnis von chemischen Substanzen und Reaktionen. Später erinnert er sich, dass er dazu eine graphische Darstellungsform entwickelte, die den Petrinetzen nahekam.

Allerdings störte ihn, dass er sein Wissen über Edalgase, die keine chemischen Reaktionen einzugehen schienen, nicht in dieser Sprache darstellen konnte. Jahre später kam er

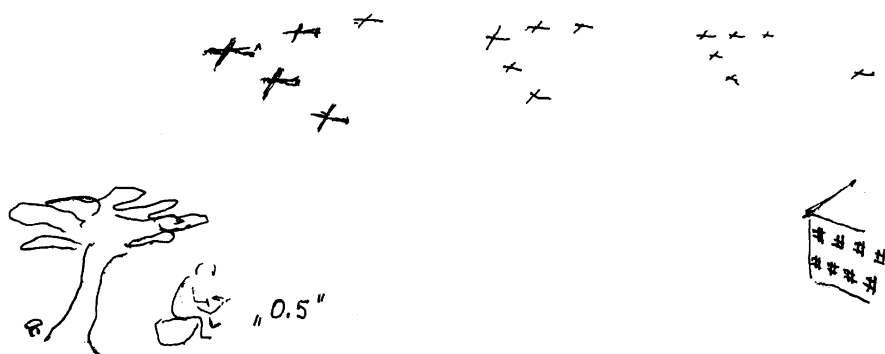
It had seemed so simple:



But now I had



Something was wrong. But this experiment I had done myself, taking the names from the books. I had forgotten to measure Quantity! I quickly wrote 0.5 to one of the arrows, and was saved



I was depressed that War had begun, less so, that I had used a Fraction.

Abb. 2.4 Handschriftliche Notiz, vermutlich Anfang 2002

immer wieder auf die darin enthaltene allgemeinere Grundfrage zurück: Wie funktioniert die chemische Katalyse? Ist der Katalysator nur eine Nebenbedingung einer Reaktion, oder geht er in sie ein und wird nachträglich wiederhergestellt? Leider konnte er seine Darstellung nicht mehr zu Ende bringen. Zum einen reichte der Platz auf dem Innenumschlag des Buches nicht aus. (Möglicherweise hat er darüber ein wenig geschmunzelt, weil es dem großen Mathematiker Fermat ja auch einmal ähnlich gegangen war.) Zum anderen begann am 1. September der Krieg. Das Ferienlager wurde sofort geschlossen und Carl Adam nach Hause geschickt. Über den Verbleib des Buches ist leider nichts bekannt. Abbildung [2.4](#)

zeigt eine später aufgezeichnete Erinnerung Petris an seine chemischen Gedankenexperimente bei Kriegsbeginn im Ferienlager.

Physik 1941 führte Carl Adam sein (wie er es nannte) erstes wissenschaftliches Experiment durch. Er wollte wissen, ob man ein einzelnes Photon beobachten kann. Er nahm einen selbstleuchtenden Zeiger aus einer Uhr und schloss ihn in eine Schublade ein. Basierend auf der Planckschen Konstante $\hbar$ und der Wellenlänge des von dem Zeiger emittierten Lichts, rechnete er aus, wie lange der Zeiger im Dunkeln verbleiben musste, bevor das große Ereignis – das vereinzelte Aufleuchten – eintreten konnte. Durch die wegen des Krieges verordnete Verdunkelung bestand keine Gefahr, dass das Experiment durch Streulicht beeinflusst werden würde.

Das Resultat schilderte er später so: „Ich bewies zu meiner vollständigen eigenen Zufriedenheit, dass meine Augen einzelne Photonen beobachten konnten, aber ich wurde von meinem Vater und meinen Lehrern ausgelacht, als ich ihnen davon erzählte.“ Mit dem Fahrrad fuhr er zur Wohnung von Werner Heisenberg, der damals an der Universität Leipzig lehrte, um ihm von dem Experiment zu berichten. Heisenberg war aber nicht zu Hause, und eine spätere Gelegenheit ergab sich nicht, da Heisenberg bald darauf nach Berlin ging.

Vierzig Jahre später war Petri als Gutachter bei einer Kommission eingeladen, die über die Einrichtung eines Forschungsinstituts für Neurologie entscheiden sollte. (Das Institut wollte Computer einsetzen, und auf diesem Gebiet hatte Petri sich zwischenzeitlich einen Namen gemacht.) Er fragte einen der Neurologie-Spezialisten, ob das menschliche Auge tatsächlich einzelne Photonen unterscheiden könne. Dieser sagte ihm, das sei die Grundlage ihrer täglichen Arbeit. Petri erinnert sich: „Ich war fast zu Tränen gerührt, und habe die Institutsgründung auf das entschiedenste befürwortet.“

2.7 Flakhelfer

Im Alter von 16 wurde Carl Adam 1942 als Flakhelfer zur Luftverteidigung herangezogen.

Das gab ihm Anlass, sich über die Präzision von Messungen und die damit verbundene Verantwortung Gedanken zu machen, weil bei nachlässigem oder falschem Einstellen der Zielvorrichtungen mit ernststen Konsequenzen für die Schützen gedroht wurde. Die Offiziere mussten Höhe, Abstand und Geschwindigkeit der angreifenden Flugzeuge mit einfachen Mitteln bestimmen, daraus dann die entsprechenden Zielparameter berechnen und diese an die Schützen weitergeben. Wie aber konnten die eigentlichen Akteure zur Verantwortung gezogen werden, wenn ihre Anweisungen auf unexakten Beobachtungen und Folgerungen beruhten?

Allgemein gefragt: Wie müssen Messeinrichtungen konstruiert sein, so dass die Anwender auch tatsächlich die Verantwortung für die Konsequenzen aus den Ablesungen übernehmen können? Später sollte Petri diese Frage im Rahmen einer umfassenden praktisch begründeten Theorie des Messens wieder aufgreifen.



Abb. 2.5 Petri als Flakhelfer

2.8 Luftwaffe

1944 wurde Carl Adam, nach Ablegen eines Notabiturs, zum Kriegsdienst eingezogen. Aus Angst vor schweren Kriegsversehrungen und einem daraus resultierenden würdelosen Leben, das er damals bei vielen aus dem Feld zurückgekehrten Soldaten sah, bewarb er sich als Bomberpilot bei der Luftwaffe. Der Gedanke war, dass man bei einem solchen Einsatz zumindest eine klare Unterscheidung zwischen Leben und Tod zu erwarten hatte. Wegen der Knappheit der Piloten wurde er sogar zugelassen, obwohl er die dafür eigentlich verlangte politische Einstellung nicht aufweisen konnte.

In einem Brief an seinen Freund, Klassenkameraden und späteren Schwager Rudolf Wienhold witzelte er am 2. April 1944 aus dem Ausbildungslager Eger (heute Cheb in der Tschechischen Republik):

Lieber Rudolf!

Ich bin nun eine Woche Flieger, ätsch, und du nicht. Die Rekrutenzeit habe ich hinter mir und werde demnächst befördert. Urlaubsschein liegt schon auf der Schreibstube, Ritterkreuz ist schon beantragt. Wohnloch in Sibirien ist auch schon bestellt. (Zur Vorsicht außerdem ein Job als Dishwasher in USA gemanaged.)

Weiter unten wird er dann etwas nachdenklicher:

Wann ich ans Fliegen denken kann, weiß ich noch nicht im geringsten. Vielleicht noch diese Woche, vielleicht erst nächstes Jahr. Vielleicht überhaupt nicht.

Die letzte Möglichkeit erwies sich als die zutreffende. Wegen der Invasion der Alliierten in Frankreich am 6. Juni 1944 wurde er doch noch an die Front geschickt. Dort wurde er aber sehr bald von englischen Soldaten gefangen genommen und in ein Kriegsgefangenenlager nach England gebracht.

Eine Kriegsversehrung hatte er aber offenbar nicht vermeiden können. Sie bestand darin, dass er sich inzwischen das (Ketten-)Rauchen angewöhnt hatte, von dem er tatsächlich bis zu seinem Tode nicht mehr wegkam.

2.9 Kriegsgefangenschaft

Während der vierjährigen Gefangenschaft wurde Petri von den Engländern sehr anständig behandelt, was er ihnen immer hoch anrechnete. Das Lager verfügte über eine von Gönnern eingerichtete Bibliothek. Er erhielt Einzelunterricht von einem mitgefangenen Mathematiklehrer. Er durfte als Landvermesser bei der Planung des Zentrums einer neuem Vorstadt von Walsall in den West Midlands mitarbeiten. In dem Zusammenhang musste er anspruchsvolle vermessungstechnische Probleme lösen, zur Planung einer Umgehungsstraße beispielsweise die Anlage konzentrischer Ellipsen auf hügeligem Gelände (noch gut zu erkennen als *The Oval* mit geographischen Koordinaten $52^{\circ}28'52.86''\text{N}$, $1^{\circ}59'13.27''\text{W}$). Dies war die erste Anwendung seiner als Flakhelfer gewonnenen Erkenntnisse über das Messen.

Er konnte auch brieflichen Kontakt zu seinen Eltern aufnehmen. Von dem Taschengeld, das er verdiente, schickte er ihnen regelmäßig Schuhe, die sich dann im besetzten Nachkriegsdeutschland wieder zu Geld machen ließen.

Vermutlich 1948 konnte er in Birmingham eine englische Abiturprüfung ablegen, die eigentlich für englische Schüler des zweiten Bildungswegs gedacht war.

Im Dezember 1948 wurde Petri nach Deutschland entlassen.

Inhaltsverzeichnis

3.1 Abitur, die Dritte! 20

3.2 Studium 21

3.3 Rechenzentrum Hannover 21

3.4 Familie 23

3.5 Bonn 26

1949 wollte Petri in das normale Leben zurückkehren und ein Studium beginnen. Zu der Zeit hätte er in Leipzig als Teil der sowjetischen Besatzungszone, später DDR, wegen seiner Herkunft aus einer vermeintlich privilegierten Akademikerfamilie aber vermutlich keine Studienzulassung erhalten.



Abb. 3.1 Petri mit Eltern um 1950

Er beschloss nach Hannover zu gehen, wo er bei einem Onkel seines Vaters, Pastor Otto Oehlkers, in Hannover-Linden unterkam. Dessen Haus war zwar bereits mit aus dem Osten geflohener Verwandtschaft überbelegt, aber mit den Worten „Du stammst vom Reformator ab“ wurde Carl Adam dennoch aufgenommen. (Es war Oehlkers, der die Abstammung der Petris von dem schwedischen Reformator Olaus Petri festgestellt hatte.)

3.1 Abitur, die Dritte!

Bedauerlicherweise wurde weder sein deutsches Notabitur noch sein englisches Abitur als Reifezeugnis anerkannt. Er musste daher noch ein drittes machen. Zur Vorbereitung besuchte er Abendkurse. Dabei kam er auch, wie er sagt, das erste Mal mit klarer, verstehbarer Mathematik in Berührung. Er wurde unterrichtet von dem blinden Mathematiker Helmut Epheser, der damals an seiner Habilitation arbeitete und später in Hannover Professor für angewandte Mathematik wurde. Nach einem Jahr konnte er dann erfolgreich seine (diesmal tatsächlich letzte) Abiturprüfung ablegen.

Bemerkenswert ist ein Abiturvortrag, der vermutlich ein Teil der Prüfungsleistung im Fach Deutsch war. Im Jahr 1949 wurde in ganz Deutschland der 200. Geburtstag von Johann Wolfgang von Goethe gefeiert. Im Westen wie im Osten wurde versucht, das Werk Goethes in das eigene politische Weltbild einzubinden. Unbeeindruckt davon nahm Petri das Jubiläum zum Anlass, Goethes naturwissenschaftliche Forschungen zu hinterfragen. Er beginnt:

Meine Herren, ich möchte Ihnen heute über Goethes naturwissenschaftliche Forschungen berichten. Ich hätte mein Thema ebenso gut ... Goethes Schattenseite ... nennen können, denn ich möchte vorschlagen, daß wir uns hier einmal ganz unbelastet von dem Vorurteil, daß alles, was von Goethe ist, groß und gut sein muß, nur weil es eben von Goethe ist, mit seinen naturwissenschaftlichen – Studien, wie ich es hier einmal lieber nennen möchte, befassen.

Er will „das sonderbare Mißverhältnis“ klären, „das zwischen der überragenden Bedeutung Goethes für die Geisteswelt einerseits und der weitgehenden Bedeutungslosigkeit in der Naturwissenschaft andererseits“ besteht. Er erläutert das anhand der Farbenlehre, die Goethe selbst für sein größtes Werk hielt. Petri weist auf die bekannten Unzulänglichkeiten der Farbenlehre hin und diskutiert ausführlich Goethes Auseinandersetzung mit Newton. Er kommt zu dem Schluss, dass es Goethe nicht um Erkenntnis geht, sondern um „Harmonie“. Seinem rationalen Weltbild gemäß stellt sich Petri eindeutig auf die Seite Newtons, indem er feststellt, dass die wahre Harmonie, die Goethe eigentlich sucht, bereits in der eleganten mathematischen Beschreibung enthalten ist.

Der abschließende Teil illustriert nochmals deutlich, wie Petri schon in jungen Jahren bereit ist, auch weithin anerkannte Gedankengebäude und Autoritäten zu hinterfragen, ein Ansatz, der für sein ganzes späteres Wirken entscheidend sein wird:

Seine [Goethes] Irrtümer sind dadurch entstanden, daß er alles, was vor ihm war, verworfen hat – was sich kein ernsthafter Wissenschaftler leisten kann. Wir haben heute erkannt, daß

nicht Natur und Erkenntnis, sondern das Verhältnis von Natur und Kunst das Gebiet gewesen ist, auf dem er groß war. Mit einem Wort, die Farbenlehre ist physikalisch ganz sinnlos, künstlerisch aber sinnvoll. Goethe hat uns selbst bestätigt, daß er mit seiner Wissenschaft, philosophisch gesehen, nicht über die Alten, also über Aristoteles hinausgekommen ist. Deshalb möchte ich vorschlagen, daß wir seine wissenschaftlichen Werke wie alles Vergängliche nur als Gleichnisse betrachten, als Gleichnisse einer anderen Wirklichkeit, die wir heute psychologisch nennen. Das ist gar nicht so weit hergeholt, wenn wir bedenken, daß er sich in seiner Jugend sehr eingehend mit Mystik, Astrologie und den anderen sogenannten Geheimwissenschaften beschäftigt hat. Und wenn man dann außerdem noch für seine Irrtümer ein Auge zudrückt, dann kommt man erstens zu einem harmonischen Goethe-Bild, wie es so schön heißt, aber zweitens, was noch viel wertvoller ist, zu einem einfachen, unkomplizierten Verständnis für unseren großen Dichter.

3.2 Studium

Er erhielt sein Reifezeugnis und konnte sich 1950 endlich für ein Studium an der Technischen Hochschule Hannover (heute Leibniz-Universität) einschreiben. Doch in welchem Fach? Bisher hatte er Chemie favorisiert. Durch die Begegnung mit seinem Tutor Epheser war aber eben auch das Interesse an Mathematik erwacht. Er sah sich die beiden Institute an und ließ seine Nase entscheiden. Im chemischen Institut roch es überall nach Chemikalien. Das hatte er von seinem häuslichen Labor nicht so unangenehm in Erinnerung. Er entschied sich für Mathematik.

Während des Studiums nahm er eine Tätigkeit beim Niedersächsischen Landesamt für Statistik auf und arbeitete als Hilfsassistent an der TH. Er wurde mit der Abhaltung von Übungen zur Finanzmathematik und praktischer Mathematik betraut, und auch mit dem Unterricht der darstellenden Geometrie für Ingenieure und Architekten. Er erinnert sich: „Dadurch war ich das erste Mal gezwungen, meine Einsichten in das Messwesen zu artikulieren und meine Erfahrungen mit Anderen zu teilen.“

In der zweiten Hälfte des Studiums wurde er ab 1952 durch ein Stipendium der Studienstiftung des deutschen Volkes gefördert.

Im August 1956 legte er die Prüfung zum Diplom-Mathematiker ab. Der Titel der Diplomarbeit lautete: *Die Anwendung von Mittelwertmethoden zur numerischen Lösung von Eigenwertaufgaben bei Differentialgleichungen*. Die Arbeit ist ein Beispiel soliden mathematischen Handwerks, in Gedankengang und Methodik aber nicht unbedingt revolutionär.

3.3 Rechenzentrum Hannover

Die Diplomnote war aber gut genug, so dass ihm sein Lehrer Prof. Heinz Unger eine weitere Zusammenarbeit als Verwalter einer wissenschaftlichen Assistentenstelle anbot. Zu Petris Tätigkeiten gehörte u. a. die Betreuung des Rechenzentrums. Bereits 1955 war er für einige

Monate zur deutschen Niederlassung der Firma IBM entsandt worden, um die praktischen Anwendungen der damaligen Datenverarbeitung an einem Rechner IBM 650 zu erlernen.

Auf Veranlassung Petris und eines Kollegen Jürgen Esch wurde eine Maschine diesen Typs angeschafft; zu der Zeit eher ungewöhnlich, weil damals die meisten deutschen Universitäten mit Zuse-Rechnern vom Typ Z22 ausgestattet waren. Der Gedanke war, dass man sich mit einem IBM-Computer besser der internationalen Entwicklung anpassen konnte. Außerdem war auch das Programmangebot deutlich größer. Petri schrieb einige ausgeklügelte „Tabellenhilfsprogramme“, kleinere Routinen zum Hochfahren der Maschine u. ä., die jeweils auf eine einzelne Lochkarte passten.

Gleitkommaarithmetik 1957 erstellte Petri ein eigenes Programm zur Berechnung der Gleitkommaarithmetik auf der IBM 650. Gleitkommazahlen werden auf Rechnern zur Darstellung von rationalen Zahlen verwendet. Mathematisch handelt es sich bei den rationalen Zahlen um einen sogenannten *Körper*, bei dem eine Reihe nützlicher Regeln gelten, z. B. das Assoziativgesetz $a + (b + c) = (a + b) + c$. In der *Gleitkommaarithmetik*, bei der maschinenbedingt nur endliche Darstellungen möglich sind, gelten diese Regeln dagegen *nicht* uneingeschränkt. Bei einer 7-stelligen Darstellung ergibt sich für $a = 1234,567$, $b = 45,67834$, $c = 0,0004$ durch Rundung im Rechner beispielsweise $(a + b) + c = 1280,245 \neq 1280,246 = a + (b + c)$. Für Petri war diese Feststellung Anlass, langfristig eine eigenständige Endlichkeitsmathematik anzustreben, die direkt mit gegebenen endlichen Größen arbeitet, statt sie als unvollkommenes Abbild einer Unendlichkeitsmathematik aufzufassen. Damit baut er auf die schon in seinen Ansätzen zum Messwesen gewonnen Erkenntnisse auf. Er wird später immer wieder auf dieses Ziel zurückkommen.

Formale Pragmatik Es war auch bei der Arbeit im Rechenzentrum, dass er eine andere für sein weiteres Denken entscheidende Erkenntnis gewann. Er bemerkte, dass die Magnet-Bänder und Lochkarten eine spezielle Eigenschaft besitzen: Sie sind alle Träger von *Information*. Nachdem diese Information genutzt worden ist, verlieren die Träger ihre Bedeutung, obwohl sie sich physikalisch nicht verändert haben. Er begann sich für den pragmatischen Aspekt von Information zu interessieren, was später zu einem seiner Leitmotive wurde: die Entwicklung einer *formalen Pragmatik*. Mit Pragmatik ist hier nicht die umgangssprachliche Bedeutung der praktischen Nützlichkeit im Sinne von „auch mal fünf gerade sein lassen“ gemeint, sondern die Stufe oberhalb von Syntaktik und Semantik in der Wissenschaft der allgemeinen Semiotik. Neben der grammatikalischen Struktur von Kommunikation (Syntax) und der Bedeutung der verwendeten Sprachsymbole (Semantik) gehen in die Pragmatik auch die *Beziehungen* zwischen Symbolen und deren *Wirkung* auf die *beteiligten Personen* ein.

Petri hat oft behauptet, dass ihm in diesem Zusammenhang die graphische Notation seiner Netze eingefallen ist. Die Kreise seien der Form der Bänder entlehnt, die Kästchen der einer Rechenmaschine. Eine Marke auf einem Eingangskreis bedeutete, dass die auf dem Band befindliche Information noch nicht verarbeitet worden war, eine Marke auf ei-

nem Ausgangskreis, dass sie es war. Die Transition beschrieb somit die Veränderung des pragmatischen Status der Information.

Als letzte Tätigkeit in Hannover hielt Petri im Wintersemester 1958/59 im Rahmen eines Lehrauftrags einen Kurs über die Programmierung der IBM 650.

3.4 Familie

Weihnachten 1955 heiratete Petri seine Jugendfreundin Christel Wienhold aus Leipzig. Sie war die Schwester seines bereits erwähnten Klassenkameraden Rudolf Wienhold. Petri kannte sie, seit er zehn Jahre alt war.

Als die beiden noch verlobt waren, war sie als Fremdsprachenkorrespondentin und Dolmetscherin in Braunschweig beschäftigt. Sie lebte dort in einem Mädchenwohnheim. Herrenbesuche im Zimmer waren nicht erlaubt. Wenn sie ausgehen wollten, musste Petri vor der Tür warten um sie abzuholen. Da es keine Türklingel gab, hatten sie als Erkennungssignal einen Pfiff verabredet, den die jugendlichen Mitbewohnerinnen nicht korrekt nachahmen konnten, obwohl sie es immer wieder versuchten. Es handelte sich um das Thema von Beethovens Kanon *O Tobias* – man muss sehr genau hinhören, um zu erkennen, dass dieses nicht der gewöhnliche „Kuckuck-Kuckuck“-Ruf ist. Die musische Ausbildung der Thomasschule hatte sich ausgezahlt.

Ob das Werk aus Abb. 3.2 auch aus dieser Zeit stammt, ist nicht bekannt. Inhaltlich passt es zumindest sehr gut zu Petris damaliger Stimmung. (Eine andere Möglichkeit ist, dass das Stück auf das erste Lebewesen im Weltraum anspielt, den sowjetischen Hund Laika 1957.)

Auch die schriftliche Kommunikation der beiden nahm zuweilen eher ungewöhnliche Formen an. Möglicherweise um Porto zu sparen schickte Petri seiner Verlobten Briefe aus dem Lehrstuhl, auf offiziellem Briefpapier. Darin waren seine eigentlichen Mitteilungen in scheinbare Antworten auf unterstellte mathematische Anfragen eingebettet. Außerdem ist

Text und Musik: Carl Adam Petri

Die Wis-sen-schaft hat fest-ge-stellt, war- um der Hund den Mond an-bellt : Er

hat den Mond nur nach-ge- äfft, der hat zu-erst ge- kläfft.

Abb. 3.2 Komposition



Abb. 3.3 Links Heirat 1955, rechts Petri mit Sohn Tobias

natürlich zu vermuten, dass den beiden diese Art Versteckspiel und Persiflage gestelzter Ausdrucksweise ein schelmisches Vergnügen bereitere. Ein solches Schreiben – mit Ausgangsstempel vom 9. Juni 1955 – liegt noch vor. Vermeintlich beziehnend auf eine nicht weiter erläuterte mathematische Frage beginnt es:

Sehr geehrtes Fräulein Wienhold!

Der Lehrstuhl bedauert, Ihre geschätzte Frage nicht in vollem Umfang beantworten zu können. Wir bitten Sie, berücksichtigen zu wollen, daß die Untersuchungen über den von Ihnen angeschnittenen Problemkreis äußerst diffizil und noch in vollem Flusse sind. Auch dürfen Sie von den Bemühungen der Mathematiker um die Lüftung dieses Schleiers – besser gesagt, um die Lüftung wenigstens einer Gruppe von Zipfeln dieses Schleiersystems – nicht zu viel erwarten, obwohl, wie wir versichern können, diese Bemühungen einer verzweifelten Anstrengung gleichkommen. Zur Zeit beschäftigen sich – gerade an unserem Lehrstuhl – eine Reihe hervorragender Wissenschaftler mit diesen Aufgaben, nachdem uns – und das ist erfreulich – wertvolle Anregungen aus Laienkreisen zugegangen sind. – Wir müssen also bitten, die nachfolgenden Ausführungen unserer Spezialisten als ein vorläufiges, mit allem Vorbehalt weiteren Fortschritts der Wissenschaft aufzunehmendes Resultat zu betrachten, das allerdings – wie wir mit gutem Gewissen behaupten können – den gegenwärtigen Stand der Forschungen getreu widerspiegelt. Für unsere Bemühungen berechnen wir kein Honorar, hegen jedoch die Hoffnung auf Ihr Entgegenkommen bei passenden Gelegenheiten.

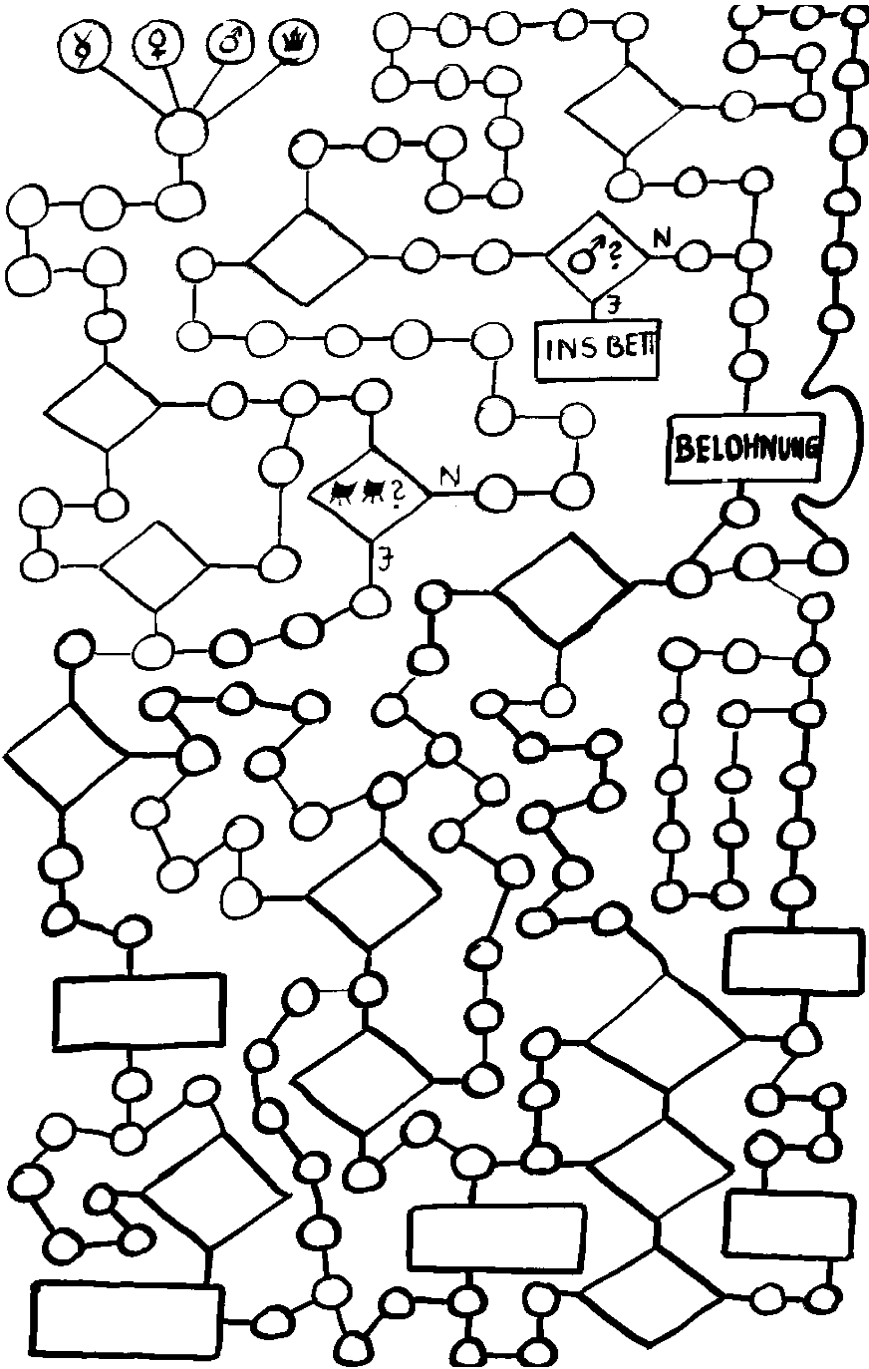


Abb. 3.4 Kindererziehung mit Flussdiagramm statt Netz

Nach einigen allgemein-spieltheoretischen Erörterungen, endet das Schreiben für Außenstehende nicht unbedingt nachvollziehbar so:

Weiterhin sind Spieler bekannt geworden, die das Schachspiel oder gewisse andere Spiele vorziehen; aber doch wohl nur deshalb, weil dabei jede – auch mittelbare – Beteiligung dritter Personen sich verbietet. Es handelt sich wahrscheinlich um kontaktschwache, asoziale und menschenfeindliche Naturen.

Mit dieser Feststellung sind wir jedoch in Gefahr, unsere wissenschaftliche Kompetenz zu überschreiten. Wir hoffen dennoch, Ihnen mit unseren Angaben gedient zu haben, und verbleiben

Ihr sehr ergebener Lehrstuhl für Darstellende Geometrie und Praktische Mathematik.
Technische Hochschule Hannover.

Zwei Jahre später, 1957, wurde ihr einziges Kind geboren. Es war ein Junge, dem die Eltern in Erinnerung an ihr Erkennungssignal den Namen Tobias gaben. Erst später entdeckten sie, dass der Name bereits früher in der Ahnenreihe vorkam.

In der Erziehung des Kindes kamen schon frühzeitig auch informatische Methoden zum Einsatz. Abbildung 3.4 zeigt ein von Petri entworfenes pädagogisches Spiel. Wie man sieht, benutzte er damals noch Flussdiagramme statt Netze.

3.5 Bonn

1958 folgte Petri Prof. Unger an die Universität Bonn, wo er 1959 zum wissenschaftlichen Assistenten ernannt wurde. Dort verlagerte er dann endgültig seinen Arbeitsschwerpunkt auf die von vielen damals noch abschätzig betrachtete „elektrische Mathematik“: Er hielt theoretisch orientierte Lehrveranstaltungen ab u. a. über Aufbau und Programmierung elektronischer Rechenanlagen, formale Sprachen sowie eher praktische Programmierkurse zu Fortran und Algol. Aus dieser Zeit liegt noch ein Skript zu einer Vorlesung *Formale Sprachen und ihre Übersetzung* vor, in der Petri am Beispiel der Sprache Algol 60 die allgemeinen Prinzipien der maschinellen Sprachübersetzung erläutert.

In diesem Spannungsfeld zwischen Theorie und Praxis erwuchs dann auch das Bewusstsein einer wachsenden Diskrepanz zwischen Verwendung von realen Rechnern auf der einen und ihren mathematischen Grundlagen auf der anderen Seite. Daraus entwickelte sich dann das Thema, das er in seiner Doktorarbeit behandeln sollte.

Inhaltsverzeichnis

4.1 Kommunikation mit Automaten 28

4.2 Alternative Ansätze 34

4.3 Wirkung der Dissertation 35

Petri promovierte 1962 an der Technischen Universität Darmstadt mit der Dissertationsschrift *Kommunikation mit Automaten*, die er ein Jahr zuvor eingereicht hatte. Erstgutachter war Prof. Alwin Walther, der in Darmstadt das Institut für Praktische Mathematik leitete. Er war einer der Pioniere der maschinellen Rechentechnik in Deutschland und damals Präsident der International Federation for Information Processing (IFIP). Zweitgutachter war Petris Lehrer Prof. Unger, selbst Schüler von Walther. Die abschließende mündliche Prüfung fand am 20. Juni 1962 statt.

Wie Petri sich erinnert, „fragte Walther nach der Mehrdeutigkeit des Titels der Arbeit: Meinte ich, dass Automaten *Partner* oder aber *Werkzeuge* der Kommunikation seien? Ich antwortete, dass, wenn ich in der Arbeit explizit von *Partner* gesprochen hätte, ich mich auch mit der damals herrschenden Turingschen Auffassung der künstlichen Intelligenz hätte auseinandersetzen müssen. Ich sei aber sicher, dass sich die Informations-Technologie bald so weit entwickeln würde, dass Rechner realistischer- und sinnvollerweise weit mehr als Werkzeuge der Kommunikation werden könnten. Ich hatte die Mehrdeutigkeit mit voller Absicht benutzt und freute mich, dass dies bemerkt worden war.“

Für die gelegentlich gehörte Annahme, in der Arbeit werde bereits die Kommunikation *zwischen Menschen* mit Hilfe von Automaten – im Sinne einer Vorwegnahme von Computernetzen – angedeutet, gibt es dagegen keine Belege.

Er bestand die Promotion mit Auszeichnung. Die Arbeit erhielt einen Preis für die beste Dissertation des Studienjahres 1961/62. Veröffentlicht wurde sie als Nr. 2 der Reihe der *Schriften des Rheinisch-westfälischen Instituts für instrumentelle Mathematik* der Universität



Abb. 4.1 Petri um 1963. Freude über die Promotion?

Bonn. (Die Nr. 1 der Schriftenreihe war eine 1961 erschienene Arbeit von Fritz Krückeberg über numerische Integration gewöhnlicher Differentialgleichungen. Krückeberg wurde später Geschäftsführer der GMD und Petris Kollege in der Institutsleitung.)

4.1 Kommunikation mit Automaten

In der Arbeit erörtert Petri die Unzulänglichkeiten der herkömmlichen Automatentheorie für die Beschreibung großer Rechnersysteme. Er schlägt einen Ansatz vor, der streng in Einklang mit den einschlägigen physikalischen Grundlagen steht. Entscheidend dabei ist, das Beschreibungsmodell aus kleinen asynchron interagierenden Aktionen aufzubauen, um so ein globales, für das ganze System geltendes Zeitmaß zu vermeiden. Hier kommen offenbar die Erkenntnisse zum Tragen, die Petri durch seine Beschäftigung mit der Einsteinschen Relativitätstheorie gewonnen hatte.

Mit *Automat* ist, wie in der theoretischen Informatik üblich, das abstrakte Modell einer Rechenmaschine gemeint. Unter *Kommunikation* versteht Petri „alle Erscheinungsformen des Informationsflusses“, hier spezifischer das Ein/Ausgabe-Verhalten, welches darin besteht, dass man der Maschine Folgen von Signalen vorlegt, die diese dann auswertet und mit entsprechenden Signalfolgen als Ausgabe reagiert.

Iterativ und rekursiv erklärte Ausdrücke Jede konkret gegebene Rechenmaschine entspricht sogar einem *endlichen* Automaten, der nur eine *beschränkte* Menge von Eingabe-

folgen unterscheiden kann. Ein endlicher Automat ist prinzipiell nur in der Lage, Mengen von Zeichenfolgen zu erkennen, die durch sogenannte *reguläre Ausdrücke* charakterisiert, oder – wie Petri es ausdrückt – die *iterativ erklärt* sind. Tatsächlich sind aber für die Kommunikation mit Automaten auch komplexere, sogenannte *rekursive* Ausdrucksformen erforderlich – etwa schon für die Überprüfung, ob arithmetische Terme korrekt geklammert sind, oder auch zur Beschreibung von Übersetzern für höhere Programmiersprachen in maschinen ausführbare Anweisungen.

Petri illustriert den Unterschied zwischen iterativ und rekursiv erklärten Zeichenfolgen anhand der beiden Mengen bestehend aus allen Folgen

- (1) $1 \dots 101 \dots 1$, die aus einer beliebigen Anzahl von 1en, gefolgt von einer 0, wieder gefolgt von einer beliebigen Anzahl von 1en, gebildet sind,

bzw. allen Folgen der Form

- (2) $1 \dots 101 \dots 1$, wobei jetzt aber im Unterschied zu (1) die hintere Teilfolge *genau so viele* 1en enthält wie die vordere.

Verwendet man den Iterationsoperator $*$ zur Kennzeichnung beliebiger Wiederholung, lassen sich die Folgen vom Typ (1) durch den regulären Ausdruck 1^*01^* beschreiben. Es ist auch sehr leicht, einen endlichen Automaten anzugeben, der gerade Eingabefolgen von diesem Typ akzeptiert: Ein solcher Automat, muss nur zwei Zustände annehmen können, einen *Anfangszustand* a und einen sogenannten *zulässigen Endzustand* e . Wird der Automat im Zustand a beispielsweise angesetzt auf die Eingabefolge 1011, liest er die erste 1 und bleibt im Zustand a . Jetzt liest er die 0 und geht in den Zustand e über. In diesem Zustand arbeitet er das erste Zeichen der Restfolge 11 ab, und bleibt im Zustand e . Schließlich erkennt er die letzte 1 und signalisiert durch Verbleib im zulässigen Endzustand e , dass die Zeichenkette akzeptiert worden ist.

Ganz anders ist der Fall bei Typ (2). Wenn die Folge ausreichend lang ist, kann sich ein gegebener Automat nicht mehr mit Hilfe seiner endlich vielen Zustände die Anzahl der ersten 1en merken, so dass auch ein Längenvergleich mit der zweiten 1er-Folge nicht möglich ist. Entsprechend gibt es *keinen* regulären Ausdruck, der gerade solche Eingabefolgen charakterisiert.

Die Folgen vom Typ (2) sind aber durch ein sogenanntes *rekursives* Regelsystem erzeugbar, bestehend z. B. aus den beiden Regeln $S \rightarrow 1S1$ und $S \rightarrow 0$. Beginnend mit dem Startsymbol S erzeugt man zunächst die Folge 1S1, ersetzt dann darin wieder S durch 1S1 und erhält so 11S11. Diese Prozedur kann nun beliebig fortgesetzt werden, bis die Erzeugung dann schließlich mit einer einmaligen Anwendung der zweiten Regel $S \rightarrow 0$ beendet wird.

Es ist klar, dass jede Folge vom Typ (2) insbesondere auch vom Typ (1) ist, aber die *schärfere Präzisierung* lässt sich eben nicht durch einen regulären Ausdruck formulieren. Letztlich ist ein Ausdrucksmittel umso stärker, je *feinere Unterscheidung* es zulässt, nicht wie große Mengen es ermöglicht.

Nun kann ein gegebener Automat sicher rekursive Ausdrücke *bis zu einer bestimmten Größe* verarbeiten. Bei Bedarf wird er dann erweitert, so dass er nun größere Ausdrücke verstehen kann. Eine Analogie zu dieser Vorgehensweise findet man z. B. im Übergang zu Maschinen mit größerem Adressbereich, von 8 Bit zu 16, zu 32 und jetzt auch 64 Bit.

Petris Postulate Diese Endlichkeit wurde jedoch in der Regel als praktische Limitierung gesehen, und, wie Petri kritisiert, „nicht als etwas, das selbst Teilhabe an der Theorie haben sollte.“ Nach seiner Ansicht kann aber eine angemessene Herangehensweise nur darin bestehen, entsprechende physikalische Gesetzmäßigkeiten als *Bedingungen* der Automatentheorie anzuerkennen und in die Theorie aufzunehmen. Er formuliert das im Sinne eines Manifests so:

Wir erkennen folgende Postulate an:

1. Es gibt eine obere Grenze für die Geschwindigkeit von Signalen.
Es gibt eine obere Grenze für die räumliche Dichte von Information.
2. Automaten von fester endlicher Größe können höchstens iterativ erklärte Klassen von Eingangsfolgen wahrnehmen.
3. Rekursiv erklärte Klassen ... können nur von Automaten unbeschränkter Größe wahrgenommen werden.
4. Damit ein Automat eine ... rekursive Aufgabe lösen kann, muß die Möglichkeit gegeben sein, dass er „auf Vorrat“ oder „bei Bedarf“ unbeschränkt erweitert werden kann.
5. Automaten, die im Sinne der Automatentheorie konzipiert werden, geraten nach endlich vielen Erweiterungsschritten in Widerspruch zu mindestens einem der genannten Postulate.

Die Tatsache, dass Signallaufzeiten mit der räumlichen Größe der Systeme zunehmen und daher spezielle Maßnahmen erfordern, wurde beispielsweise bereits bei einem der ersten „Supercomputer“, der Cray-1 aus dem Jahr 1976, berücksichtigt. Für die Konstruktion wurde eine Hufeisenform gewählt, durch die ein engeres Beieinanderliegen der Schaltkreise ermöglicht wurde, und so die Laufzeiten verringert werden konnten.

Aber auch die Reduzierung der Signallaufzeiten durch erhöhte Informationsdichte stößt an physikalische Grenzen. Theoretisch war man sich dieser Problematik durchaus bewusst. Petri verweist auf Vorschläge u. a. des Computer-Pioniers John von Neumann, das Automatenmodell durch *Verzögerungsglieder* zu ergänzen, um so der Verlangsamung bei Systemerweiterungen gerecht zu werden. Diese Ansätze waren aber nicht sehr erfolgreich, da schnell klar wurde, dass mit wachsenden Systemen auch die Kontrolle durch einen gemeinsamen Taktgeber schwierig wird, die Annahme einer gemeinsamen Zeit also nicht mehr aufrecht zu halten ist; im Gegenteil: Bei großen Systemen ist die Herstellung einer Gleichzeitigkeit nur durch aktive Synchronisation möglich. Der Gleichlauf von Uhren kann nur durch Kommunikation herbeigeführt werden.

Ein bekanntes Beispiel ist das inzwischen jedem geläufige *Global Positioning System* GPS. Die Entfernung zu den Satelliten wird durch die Laufzeit von Funksignalen bestimmt. Das setzt aber einen sehr genauen Uhrengleichlauf bei Sendern und Empfängern voraus, der eben immer wieder hergestellt werden muss.

Nach Petri muss man sich bei großen Systemen von der Vorstellung verabschieden, vom Gesamtzustand eines Systems zu einem Zeitpunkt t zu reden. Eine erste Forderung aus den Postulaten ist also, dass ein realitätsgetreues Modell von Rechensystemen von *asynchronen* Vorgängen ausgehen muss.

Asynchrone Schaltnetze Im Hauptteil der Dissertation spezifiziert Petri geeignete Schaltelemente und verknüpft diese zu asynchronen Schaltnetzen. Die Darstellung ist sehr technisch und zeigt noch nicht die Eleganz der späteren Beschreibung mit den typischen Petri-Netzen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Arbeit zwar oft zitiert, aber wenig gelesen wird. Petri selbst betont die „Willkürlichkeit aller Konstruktionen, ... die nicht etwa Schaltungsvorschläge, sondern vorläufige Beweismittel sind.“ An anderer Stelle spricht er später von den in der Dissertation verwendeten „earliest clumsy constructions“ [7].

Die Schaltelemente werden so gewählt, dass sowohl sie selbst als auch die aus ihnen aufgebauten Netze im Sinne der obigen Postulate physikalisch realisierbar sind. Insbesondere soll das Verhalten nicht von zeitlichen Annahmen abhängen.

Petri illustriert die Problematik anhand des klassischen *Und-Gatters*, bei dem logische Werte durch elektrische Spannungen dargestellt werden. Ein Und-Gatter hat zwei Eingänge und einen Ausgang. Wenn an beiden Eingängen ein Signal 1 anliegt – repräsentiert etwa durch eine Spannung von 5 Volt – soll auch der Ausgang zu 1 gesetzt werden, die Ausgangsspannung also ebenfalls 5 Volt erreichen. Das erfordert natürlich eine gewisse Zeit. Das Gesamtsystem muss von vornherein so entworfen sein, dass eine Stabilisierung innerhalb eines Taktzyklus erfolgen kann.

Im Gegensatz dazu verlangt Petri nur, dass ein Schaltelement schalten kann, *sobald alle Eingangsbedingungen erfüllt sind*, ohne dass irgendwelche Zeitannahmen notwendig sind.

Ein weiterer Unterschied zu klassischen Schaltelementen ist, dass durch das Schalten Eingangs- in Ausgangsbedingungen überführt werden, wobei die Eingangsbedingungen „konsumiert“ werden, danach also *nicht mehr vorliegen*. Für Petri ist diese Annahme von entscheidender Bedeutung, weil nur so die physikalische Realisierbarkeit auf allen Ebenen gewährleistet werden kann. Er erinnert etwa daran, dass auf der Ebene der Quantenmechanik bereits jede Beobachtung mit einer Zustandsänderung einhergeht. Auch die Überlegungen über chemische Katalysatoren, die er während seiner Schulzeit angestellt hat, spielen für diese Forderung an die Schaltelemente sicher eine Rolle. Auf höherer Ebene war diese Art des „destruktiven Lesens“ u. a. bekannt von den bis in die 1970er Jahre in Rechenmaschinen eingesetzten Ferritkernspeichern.

Zur formalen Beschreibung seiner Schaltnetze erweitert er die Sprache der regulären Ausdrücke um einen *Paralleloperator*, mit dem er Unabhängigkeit zwischen Teilnetzen spezifizieren kann. Dies ist ein Ansatz, wie er inzwischen auch in verschiedenen Modellen der Prozessalgebra vorkommt, aber auch in modernen Programmiersprachen zur Spezifikation von sogenannten *asynchronen Threads* benutzt wird.

Tatsächlich hatte Petri bereits 1959 auf einer Entwicklerkonferenz zur Programmiersprache Algol 60 vorgeschlagen, einen Paralleloperator in die Sprache aufzunehmen, konnte sich damit aber noch nicht durchsetzen.

Oder-Gatter Herkömmlicherweise stellt man sich Schaltkreise aus bestimmten logischen Gatter-Typen aufgebaut vor, wie etwa das bereits erwähnte Und-Gatter. Als erstes Anwendungsbeispiel seines Ansatzes zeigt Petri, wie ein weiteres wichtiges Gatter mit seinen Mitteln dargestellt werden kann, nämlich das *Oder-Gatter*.

Bemerkenswerterweise ist die Behandlung des Oder-Gatters wesentlich schwieriger als z. B. die des Und-Gatters. Eine Oder-Aussage ist wahr, wenn *eine* der beiden Bedingungen erfüllt ist, aber eben auch wenn *beide* zutreffen. Auf tiefster Ebene muss eine Schaltung, die ein solches Gatter nachbildet, aus *alternativen* Aktionen bestehen. In bestimmten Fällen kann es daher zu einem *Konflikt* kommen: Wenn zwei Aktionen aktiviert sind und sich die Eingabe teilen, steht nicht fest, welche zum Zuge kommt. Petri gibt eine aufwendige Konstruktion an, die diese Konflikte vermeiden soll. Abbildung 4.2 zeigt eine Übersicht. Der innere Aufbau der Module NA, NB und NC ist hier nicht dargestellt, aber ebenfalls nicht unmittelbar leicht nachvollziehbar.

Im Lichte neuerer Erkenntnis scheint es nicht unmöglich, dass sich in die Konstruktion ein subtiler Fehler eingeschlichen hat. Dazu später mehr.

Asynchrone Turingmaschine Ein großer Teil der Dissertation ist dem Nachweis gewidmet, dass der asynchrone Ansatz dieselbe Berechnungsmächtigkeit bietet wie konventionelle Modelle.

Konkret zeigt Petri, wie *Turingmaschinen* durch seine Schaltnetze aufgebaut werden können, um damit „das Enthaltensein der Theorie der synchronen Automaten in einer allgemeineren Theorie der Kommunikationsformen zu beweisen.“ In moderne Netz-Sprechweise übersetzt, gibt er an, wie das Verhalten von Turingmaschinen durch Einsatz von Bedingungs-Ereignis-Systemen vom Rang 2 nachgebildet werden kann, bei denen also jede Transition jeweils maximal zwei Ein- und Ausgangsbedingungen besitzt.

Die Turingmaschine ist ein Referenzmodell für Berechenbarkeit in dem Sinn, dass alles, was überhaupt mechanisch berechenbar ist, es bereits mit einer solchen Maschine ist. Kann man also nachweisen, dass ein Automatenmodell Turingmaschinen nachbilden kann, erbt es sozusagen auch die volle Berechnungsmächtigkeit.

Eine Turingmaschine besitzt eine *Kontrolleinheit*, die sich jeweils in einem von endlich vielen Zuständen befindet, und ein unbeschränktes in Felder unterteiltes Rechenband. Jedes Feld kann leer sein oder mit einem Symbol 1 beschriftet. Zu jedem Zeitpunkt wird genau ein Feld, das *Arbeitsfeld*, von einem *Lese-Schreib-Kopf* bearbeitet. Das Verhalten der Maschine wird durch ein internes Programm bestimmt; in Abhängigkeit vom Zustand und der Inschrift des Arbeitsfeldes kann die Maschine das Symbol verändern, den Kopf auf ein benachbartes Feld bewegen und dann in einen neuen Zustand übergehen (siehe Abb. 4.3).

Zunächst entwickelt Petri die Netzdarstellung der Kontrolleinheit und des Lese-Schreib-Kopfes und zeigt, dass jede Berechnung einer Turingmaschine auf einem *vorliegenden endlichen Teilband* durch Netze asynchron durchführbar ist.

Speichererweiterung Gemäß seiner Forderung, dass ein Automat bei Bedarf unbeschränkt erweiterbar sein muss, formuliert Petri Regeln zur Speicheranforderung, wenn

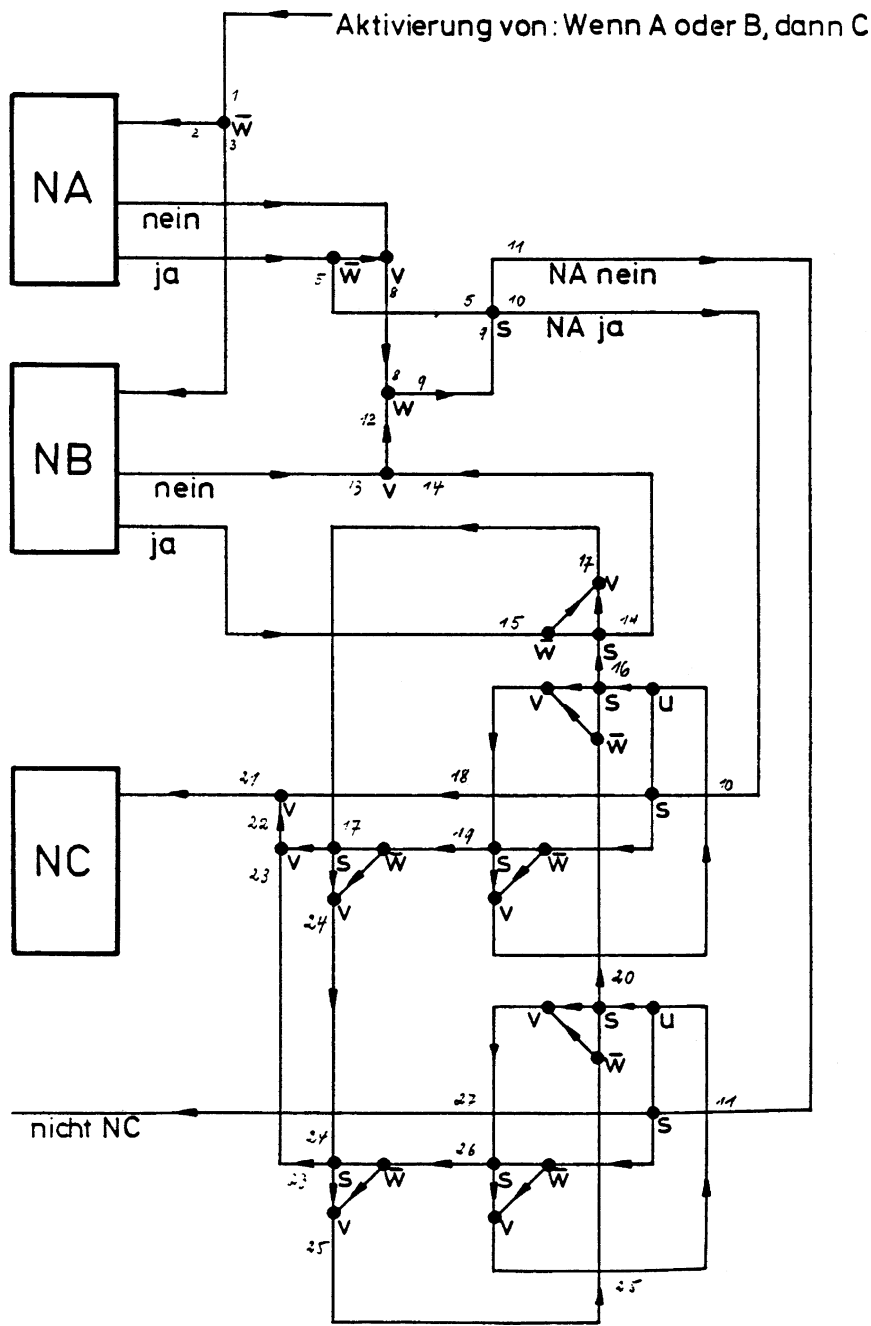


Abb. 4.2 Petris Darstellung der Disjunktion in [4]

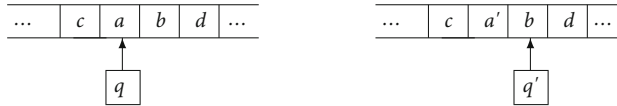


Abb. 4.3 Die Turingmaschine liest im Zustand q das Symbol a im Arbeitsfeld (*links*), ersetzt es durch a' , bewegt den Kopf ein Feld nach rechts und geht in den Folgezustand q' über (*rechts*). Die Buchstaben $a, \dots, d, a'$ bezeichnen jeweils ein leeres Feld oder das Symbol 1

die Maschine an die gegebenen Bandgrenzen stößt. Diese Regeln werden wieder in der Sprache der Netze ausgedrückt, und zwar durch einen darin formulierten „logischen Plan, gemäß dessen der weitere Speicher dann von einer Metamaschine (oder dem Benutzer) bereitzustellen ist.“ Aber auch diese Form der „Metakommunikation“ soll, so weit möglich, strengen Regeln unterworfen werden.

Ein solches Regelwerk sollte dann später unter der Überschrift *Kalkül des Planens und Handelns* von einem der langjährig engsten Mitarbeiter Petris, Hartmann Genrich, präzisiert und ausgearbeitet werden. (In dem in der Einleitung erwähnten Petri-Puzzle wird dieser Gedanke in einer Spielregel aufgegriffen, die besagt, dass die Brettgröße während des Spielverlaufs verändert werden kann.)

Dieser letzte Teil der Dissertationsschrift geht sicher über die Automatentheorie im engeren Sinn hinaus, und verweist bereits auf die späteren „höheren Netze“ der allgemeinen Netztheorie. Petri stellt fest: „Wenn wir von Kommunikation *mit* einem Netz sprechen, so denken wir uns selbst in die Lage eines Teilnetzes versetzt, haben aber nicht unmittelbar die Möglichkeit, auf diesen Teil des Netzes dieselbe Form der Beschreibung anzuwenden. Es handelt sich also um eine andere Form der Kommunikation mit Automaten, als es die Bestückung mit Eingabefolgen ist. Sie findet auch üblicherweise nicht in derselben Sprache statt, sei diese nun iterativ oder rekursiv erklärt.“

4.2 Alternative Ansätze

In den Vorarbeiten zur Dissertation hat Petri noch zwei weitere Modelle untersucht, die er *Zuweisungssysteme* bzw. *lose gekoppelte Systeme* nannte. Auch bei diesen beiden Ansätzen steht die Asynchronität des Verhaltens im Mittelpunkt. Bei den Zuweisungssystemen basieren die Elementaraktionen wie bei imperativen Programmiersprachen auf der *Wertzuweisung* an Variable. Bei den lose gekoppelten Systemen bildet der *gegenseitige Ausschluss* von Zugriffen auf gemeinsame genutzte Ressourcen den Ausgangspunkt. Von Mitarbeitern in der GMD sind später insbesondere die lose gekoppelten Systeme noch weiter bearbeitet worden. Letztlich hat sich aber der allgemeine Netzansatz als das leistungsfähigere Modell durchgesetzt.



Abb. 4.4 Petri um 1963. Denker und Musiker

4.3 Wirkung der Dissertation

Im Ausgangspunkt geht es in Petris Dissertation um den Entwurf von Computern, also um Rechnerarchitektur. Verbreitung fanden die Netze aber zunächst nicht da, sondern in solchen Systemen, bei denen die Verteiltheit der Komponenten offenkundig war, bei industriellen Fertigungsprozessen, in der Telekommunikation, in der Verkehrssteuerung, später auch bei der Vernetzung von Rechnern. Das blieb im Grunde bis in die 1970er Jahre so.

In den 1980er Jahren kam der Vorschlag auf, man solle Rechner entwerfen, die sich in ihrer Struktur am menschlichen Gehirn orientierten. Die These war, das Gehirn erhalte seine Leistungsfähigkeit aus der komplexen Verschaltung einer ungeheueren Anzahl von Neuronen, die ihrerseits aber nur ein vergleichsweise einfaches Verhalten aufwiesen. Das führte zu dem Ansatz der sogenannten *massiv parallelen* Systeme, bei denen massiv viele einfache Prozessoren miteinander verbunden werden sollten. Bei derartigen Größenordnungen gewannen dann aber auch die von Petri beschriebenen physikalischen Grenzen zunehmend an Relevanz.

Eins der bekanntesten Beispiele einer solchen massiv parallelen Maschine ist die von dem Forscher Daniel Hillis am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelte Connection Machine, deren erste Inkarnation CM-1 aus 65.536 Prozessoren aufgebaut war. Die einzelnen Prozessoren waren extrem einfach, sie verarbeiteten jeweils nur 1 Bit. Diese Maschine wurde ab 1983 in der eigens hierfür von Hillis gegründeten Firma Thinking Machines produziert. Ein Exemplar fand seinen Weg in die GMD.

Bei der Entwicklung und Konstruktion spürte Hillis unmittelbar die Bedeutung der physikalischen Rahmenbedingungen. Er stellt fest: “We are discovering that it previously appeared as if we could connect a wire to as many places as we wanted, only because we did not yet want to connect to many places. We have been forced to notice that we cannot measure a signal without disturbing it; for example we must drive a wire with power proportional to the number of inputs that sense it.”

Heute sind die Petrinetze auch bei der Beschreibung von Rechnerarchitekturen weit verbreitet. Naturgemäß erweisen sie sich in denjenigen Zusammenhängen als besonders nützlich, wo es um die Koordination asynchroner Aktionen geht.

Inhaltsverzeichnis

5.1 Asynchroner Informationsfluss 37

5.2 Rechenzentrum Bonn 38

5.3 Israel 39

5.4 Amerika 40

5.5 Physikalischer Determinismus 42

5.6 Reversible Logik 44

In den folgenden Jahren verallgemeinert Petri die in der Dissertation gewonnenen Erkenntnisse, wobei er sich immer eng an der Forderung nach physikalischer Verträglichkeit orientiert. Als Ziel strebt er letztlich einen gemeinsamen Nenner zwischen Automatentheorie, Schaltwerken, Geometrie und moderner Physik an.

5.1 Asynchroner Informationsfluss

In dem Jahr zwischen Einreichung und Annahme der Dissertationsschrift hat Petri den dort begonnenen Ansatz schon weiterentwickelt. Ebenfalls im Jahr 1962, Ende August, stellt er auf dem IFIP-Kongress in München eine Arbeit mit dem Titel *Fundamentals of a Theory of Asynchronous Information Flow* [5] vor. Hier liegt der Schwerpunkt auf der Charakterisierung der Prozesse, die in verteilten asynchronen Systemen ablaufen und als Träger von Informationsverarbeitung dienen können. Als grundlegenden Begriff identifiziert er *Signalströme*. Signale sind hier gemeint als Ursache und Folge von Zustandsänderungen, oder anders ausgedrückt: Ein Zustand drückt eine Signalverteilung aus, Ereignisse verändern diese Verteilung.

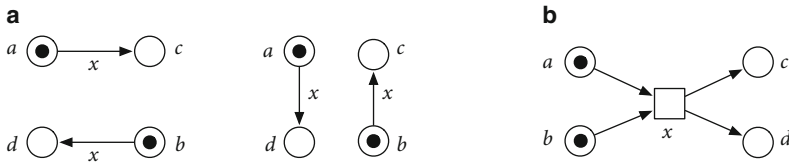


Abb. 5.1 a Zwei Darstellungen von T -Element x in [5], b moderne Netzform

Wie er in *Grundsätzliches zur Beschreibung diskreter Prozess* [6] näher ausführt, ist ihm die physikalische Idee der „Zeitumkehrinvarianz im Kleinen“ von entscheidender Bedeutung. Darauf aufbauend argumentiert er, dass es für die Entwicklung einer für die Informationsverarbeitung angemessenen Theorie der Signalströme ausreicht, Ereignisse zu betrachten, die jeweils mindestens zwei Ursachen und zwei Wirkungen haben.

Eine Verknüpfung dieser Signalströme führt zum Begriff des *Prozesses*. In *Fundamentals of a Theory of Asynchronous Information Flow* formuliert Petri seinen Ansatz so: „We regard every process as composed of discrete events T . To describe relations between events we use the concept of a state, complementary to that of an event. We shall say that an elementary event alters the state of a finite number of entities called state elements S .“

S -Elemente als Träger von Signalen treten bereits in den späteren Teilen der Dissertation auf, einschließlich der graphischen Darstellung als Kreise, mit einer Marke als Zeichen für das Vorliegen eines Signals. Die bekannte graphische Darstellung von T -Elementen durch Kästchen verzögert sich jedoch noch. In *Fundamentals* [5] finden wir: „A T -element is shown as a pair of directed arcs connecting two pairs of S , the arcs of any one T bearing the same label. ... Every T -element may thus be represented in two different ways“ (siehe die beiden Darstellungen in Abb. 5.1a).

Diese Darstellung ist insbesondere auch deshalb erstaunlich, weil Petri ja schon in zwei Fällen die Kästchen-Notation verwendet hatte: bei der Beschreibung chemischer Reaktionen während der Schulzeit sowie bei der Transformation des pragmatischen Status von Rechnerbändern im Rechenzentrum Hannover. Erst drei Jahre später wird in *Grundsätzliches zur Beschreibung diskreter Prozesse* die graphische Darstellung von Netzen als bipartite Graphen aus Kreisen und Kästchen (wieder?) eingeführt werden.

Das Papier ist recht knapp gehalten, mit dem Verweis auf eine weitere Ausarbeitung in der Schriftenreihe des Bonner Instituts für Instrumentelle Mathematik. Leider ist diese aber nie erschienen.

5.2 Rechenzentrum Bonn

Die weitere Entwicklung der Theorie verlangsamte sich leider ein wenig. 1963 wurde Petri zum Kustos der Universität Bonn ernannt, also ein „mit Verwaltungsaufgaben eines Hochschulinstituts oder -seminars betrauter wissenschaftlicher Mitarbeiter“. Damit einher ging

die Berufung zum Beamten auf Lebenszeit. Bei seiner Vereidigung wurde er protokollgemäß gefragt, ob er den Amtseid mit oder ohne die Formel „So wahr mir Gott helfe“ leisten wolle. Petri soll geantwortet haben: „Ich schwöre ohne jegliche Einschränkung.“

Wie zuvor in Hannover begann Petri mit der Einrichtung und Leitung des Rechenzentrums der Universität, diesmal aber in deutlich größerem Maßstab. Trotz erheblicher Bedenken seiner Kollegen („Viel zu groß, wird nie ausgelastet werden.“) setzte er die Anschaffung von zwei IBM-Rechnern durch, ein Großrechner IBM 7090 und ein kleinerer Satellitenrechner IBM 1410, der dem Hauptrechner Daten-Ein/Ausgabe und -Verwaltung abnehmen sollte. Petri schrieb große Teile des Betriebssystems *Fortran Monitor System* neu, um u. a. die Kooperation zwischen den beiden Maschinen vermittelt über die Bandgeräte zu gewährleisten.

Das Bonner Rechenzentrum wurde so zu dem damals zweitgrößten nicht-kommerziellen in ganz Deutschland (nach dem Deutschen Rechenzentrum (DRZ) in Darmstadt). Die Rechenleistung der 7090 stand allen Fakultäten der Universität zur Verfügung und wurde auch rasch bis an die Grenzen der Kapazität ausgenutzt. Die Physiker konnten damit Blasenkammer-Experimente auswerten und Elektronenstreuungs-Prozesse simulieren, die Philosophen erstellten einen Index der Werke Kants, Linguisten erprobten die automatische Übersetzung natürlicher Sprachen.

Petri kümmerte sich aber auch um die bodenständigsten Fragen des Rechnerbetriebs: Er fegte selbst den Rechnerraum, denn, wie er sich erinnerte: „Die Putzfrauen machten das nicht verständig genug.“

1966 erfolgte die Ernennung Petris zum Oberkustos. Im selben Jahr richtete er eine Forschungsgruppe zur Grundlagenproblematik der Datenverarbeitung ein, die dann zwei Jahre später in die GMD übernommen wurde.

5.3 Israel

Neben seinen Arbeiten im Rechenzentrum machte Petri auch einen – wie er sagt – „kurzen Ausflug“ in die Phonetik und Linguistik und ihre Verarbeitung im Rechner. So kam er in Kontakt mit Victor Yngve, Autor der ersten Programmiersprache zur Verarbeitung von Zeichenketten, die er Anfang der 1960er Jahre mit Mitarbeitern am Massachusetts Institute of Technology (MIT) auf IBM-Maschinen des Typs 700/7000 entwickelte. Yngve entwarf die Sprache für Forschungen u. a. auf dem Gebiet der maschinellen Übersetzung und natürlichen Spracheingabe.

Yngve muss von Petri beeindruckt gewesen sein, denn er erzählte dem israelischen Philosophen und Mathematiker Yehoshua Bar-Hillel von ihm und seiner Dissertationsschrift. Bar-Hillel ist am besten bekannt für seine Pionierarbeiten in maschineller Übersetzung und formaler Linguistik. Daraufhin wurde Petri trotz der knappen Ressourcen des Staates Israel 1964 zur Teilnahme am *International Congress on Logic and Philosophy in Science* in Jerusalem eingeladen.



Abb. 5.2 Petri 1964 in Israel

Es war auch Bar-Hillel, der bemerkte, dass Petris Arbeit weit über die Automatentheorie hinauswies. Petri erinnert sich später dankbar: „*Er forderte mich auf weiterzumachen. Er erklärte mir, dass Pragmatik Vorrang vor der Logik hat. Er machte mich mit den gegenwärtigen Philosophen bekannt. Er zeigte mir die Qumran-Rollen. Trotz seiner umfangreichen Pflichten als Organisator des Kongresses gab er mir private Vorträge. Er behandelte mich so, als ob ich eine sehr wichtige Persönlichkeit sei. Er ermutigte mich, mich durch Philosophen nicht einschüchtern zu lassen. Ich versprach es. Am nächsten Tag jedoch ließ ich mich einschüchtern durch McCarthy, Kleene, Rabin und Zemanek.*“

John McCarthy war ein amerikanischer Logiker und Informatiker. Er ist der Erfinder der Programmiersprache LISP. Stephen Kleene gilt als einer der Begründer der theoretischen Informatik, besonders der formalen Sprachen und der Automatentheorie. Michael Rabin ist ein israelischer Informatiker. Er hat sich besonders im Bereich der Kryptologie in Zusammenhang mit Primzahlen und im Bereich Automatentheorie verdient gemacht. Heinz Zemanek ist ein österreichischer Computerpionier.

5.4 Amerika

Bei der Tagung in Israel lernte Petri auch Anatol Holt kennen, der ihn 1965 zum ersten Mal in die USA einlud. Holt hatte 1952 in einer von John W. Mauchly geleiteten Arbeitsgruppe als Programmierer der UNIVAC I begonnen. (Die von Mauchly und John Presper Eckert entwickelte Maschine war der erste kommerziell verfügbare Computer der USA.)

Von 1963 bis 1974 leitete Holt ein von der ARPA (Advanced Research Projects Agency, US-amerikanische Forschungsbehörde) gefördertes Projekt zur Theorie der Informations-



Abb. 5.3 Holt und Petri 1967 in Scheveningen, *rechts* bei der Reiseplanung

systeme. Petrinetze wurden zu einem zentralen Bestandteil des Projekts, so dass Petri und Holt während der Projektlaufzeit intensiv an der Entwicklung der Netze zusammenarbeiteten, sowohl in den USA als auch später in der GMD.

Die beiden verband eine lange, aber auch schwierige Freundschaft. Holt erkannte schnell die Möglichkeiten der Netze und trieb Petri zur Weiterentwicklung an. Holt gilt auch als derjenige, der die Bezeichnung „Petrinetze“ eingeführt hat, auf einer Tagung um 1967. (Dem steht entgegen, dass Tom DeMarco, der Erfinder der sogenannten Strukturierten Analyse, einer Methode zur Erstellung einer formalen Systembeschreibung im Rahmen der Softwareentwicklung, bereits Ende 1964 die Bezeichnung Petrinetze bei einer Projektvorstellung in den Bell Telephone Laboratories kennengelernt haben will.) Petri und Holt waren in gewissem Sinn aber auch Rivalen; Holt hat später oft behauptet, viele der zentralen Ideen der Netze stammten ursprünglich von ihm.

Das ARPA-Netz Ab 1962 begann unter Leitung des amerikanischen Verteidigungsministeriums und des Massachusetts Institute of Technology (MIT) die Entwicklung des ARPA-Netzwerks, der Vorläufer des Internets. Darin sollte die Möglichkeit der großflächigen Vernetzung von Computern untersucht werden.

In Boston hielt Petri einen Vortrag vor Entwicklern des ARPA-Netzes und Angehörigen des MIT, in dem er die Beschränktheit der semantischen Analyse der Kommunikation erörterte. Er erinnert sich: „Ich sagte, dass meiner Meinung nach semantische Analyse nie zu einem Ziel kommen könne, außer in einem äußerst eingeschränkten Gebiet, das der Verifizierung von „korrekten“ Compilern für Programmiersprachen, die schlecht entworfen worden waren. Ich drängte darauf, dass ein radikal umfassenderer Ansatz notwendig sei, um die gegenwärtigen und zukünftigen rechnerbasierten Kommunikationsnetzwerke zu behandeln: der Entwurf einer formalen Pragmatik.“ In diesem Sinn hat Petri später oft

aphoristisch von der Semantik als „unendlich dünne Schicht zwischen Syntax und Pragmatik“ gesprochen.

In der weiteren Entwicklung kam Petri später mit Ingenieuren und Forschern in Kontakt, die sich mit zwischenzeitlich deutlich gewordenen Schwierigkeiten des ARPA-Netzes beschäftigten. Petri konnte verschiedene Klassen von Problemen identifizieren, einen Ansatz, den er später im Rahmen seiner *Kommunikationsdisziplinen* ausarbeiten sollte. Näheres dazu in Kap. 9.

Regierungsberater Ende der 60er Jahre war Petri Berater der Amerikanischen Regierung. Von dem Honorar konnte er sich seinen ersten Neuwagen kaufen, den damals als technologisch bahnbrechend geltenden NSU Ro 80. Bekanntlich erwies sich die revolutionäre Wankelmotor-Technik aber so sehr von Problemen geplagt, dass die Produktion wieder eingestellt wurde. Von lästernden Zungen, die den Petrinetzen eher kritisch gegenüberstanden und ihnen keine große Zukunft vorhersagten, hörte man gelegentlich, das sei genau das passende Auto für Petri; wie die Netze vom Ansatz her genial, aber wenig praxistauglich. Petri fuhr das Auto, bis er 1976 ein neues desselben Typs kaufte, das er dann erst 1992 an einen Liebhaber weitergab. Bei seinen Netzen ist kein Ende in Sicht.

5.5 Physikalischer Determinismus

Für ein tieferes Verständnis von Petris Werk ist es nötig, auf sein kosmologisch-philosophisches Weltbild einzugehen. Er war überzeugter Anhänger eines physikalischen Determinismus, wie er etwa von Pierre-Simon Laplace vertreten wurde, für den die Welt durch Anfangsbedingungen und Bewegungsgesetze vollständig bestimmt ist, so dass ein entsprechender Dämon mathematisch den Weltablauf voraussagen könnte. Auch hier war Petri sicherlich von Albert Einstein beeinflusst, der seinen strikten Determinismus ja bekanntlich in der Aussage „Gott würfelt nicht“ zusammenfasste (worauf ihm im übrigen Niels Bohr erwidert haben soll, Einstein solle doch bitte Gott nicht vorschreiben, was er zu tun hätte).

Petris Universum: konfliktfrei und informationell abgeschlossen In seiner Dissertation hatte Petri festgestellt, dass Konflikte zwischen Ereignissen vorkommen können, hatte aber auch Konstruktionen vorgeschlagen, wie sie zu vermeiden seien. Im 3. *Colloquium über Automatentheorie* 1965 in Hannover präzisiert er seine Vorstellung zum ersten Mal ausführlich [6]. Er erklärt das Vorliegen von Konflikten in Netzen damit, dass man nur ein *Teilnetz* eines umfassenderen postulierten Gesamtnetzes betrachtet, in dem tatsächlich die zur Konfliktentscheidung notwendigen Bedingungen enthalten sind: „Im Gesamtnetz ist der Informationsstrom, der von einem Signalstrom getragen wird, ‚divergenzfrei‘, also deterministisch. Nur Informationszufuhr entscheidet Konflikte.“

Dieser Gedanke taucht in seinen Arbeiten immer wieder auf, z. B. in *Concepts of Net Theory* [7]; oder in *Interpretations of Net Theory* [8] so: „A choice between alternatives can

arise only when a part of the world – e. g. a system – is considered separately from the rest of the world, e. g. the environment of the system.” Auch in *General Net Theory* [10] betont er: “If a transition set contains a conflict, then the system described by it possesses a non-empty environment.” In *State-Transition Structures in Physics and in Computation* [14] finden wir: “Deciding a conflict defines one bit of information. From where?” Letztlich aus dem Universum: “A detailed ... description of the universe contains no conflict situations.”

Petri meint also, dass die konfliktentscheidende Information in der unmittelbaren Umgebung der betrachteten Stelle bereits vorliegt. Der Konflikt manifestiert sich deshalb als ein solcher, weil man aus dem umfassenden konfliktfreien Gesamtnetz nur einen Teil ausgewählt hat, und daher Signalverteilung nur auf der einen Seite des Schnitts betrachtet. In dieser Verteilung treten Konflikte auf, die im Gesamtnetz nicht vorhanden sind.

Bezüglich des so aufgefassten Informationsbegriffs folgert er dann bereits 1967 in *Grundsätzliches zur Beschreibung diskreter Prozesse* [6]: „Wir gelangen so zu einem rein kombinatorischen Informationsbegriff, wie ihn Kolmogoroff gelegentlich gefordert hat.“ Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow (1903–1987) war ein bedeutender russischer Mathematiker, dessen bekannteste Leistung die Axiomatisierung der Wahrscheinlichkeitstheorie war. Er hat noch 1983 verlangt, dass „Information theory must precede probability theory, and not be based on it.“

Zufall und Kausalität Konsequenzen hat ein solcher Determinismus natürlich auch für die Auffassung von dem, was Zufall bedeutet. Zufall kann bedeuten, dass (1) keine Ursache existiert, oder auch, dass zwar eine existiert, (2) man diese aber nicht kennt. Die in Rechenmaschinen üblicherweise verwendeten Zufallsgeneratoren sind von der zweiten Art: Es existiert zwar eine Erzeugungsregel, aber sie ist von einer solchen Komplexität, dass sie praktisch einem Nicht-Wissen gleichkommt. Verschiedentlich wurde vorgeschlagen, „echte“ Zufallsgeneratoren beispielsweise auf die Betrachtung von radioaktivem Zerfall zu basieren. Wenn aber die Welt deterministisch ist, reduziert sich dieser Ansatz doch wieder auf die Variante (2).

Wenn aber umgekehrt, Zufall doch ein der Natur inhärentes Phänomen ist, verliert letztlich die Idee der Kausalität ihre strenge Bedeutung und muss ersetzt werden durch „Korrelation mit Wahrscheinlichkeit nahe 1“.

Petri hat für die Trägerstrukturen seiner nichtsequentiellen Prozesse die Bezeichnung *Kausalnetz* gewählt und damit noch einmal seinen Standpunkt betont. (Die englische Übersetzung *occurrence-net* ist da weniger aussagekräftig.)

Verborgene Parameter der Quantenmechanik Vor diesem Hintergrund ist es auch nicht verwunderlich, dass Petri sehr wohlwollend die These aufgriff, dass die vermeintlichen Zufälle in der Quantenmechanik in Wirklichkeit auf verborgene aber kausal wirkende Parameter zurückgehen. In dieser Frage setzte er sich u. a. mit dem damals am Kernforschungsinstitut CERN bei Genf forschenden Physiker John Stewart Bell auseinander, der die Auffassung vertrat, dass es keine solchen versteckten Variablen gebe. Größere Übereinstimmung fand Petri dagegen in der Beziehung zu dem niederländischen Physiker und

Nobelpreisträger Gerard 't Hooft, der davon ausgeht, dass die Quantenmechanik auf einer deterministischen Theorie aufbauen sollte.

5.6 Reversible Logik

Unabhängig von der Frage, wie Information zu definieren ist oder wie sie entsteht, ist die Untersuchung, wie sie in Systemen fließt und verarbeitet wird, sicherlich von grundlegender Bedeutung.

Anhand des klassischen Und-Gatters stellt Petri schon in der Dissertation fest, dass die Verwendung von Schaltelementen mit *zwei* Eingängen und *einem* Ausgang *irreversibel* mit Informationsverlust verbunden ist. Auf der physikalischen Ebene wird die überschüssige Energie der Transformation von zwei Eingabe-Bits in ein Ausgabe-Bit in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Tatsächlich ist bekannt (u. a. aus der Betrachtung umkehrbarer Prozesse in biologischen Systemen), dass es aus Gründen der Energiebilanzierung sinnvoll ist, bei der Informationsverarbeitung – soweit möglich – physikalisch reversible Prozesse zugrunde zu legen.

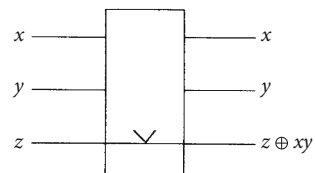
Petri schlägt bereits 1965 im Rahmen des oben erwähnten Kolloquiums über Automatentheorie in Hannover ein Modell vor, bei dem alle Booleschen Berechnungen in reversible Umformungen eingebettet sind, und so – zumindest prinzipiell – auch physikalisch umkehrbar implementiert werden können. Er nennt diese Strukturen *Informationsflussgraphen* [6].

Die Ideen sind später von anderen Forschern aufgegriffen worden, die sie gelegentlich auch unter eigenem Namen vermarktet haben. Unter anderem spielen sie heute eine Rolle bei der Diskussion der sogenannten *Quantencomputer*, ein zur Zeit noch höchst spekulativer Ansatz, bei dem die Funktion der Rechner direkt auf den Gesetzen der Quantenmechanik beruht.

Das Petri-Gatter Der zentrale Baustein der Informationsflussgraphen ist das in Abb. 5.4 dargestellte Funktionselement. Petri nennt es *Pfeilfunktion*, genauer die Pfeilfunktion P_2 . Hier soll stattdessen die Bezeichnung *Petri-Gatter* verwendet werden.

Die Eingangssignale x, y, z links können jeweils die Booleschen Werte 0 oder 1 annehmen. An den Ausgängen rechts erscheinen die Werte von x, y unverändert. Auf der mit dem Häkchen gekennzeichneten Signallinie erscheint am Ausgang ein Wert, der sich aus den drei Eingaben zu $z \oplus x \cdot y$ berechnet. Mit „ $\cdot$ “ ist hier einfach die normale Multiplikation

Abb. 5.4 Das Petri-Gatter



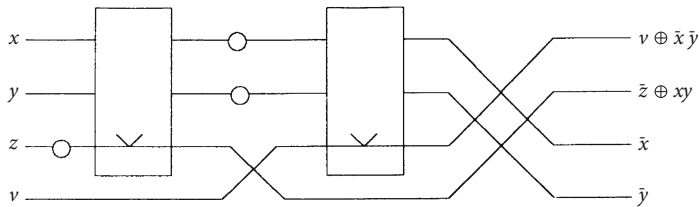


Abb. 5.5 Informationsflussgraph. Der waagerechte Strich über den Variablen bedeutet Negation

$0 \cdot 0 = 0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$ und $1 \cdot 1 = 1$ gemeint, die dem logischen Und entspricht. Statt $x \cdot y$ schreibt man wie üblich oft auch einfacher xy .

Der Operator $\oplus$ bezeichnet das logische „Entweder-Oder“. Eine Entweder-Oder-Aussage ist wahr, wenn *genau eine* der beiden Teilaussagen wahr ist. In 0-1-Schreibweise ergibt sich also $0 \oplus 0 = 0 = 1 \oplus 1$, $0 \oplus 1 = 1 = 1 \oplus 0$. Die Multiplikation „ $\cdot$ “ hat Vorrang vor $\oplus$, so dass $z \oplus x \cdot y$ in der Reihenfolge $z \oplus (x \cdot y)$ ausgewertet wird. Für die Eingangswerte $x = y = z = 1$ ergibt sich z. B. der Ausgangswert $z \oplus xy = 1 \oplus 1 \cdot 1 = 1 \oplus 1 = 0$.

Die Wirkung des Petri-Gatters ist also, dass der Wert von z *invertiert* wird, genau dann wenn x und y beide den Wert 1 haben. Das entscheidende Merkmal des Gatters ist, dass es eine *umkehrbare* Abbildung zwischen Eingangswerten (x, y, z) und Ausgangswerten (x', y', z') festlegt. Wenn etwa $x' = 1 = y'$, $z' = 0$, kann man auf $x = y = z = 1$ zurückschließen.

Das Petri-Gatter ist sogar *selbstinvers*: Verknüpft man zwei Exemplare, wird die ursprüngliche Eingabe wiederhergestellt. Um das einzusehen, reicht es natürlich, die Signale auf der unteren z -Linie zu verfolgen. Am Ausgang des zweiten Gatters ergibt sich $(z \oplus xy) \oplus xy = z \oplus (xy \oplus xy) = z \oplus 0 = z$.

Informationsflussgraphen Ein Informationsflussgraph besteht aus einer beliebigen Verschaltung von Petri-Gattern und zusätzlichen Negationsgliedern, hier graphisch gekennzeichnet durch einen kleinen Kreis. Ein Negationsglied $v \text{ --- } \bigcirc \text{ --- } \bar{v}$ transformiert das Eingangssignal v in das *komplementäre* Ausgangssignal $\bar{v}$, also $\bar{0} = 1$ und $\bar{1} = 0$. Abbildung 5.5 zeigt einen so aufgebauten Informationsflussgraphen.

Jeder Informationsflussgraph stellt eine reversible Transformationen der Eingabe- in Ausgabewerte dar. Petri hat gezeigt, dass die Informationsflussgraphen überdies tatsächlich ausreichen, um beliebige derartige reversible Boolesche Berechnungen durchzuführen. Es gilt der

Hauptsatz der reversiblen Logik (Petri 1965 [6]). *Jede Boolesche Bijektion einer beliebigen Stelligkeit n kann durch einen Informationsflussgraphen mit $n + 1$ Eingängen berechnet werden. Die zusätzliche Signallinie wird nur für Zwischenrechnungen benutzt. Am Ausgang hat sie den ursprünglichen Wert wieder angenommen.*

Informationsflussgraphen können direkt in Petrinetze entfaltet werden. Das ist in Abb. 5.6 an einem kleineren Beispiel dargestellt.

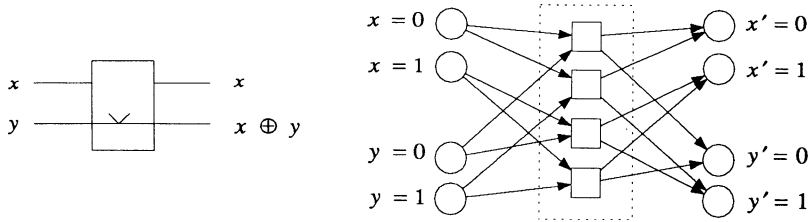


Abb. 5.6 Kleines Petri-Gatter, von Petri als Pfeilfunktion P_1 bezeichnet. Rechts Entfaltung in Petrinetz

Das Petri-Gatter ist nicht der einzige mögliche Basisbaustein. In *Interpretations of Net Theory* [8] wählt Petri z. B. ein anderes Gatter, das er (in Anlehnung an den Philosophen und Logiker Willard Van Orman Quine) *Quine-Transfer* nennt. Es handelt sich dabei um eine bedingte Vertauschung der Form $(x, 0, z) \mapsto (x, 0, z)$, $(x, 1, z) \mapsto (z, 1, x)$. Die Werte von x und z werden also *vertauscht*, genau dann wenn $y = 1$. Der Wert von y wird durch das Gatter nicht verändert.

Der Quine-Transfer zeichnet sich graphisch durch eine besonders ästhetische Entfaltung in ein Petrinetz aus. Abbildung 5.7 zeigt eine handgezeichnete Darstellung Petris.

Reversible Schaltwerke Das Schließen von Signallinien zu Kreisen ermöglicht es, Verzögerungsglieder durch Informationsflussgraphen darzustellen. Durch Umkehrung der Signalströme entstehen Schaltwerke. In dem Artikel *State-Transition Structures in Physics and in Computation* [14] deutet Petri die Reichweite seiner so erweiterten Informationsflussgraphen an: "Several blue prints for full-fledged computers exist in the graphical level-notation."

In derartigen Aussagen zeigt sich eine Besonderheit der Gedankenwelt Petris. Wie der Autor aus zahlreichen persönlichen Gesprächen mit ihm bestätigen kann, existierten in seinem Kopf umfangreiche Details der Konstruktion; aber damit war für ihn schon der wichtigste Teil der Arbeit erledigt. Vieles von dem, was ihm vorschwebte, hat er leider nicht ausreichend zu Papier gebracht.

Verbreitung in Theorie ... Der Grundgedanke der Informationsflussgraphen ist aber weltweit von führenden Forschern aufgegriffen worden. Das Petri-Gatter ist in den USA etwa unter dem Namen *Fredkin-Gate* bekannt geworden, der Quine-Transfer als *Toffoli-Gate*. Tatsächlich erwuchs aus diesen Ansätzen ein eigenständiges Fachgebiet, die sogenannte *Conservative Logic*. Seit 2005 findet regelmäßig der *International Workshop on Reversible Computing* statt. In dem Programm zum ersten Workshop wird explizit die Teilnahme an einem Vortrag von dem „reversible logic pioneer“ Ed Fredkin empfohlen. Der Hintergrund der Fredkinschen Pioniertätigkeit ist aber sicherlich in den Diskussionen mit Petri zu suchen, den Fredkin z. B. 1978 in der GMD aufsuchte. Abbildung 5.8 zeigt Petri, Petris langjährige Mitarbeiter Hartmann und Helga Genrich und Fredkins Ehefrau Joyce zu Hause bei den Petris.

Construction of Quine Transfer

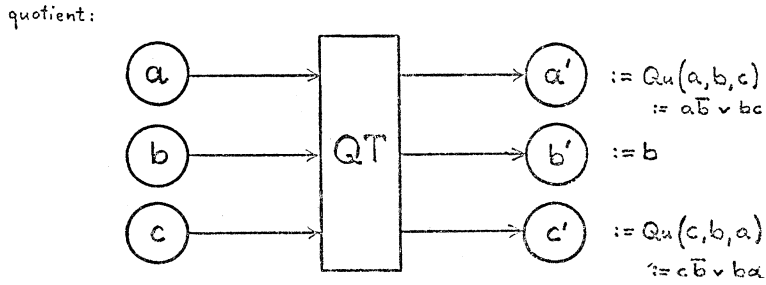
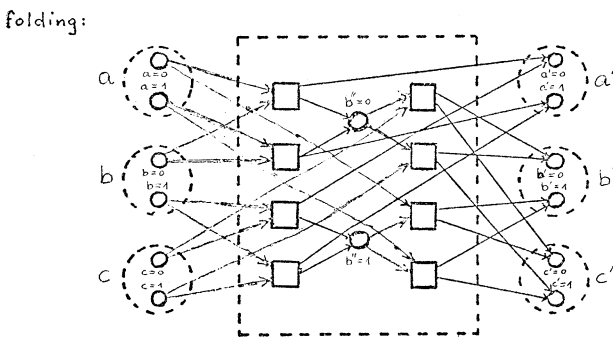
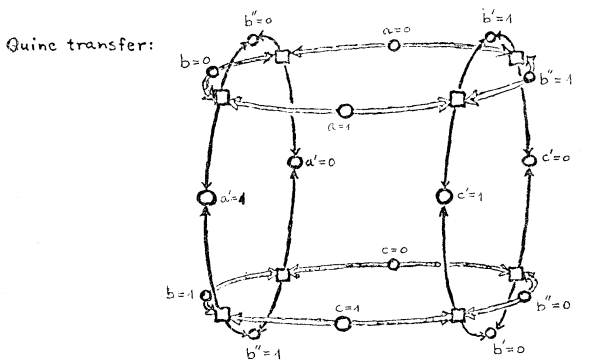


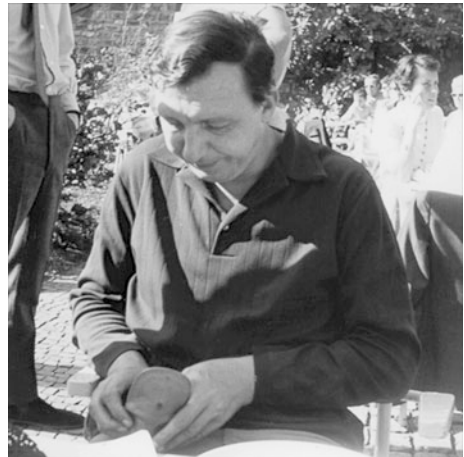
Abb. 5.7 Quine-Transfer

... und Praxis Bei Praktikern stieß die Idee, alle Berechnungen reversibel einzubetten, nicht immer auf uneingeschränkte Zustimmung. Petris Sohn Tobias erinnert sich: Um 1985 luden die führenden Ingenieure einer großen Elektro- und Elektronik-Firma Petri ein, ihnen Netztheorie und Sicherheit in der Nachrichtentechnik aus erster Hand zu erklären. Der Aspekt der reversiblen Logik leuchtete ihnen nicht ein: Wozu rückwärts konstruieren – das Vergangene ist doch wohl bekannt? Sie waren der Meinung, dass die bereits planmäßig verarbeiteten Signale obsolet seien, also keine Bedeutung mehr hätten.



Abb. 5.8 Zuhause bei den Petris 1978. Von links nach rechts: Petri, Hartmann und Helga Genrich, Joyce Fredkin

Abb. 5.9 Petri zahlt



Vor ihnen auf dem Tisch lag eine große Netz-Zeichnung; die Ingenieure benutzten mehrere Geldstücke als Marken und schoben diese auf dem Entwurf bis zur Vereinigung zweier Wege, wo sie dann jenseits des Knotens nur eine Münze weiter wandern ließen. Nun erklärte Petri: „Wenn Sie sagen, dass dieses Signal erledigt ist und keinen Wert mehr hat, dann kann ich das ja wegnehmen“ – und steckte frech vor ihren Augen die Mark, die ihm nicht gehörte, in die eigene Tasche.

Der Come-From-Befehl Ebenfalls um 1985 nahm man in einer April-Ausgabe der *Communications of the ACM*, eine Fachzeitschrift, die von der amerikanischen Association for Computing Machinery herausgegeben wird, die damals äußerst kontrovers geführte Diskussion über den Sprungbefehl in Programmiersprachen, das *Go-To-Kommando*, zum Anlass für den Vorschlag, die Übersichtlichkeit der Programme durch ergänzende *Come-From-Befehle* zu verbessern. Petri kommentierte diese Idee schmunzelnd: „Die halten das offenbar für einen gelungenen Aprilscherz.“

Inhaltsverzeichnis

6.1 Bedingungs-Ereignis-Systeme 53

6.2 Konfusion 54

6.3 Kontakt 60

6.4 Synchronieabstand 62

6.5 Enlogische Struktur 63

6.6 Stellen-Transitions-Netze 64

6.7 Verbreitung 66

Am 23. April 1968 wurde die Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) auf dem Gelände von Schloss Birlinghoven in Sankt Augustin bei Bonn gegründet.

Das Schloss war um 1900 von einer Unternehmerfamilie Rautenstrauch erbaut und kurze Zeit später an den Kölner Bankier Louis Hagen verkauft worden. 1959 hatte die Deutsche Shell AG ein Institut für chemische Grundlagenforschung auf dem Gelände errichtet. 1968 ging das Schloss in den Besitz der Bundesrepublik Deutschland über.

Die Entwicklung der GMD ist ausführlich in dem Band *Informatik und Großforschung. Geschichte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung* [21] dokumentiert, so dass wir uns hier auf eine überblickshafte Darstellung beschränken können.

Bonn oder München? Das Ziel der Gründung der GMD war, das Konzept der Großforschung, das sich bei der Kernenergie bereits als erfolgreich erwiesen hatte, auf die Datenverarbeitung zu übertragen. Als mögliche Standorte kamen München und Bonn in Frage. Insbesondere Friedrich Ludwig Bauer, Professor an der Technischen Universität München, setzte sich vehement für München ein. Den Ausschlag für Bonn gaben dann aber wohl zwei Gründe. Zum einen wollte das Forschungsministerium die GMD in seiner Nachbarschaft. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), ebenfalls in Bonn ansässig, konnte sich dieser Auffassung anschließen. Zum anderen konnte Petri sich in den entscheidenden



Abb. 6.1 Schloss Birlinghoven. Bis zur Beendigung der Renovierungsarbeiten in den eigentlichen Institutsgebäuden befand sich Petris Arbeitszimmer provisorisch in dem weißen Turmanbau *links oben*, was natürlich gelegentlich Anlass zu ironischen Bemerkungen gab

Sitzungen in der DFG mit seinem Konzept für eine zukunftsweisende Informatik durchsetzen, in der er nun explizit Computer als *Medium der Kommunikation* vorhersah. Dabei kamen ihm sicherlich seine Erfahrungen mit dem ARPA-Netz zugute.

Bonn Das Resultat war, dass das Institut für Instrumentelle Mathematik (IIM) der Universität Bonn entsprechend ausgebaut und zur GMD wurde. Die ersten Geschäftsführer der GMD waren Petris Doktorvater Heinz Unger und Ernst Peschl, ebenfalls Professor für Mathematik an der Universität Bonn. Petri wurde zum Leiter des Instituts für Informationssystemforschung (ISF), später Institut für Methodische Grundlagen der Informationstechnik (IMG) berufen, zunächst für die Dauer von drei Jahren. 1971 erfolgte die Wiederberufung für weitere fünf Jahre.

1973 erhielt Petri einen Ruf auf einen Lehrstuhl an der Universität Dortmund. Er lehnte ab, konnte aber in den „Bleibeverhandlungen“ in der GMD für das Institut bessere Bedingungen vereinbaren, als das an einer Universität möglich gewesen wäre. Petri wurde nun Institutsleiter auf Lebenszeit und übte diese Tätigkeit bis zu seinem Ausscheiden nach Erreichen der Altersgrenze 1991 insgesamt 23 Jahre lang aus.

GMD in der Kritik Es gab aber auch früh erhebliche Kritik an der GMD. 1972 bemängelte der Bundesrechnungshof, dass die GMD, statt ihre eigentliche Aufgabe wahrzunehmen, die darin bestand, die Bundesverwaltungen mit Programmen zur Datensammlung und -verarbeitung zu versorgen, ganz auf mathematische Grundlagenforschung programmiert worden sei. Auch sei die mit Bundesmitteln finanzierte GMD mit den Geldern nicht wirtschaftlich und sparsam umgegangen. Ob sich da interessierte Kreise geäußert hatten, die

vielleicht die Gründung der ersten Großforschungseinrichtung zur Datenverarbeitung lieber an einem anderen Ort gesehen hätten, sei dahingestellt. Einen ähnlichen Angriff gab es auch wieder Mitte der 80er Jahre, als zeitgleich in den verschiedensten Presseorganen von den „überbezahlten, ihre Pflichten nicht erledigenden GMD-Mitarbeitern“ zu lesen war, mit der Schlussfolgerung, dass die für die GMD zur Verfügung gestellten öffentlichen Mittel woanders wesentlich besser verwendet werden könnten.

Tatsache ist, dass bereits 1969 im Bundesministerium für Forschung und Technologie über eine Neuausrichtung der GMD auf ingenieurwissenschaftliche und softwaretechnische Ziele diskutiert wurde. Mit dieser Meinung setzte sich das Ministerium dann auch 1970 durch und enthob Prof. Unger seines Amtes.

Was den „unwirtschaftlichen“ Umgang mit Geldern betraf, war u. a. bemängelt worden, dass die Computer-Terminals nicht ständig ausgelastet seien. In einer Stellungnahme hatte Petri erwidert, bei den Terminals handele es sich seiner Ansicht nach nicht um Produktionsmaschinen im herkömmlichen Sinn, bei denen es um maximale Auslastung geht, sondern um *Kommunikationsmedien*. In einem ironischen Ton verwies er darauf, dass die Telefonapparate auch nicht ständig ausgelastet seien, die Feuermelder seines Wissens sogar gänzlich unbenutzt wären.

Petris Institut überlebte den Sturm unbeschadet. Die 70er Jahre sollten zur Blüteperiode der Netzentwicklung werden.

6.1 Bedingungs-Ereignis-Systeme

Anfang der 70er Jahre nahm die für Petri selbst wichtigste Netzklasse, die sogenannten *Bedingungs-Ereignis-Systeme*, ihre endgültige Gestalt an. Der Begriff Petrinetz wird allgemein abstrakt als Oberbegriff für alle Netzmodelle verwendet, aber auch speziell für Netze, bei denen Vielfachheiten von Marken auf den Stellen vorkommen können. Eine *Bedingung* ist dagegen erfüllt oder eben nicht. Zur Darstellung ist daher nur *eine* Marke erforderlich. Zu Netzen mit Mehrfachmarken später mehr.

Die sperrige unpersönliche Bezeichnung Bedingungs-Ereignis-System hat sich leider gehalten, obwohl mehrfach alternative Namen vorgeschlagen wurden, etwa *elementare Petrisysteme*. Ein Kompromiss, der sich einbürgerte, war die Verwendung der Abkürzung BE-System.

Die zentralen Ideen der BE-Systeme wurden der wissenschaftlichen Öffentlichkeit im September 1973 im Rahmen eines Symposiums in der Hohen Tatra in der Tschechoslowakei vorgestellt [7], in einem internen Bericht der GMD *Interpretations of Net Theory* dann 1975 präzisiert [8].

In Anlehnung an den Philosophen Ludwig Wittgenstein beschreibt Petri die Grundlagen der BE-Systeme so: “A case is a collection of *conditions*. ... A process is a collection of occurrences of events. ... A process changes that which is the case.” Und eben ganz entscheidend: “We permit concurrency of event occurrences.”

Ein BE-System besteht zunächst aus einem zugrundeliegenden Netz (zur Illustration betrachte man etwa die Beispiele in Kap. 1 zunächst ohne die Marken). Ein *case* oder deutsch *Fall* stellt den gegenwärtigen Zustand eines Systems dar, graphisch dargestellt durch eine entsprechende Markenverteilung.

Beispiel

In Abb. 1.1 der Einleitung ist beispielsweise ein System dargestellt, in dem zwei Fälle unterschieden werden können, *ein* Fall besteht aus der Bedingung „aus“, der andere aus der Bedingung „an“. Abbildung 1.9 zeigt ein BE-System in einem Fall bestehend aus den Bedingungen a_{id} , c_a und b_{id} , in Mengenschreibweise $\{a_{id}, c_a, b_{id}\}$.

Die Dynamik eines BE-Systems entsteht nun dadurch, dass nach den Regeln des Markenspiels Fälle in andere Fälle überführt werden.

Beispiel

In Abb. 1.9 könnte man den dargestellten Fall z. B. durch w_a in den Fall $\{a?, c_a, b_{id}\}$ überführen, oder durch w_b in $\{a_{id}, c_a, b?\}$, oder durch l_b in $\{a_{id}, c_b, b_{id}\}$.

Allgemein besteht ein BE-System aus einem *Netz* und einer *Klasse von Fällen*, die bestimmten Erfordernissen genügt. Die einfachste Forderung ist die, dass die Fallklasse gerade aus denjenigen Markenverteilungen besteht, die durch sukzessives Eintreten von Ereignissen aus einem Anfangsfall erreicht werden können.

Für Petri ist bekanntlich die Zeitumkehr im Kleinen besonders wichtig. Im strengen Sinne verlangt er daher für die Fallklasse, dass sie auch unter Rückwärts-Eintreten abgeschlossen sein muss, genauer sogar unter allen gemischten Folgen von Vor- und Rückwärts-Schritten.

Zur Verhaltensbeschreibung von BE-Systemen eignen sich insbesondere die in der Einleitung erwähnten *nichtsequentiellen Prozesse*.

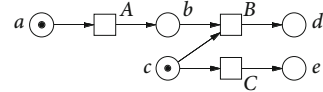
Beispiel

Beispielsweise überführt der in Abb. 1.10 dargestellte Prozess den Fall $\{a_{id}, c_a, b_{id}\}$ in $\{a_{id}, c_b, b!\}$.

Wichtig für das tiefere Verständnis von verteilten Systemen ist, dass Prozesse sowohl Abhängigkeit wie Unabhängigkeit zwischen Ereignissen korrekt abbilden.

6.2 Konfusion

Wie schon in der Einleitung betont, reichen im wesentlichen die drei Grundbegriffe *Nebenläufigkeit*, *Sequenz* und *Konflikt* aus, um das Verhalten von Netzsystemen zu verstehen.

Abb. 6.2 Konfusion

Durch ein besonderes Zusammenspiel aus allen dreien entsteht eine weitere bemerkenswerte Konstellation, die Petri mit dem Namen *Konfusion* belegt hat. Abbildung 6.2 illustriert das typische Abhängigkeitsgeflecht einer solchen Konfusion.

Im dargestellten Fall $\{a, c\}$ sind die Ereignisse A und C aktiviert. Wenn nun C eintritt, geht das System in den Fall $\{a, e\}$ über. Da die Bedingung b nicht gilt, war keine Konfliktentscheidung zwischen B und C nötig. Wenn jetzt noch A eintritt, erreichen wir schließlich den Fall $\{b, e\}$.

Kehren wir noch einmal zum Anfangsfall $\{a, c\}$ zurück, und nehmen jetzt an, dass A eintritt. Dadurch geht das System in den Fall $\{b, c\}$ über. Wie vorhin kann C eintreten und das System in den selben Endfall $\{b, e\}$ überführen. Ein entscheidender Unterschied ist aber, dass *jetzt* ein *Konflikt* zwischen B und C gelöst werden musste.

Wir erhalten also dasselbe Resultat einmal *ohne* und einmal *mit* Konflikt; charakteristisch für die Auflösung einer Konfusion ist, dass sich hinterher nicht feststellen lässt, ob dazu eine Konfliktentscheidung benötigt wurde.

Formal entsteht eine Konfusion also durch ein Wechselspiel zwischen drei Ereignissen A, B, C , für die gilt: (1) A ist strukturell kausaler Vorgänger von B , (2) B steht in potentiellm Konflikt zu C . (3) Ob der Konflikt wirklich wird, wird durch das zu C nebenläufige Ereignis A bestimmt.

Wie weiter unten erläutert werden soll, erweist sich die Konfusion als eines der interessantesten Phänomene verteilter Systeme, nach Ansicht des Autors vielleicht sogar *das* zentrale. Als Petri die Konfusion einführte, war die Netzsprache sicherlich die einzige, in der diese überhaupt präzise formuliert werden konnte (und sie ist vermutlich auch jetzt noch ein „Alleinstellungsmerkmal“ der Netze). Bedauerlicherweise führt die Konfusion dennoch auch in der Netzliteratur nur ein Schattendasein.

Frühe Ansichten über die Konfusion

Ein wichtiger Grund, warum die Konfusion wenig beachtet wurde, liegt möglicherweise darin, dass Petri selbst der Meinung war, man könne ohne auskommen. Lange Zeit hat er die Konfusion nur als Indikator für schlecht entworfene Systeme gesehen. 1973 stellt er in *Concepts of Net Theory* [7] fest: “Fortunately it is easy to avoid confusion by applying well known construction principles.” In *General Net Theory* [10] führt er das 1977 näher aus: “When we encounter such a situation we may conclude that we have drawn the boundary between the system and its environment in an awkward manner and that we should draw it somewhere else in order to reduce confusion to mere conflict resolution. It follows that

we really don't need to set up a theory of confusion – which would indeed be difficult to do. It has, in fact, been tried more than once and seems almost impossible.”

Der tiefere Grund für die Ansicht Petris besteht wohl darin, dass er – wie bereits in Abschn. 5.5 dargelegt – davon ausgeht, dass Konflikte in einem umfassenden Gesamtsystem nicht existieren, sondern in einem System nur deshalb erscheinen, weil der Schnitt zwischen System und Umgebung so gelegt worden ist, dass die zur Konfliktentscheidung notwendige Bedingung außerhalb des (Teil-)Systems zu liegen kam.

Bezüglich der Konfusion stellt sich dann aber die Frage, wie ein Schnitt zwischen System und Umgebung aussehen soll, bei dem (1) einerseits die zur Konfliktlösung notwendige Bedingung *außerhalb* des Systems liegt, (2) andererseits aber möglicherweise *gar kein* Konflikt existiert, so dass folglich in der Umgebung auch gar keine Konfliktlösungsbedingung vorhanden ist. Über ein derart beschaffenes Gesamtsystem und den spezifischen Schnitt zwischen Teilsystem und Umgebung müssen sicher zumindest noch wesentlich weitreichendere Annahmen gemacht werden.

Konfusion in der Literatur

Schützenhilfe bekam Petri von Anatol Holt in einem Artikel *Concurrency and Choice* aus dem Jahr 1977. Holt erkennt, dass in der Konfusion ein „extra factor“ bei der Konfliktlösung mitspielt, und stellt fest: “Thus an extra causal factor, not represented explicitly in choices ... has entered the scene, *namely the factor of relative timing*. ... This ‘extra factor’ is both technically and philosophically unacceptable. It is technically unacceptable because it destroys the possibility of tracing the outcomes of choices to the outcome of other choices ... – one of the key objectives, in my opinion, of an adequate system model.”

Zum philosophischen Stellenwert des Zeitfaktors bemerkt Holt: “Communication and only communication establishes causal connections between choices. Concurrency was to express the relative freedoms that remain in the light of these relative causal constraints.” Laut Holt muss etwas, was auf die Kausalität Einfluss hat, ein Kommunikationsbestandteil sein; und das ist der Zeitfaktor *nicht*. Holts Folgerung ist im Grunde dann die, dass nicht sein kann, was nicht sein darf.

In Petris engerem Umkreis hat die Ansicht, dass die Konfusion zu vermeiden ist und auch vermieden werden kann, dazu geführt, dass man die Untersuchungen oft auf spezielle eingeschränkte Netzklassen konzentriert hat, bei denen Konfusion bereits durch die Konstruktion ausgeschlossen war.

Konfusion ist unvermeidbar

Inzwischen hat sich aber herausgestellt, dass in jedem realen System an den Stellen, wo verschiedene *Teilsysteme synchronisiert* werden, unvermeidlich Konfusion auftritt. Nachdem dies vom Autor mathematisch nachgewiesen worden war [20], hat Petri das einmal in ei-



Abb. 6.3 Der Philosoph Pythagoras zwischen Lehrsatz und eingestürzter Säule. Zeichnung Petris um 2002

nem Gespräch mit ihm so kommentiert: „Früher habe ich gedacht, dass man Konfusion in der Modellierung vermeiden kann. Jetzt behaupte ich das Gegenteil.“

In Kap. 4 über Petris Dissertation hatten wir angemerkt, dass sich in die vermeintlich konfliktfreie Konstruktion des Oder-Gatters möglicherweise ein subtiler Fehler eingeschlichen hätte. Die Begründung kann jetzt nachgeliefert werden: Im Lichte des obigen Resultats muss darin sogar eine Konfusion vorkommen, also *insbesondere* auch ein Konflikt.

In gewissem Sinne kann man die Situation fast als tragisch (in klassischer Bedeutung) auffassen. Das Instrument, das wie kein anderes die scharfe Trennung von Kausalität und Unabhängigkeit ermöglicht, ermöglicht durch seine Präzision auch die Charakterisierung von Konstellationen, wo Kausalität und Unabhängigkeit gerade nicht sauber trennbar sind.

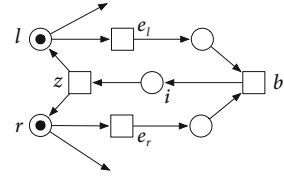
Man kann sich möglicherweise an Pythagoras erinnert fühlen, bei dem durch ein eigenes Resultat die Grundlagen seiner Philosophie in Frage gestellt wurden. Die Pythagoreische Philosophie geht ja davon aus, dass alle Größenerscheinungen der Welt in bestimmten Proportionen zueinander stehen, mathematisch korrespondierend zu Verhältnissen von ganzen Zahlen. Der berühmte Satz des Pythagoras besagt aber das Gegenteil: In einem Quadrat der Kantenlänge 1 lässt sich die Diagonale durch kein Verhältnis von ganzen Zahlen ausdrücken.

Als Resümee der bisherigen Diskussion könnte man sagen, dass die kosmologischen Grundlagen der Philosophie Petris, auf denen die Netzen basieren, nicht leichtfertig von der Hand zu weisen sind. In die praktische Modellierung sollten sie jedoch nicht immer kategorisch übernommen werden. Im Folgenden soll die Konfusion noch in einigen typischen Zusammenhängen beleuchtet werden.

Dijkstra und die Philosophen

Konfusion ist sicherlich ein sehr unerfreuliches Phänomen, aber oft *hat* man nur die Wahl zwischen Pest und Cholera. Wie Petri sich Jahre danach erinnert, saßen er, der berühmte niederländische Informatiker Edsger Dijkstra und ein dritter Informatiker namens Meisel um 1962 an einem heißen Sommernachmittag an einem runden Tisch. Gerade war

Abb. 6.4 Ausschnitt aus dem Philosophen-System mit Einzelgabel-Aufnahme



eine Schüssel Fruchtsalat serviert worden. Zufällig griffen alle drei gleichzeitig nach dem Servierlöffel. Der so entstandene Dreifach-Konflikt konnte natürlich durch gesunden Menschenverstand gelöst werden, stieß aber eine Diskussion über den *Glitch* an, ein kurzer Störimpuls im System, der sich aber selbst korrigiert, und daher die Fehlersuche erschwert. In der Elektronik meint man damit meist eine kurzzeitige Falschaussage in logischen Schaltungen.

Dijkstra und Meisel vertraten die Auffassung, dass ein Glitch aus naturgesetzlichen Gründen unvermeidbar sei, man könne nur versuchen, die Folgen zu minimieren. Petri stimmte im wesentlichen zu, sagte aber, er müsse darüber noch nachdenken. Nach 23 Jahren kam er auf die Lösung: Das Problem war die Konfusion, nicht der Konflikt.

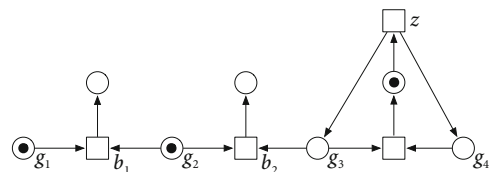
Dijkstra fuhr nach Hause und verallgemeinerte etwa im Laufe einer Woche die Fragestellung, und entwarf daraus das sogenannte *Philosophenproblem* (englisch *Dining Philosophers Problem*).

Fünf Personen sitzen um einen runden Tisch um Spaghetti zu essen. Zwischen ihnen liegt jeweils eine Gabel. Zum Essen benötigen sie aber *zwei*, die linke und die rechte. Im schlimmsten Fall ergreift jeder zuerst seine rechte Gabel. Das System ist in eine *Verklemmung* (englisch *deadlock*) geraten; niemand kann essen. Abbildung 6.4 zeigt die Situation für einen der Teilnehmer.

Für jeden Teilnehmer stellt sich ein Handlungszyklus so dar: Wenn rechte und linke Gabel verfügbar sind (Bedingungen r und l), kann er sie ergreifen, und dann mit dem Essen beginnen (Ereignis b). Er beendet das Essen durch Zurücklegen der Gabeln (Ereignis z). Die beiden zusätzlichen Pfeile, die von r und l weggehen, verweisen darauf, dass für die Nachbarn entsprechende Konstellationen vorliegen, und sie so in Konflikt miteinander stehen. Dabei handelt es sich aber um reine Konflikte ohne Konfusion.

Die Möglichkeit der Verklemmung entsteht offenbar dadurch, dass die Gabeln in zwei getrennten Aktionen aufgenommen werden. Sie kann vermieden werden, wenn das Ergreifen beider Gabeln als *eine unteilbare Aktion* aufgefasst werden kann. Dann tritt aber statt der Verklemmung unweigerlich Konfusion ein. In Abb. 6.5 ist ein Systemausschnitt dargestellt, an dem sich das illustrieren lässt.

Abb. 6.5 Ausschnitt aus dem Philosophen-System mit koinzidenter Gabel-Aufnahme



Der Philosoph links außen – nennen wir ihn Konfusius – bereitet sich aufs Essen vor, beide Gabeln stehen zur Verfügung (Bedingungen g_1, g_2). Vorher will er noch einen Gedanken zu Ende bringen. Er glaubt, keine Eile zu haben, da sein Nachbar ihm die gemeinsame Gabel 2 nicht streitig machen kann, da ja Gabel 3 in Gebrauch ist. Als er dann tatsächlich zugreifen will, ist es zu spät. Der übernächste Nachbar rechts hat zwischenzeitlich seine Gabeln zurückgelegt, wodurch ein Konflikt entstanden ist, den der direkte Nachbar zu seinem Vorteil entschieden hat. Netztheoretisch bilden die drei Ereignisse b_1, b_2, z in dem dargestellten Fall eben eine Konfusion.

In der technischen Wirklichkeit – etwa bei Betriebssystemen – verwenden Standardalgorithmen oft sogenannte *Semaphore* (analog zu Verkehrsampeln) zur Vermeidung von Verklemmung. Dann tritt aber wieder unweigerlich Konfusion auf.

In Fällen, bei denen die Verklemmungsgefahr erfahrungsgemäß äußerst selten auftritt, wird gelegentlich ein besonders einfacher Algorithmus eingesetzt. Wie Andrew Tanenbaum in seinem Standardwerk über Betriebssysteme zu berichten weiß, benutzt man dann den *Vogel-Strauß-Algorithmus*, der darin besteht, das Problem zu ignorieren und den Stecker zu ziehen, wenn es doch einmal eintritt.

Konfusion in der informatischen Praxis ...

Tatsächlich ist die Konfusion in der Praxis nahezu allgegenwärtig.

Sieht man sich das Modell des Druckerzugriffs in Abb. 1.9 der Einleitung noch ein Mal an, wird man erkennen, dass in der unmittelbaren Umgebung der Kopplungsstelle c_a Konfusion vorkommt. Man braucht dazu nur das System aus Abb. 6.2 zu projizieren: A auf w_a , B auf h_a und C auf l_a . In einem anderen Fall des Systems erkennt man entsprechend eine Konfusion um c_b .

Wenn man also Konfusion akzeptieren muss, muss man sich auch überlegen, wie man damit umgeht. Ein Modell wie in Abb. 1.9 wird immer Konfusion enthalten, egal wie kompliziert man es aufbaut. Eine Möglichkeit könnte darin bestehen, in der unmittelbaren Umgebung der Konfusion gewissen Transitionen Vorrang bei einer Konfliktentscheidung einzuräumen. Dazu später mehr.

... und im Alltag

Aber auch im wirklichen Leben lassen sich oft schwer auffindbare Fehler letztlich auf eine Konfusion zurückführen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts stießen Mitarbeiter des Petri-Instituts unter Leitung von Gernot Richter Mitte der 80er Jahre auf das folgende Problem:

In einer öffentlichen Kinderkrippe in England gab es die Regel, dass ein Kind seinen Platz räumen musste, falls die Eltern mit ihren finanziellen Beiträgen in Rückstand gerieten. Die Kindergärtnerin konnte aber in Härtefällen selbstverantwortlich auf den Ausschluss

der Kinder säumiger Eltern verzichten. Bei der Jahresendabrechnung tadelte die Aufsichtsbehörde die Kindergärtnerin, sie hätte viel zu oft von der Ausnahmemöglichkeit Gebrauch gemacht. Diese widersprach heftig. Bei der daraufhin erfolgten Analyse des Verfahrens zeigte sich, dass dem Ganzen eine Konfusion zugrunde lag, die genau der Abb. 6.2 entspricht, wenn man das Netz wie folgt interpretiert:

C bedeutet, dass die Kindergärtnerin das Kind *regulär* für den nächsten Monat zulässt; B , dass sie es aufgrund der *Ausnahmeregel* tut. Das Ereignis A modelliert das Eintreffen der Benachrichtigung über den Zahlungsverzug. Es zeigte sich, dass die zentrale Kasse der Stadt von der Sonderregelung nichts wusste, und so die Kindergärtnerin die Benachrichtigung über Zahlungsverzögerung in der Regel erst nach drei Monaten erhielt (Eintritt von A). Die Vorbedingung für die Entscheidung war nicht erfüllt, so dass die Kindergärtnerin weder Anlass noch Möglichkeit hatte, von der Ausnahmeregel B Gebrauch zu machen.

6.3 Kontakt

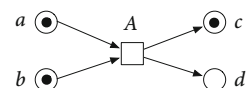
Ereignisse können eintreten, wenn sie aktiviert sind: Die Vorbedingungen müssen erfüllt sein, *und* zugleich darf auch keine Nachbedingung bereits gelten. Beispielsweise ist das Ereignis A in Abb. 6.6 *nicht* aktiviert, obwohl beide Vorbedingungen a und b erfüllt sind, weil eben auch eine Nachbedingung c gilt.

Diese spezifische Ausprägung der Aktivierungsregel geht auf die in der Dissertation gewonnene Erkenntnis Petris zurück, dass eine Aktion Eingangssignale in Ausgangssignale *transformiert*. Eine Bedingung, die bereits *gilt*, kann nicht durch ein Ereignis *gültig gemacht* werden. Petri bezeichnet dies als *Extensionalitätsprinzip*, und meint damit, dass ein Ereignis durch die Veränderung, die es bewirkt, vollständig bestimmt ist. Könnte also A in Abb. 6.6 eintreten, würde es $\{a, b, c\}$ in $\{c, d\}$ überführen. Daraus könnte man nach dem Extensionalitätsprinzip folgern, dass es sich in Wirklichkeit um ein Ereignis gehandelt hat, das $\{a, b\}$ in $\{d\}$ überführt.

In dem Artikel *Concepts of Net Theory* [7] bezeichnet Petri die in Abb. 6.6 dargestellte Situation als *Kontakt*. Er erläutert sie so: “An elementary particle can not occupy the space already occupied by another one, but a car unfortunately can, and so can a record of data.”

Petri meint damit, dass eine Kontaktsituation auf niedrigster Ebene physikalisch unmöglich ist, auf einer höheren Ebene aber die Möglichkeit eines Fehlverhaltens beschreibt. Da sein Modell auf allen Ebenen anwendbar sein soll, kann er sich mit der Idee des Kontakts nicht richtig anfreunden. Er stellt fest, dass für ein Ereignis e in einer Kontaktsituation gilt: “We say that an occurrence of e would violate our definitions ... On a higher level a violati-

Abb. 6.6 Kontakt. A ist nicht aktiviert, weil eine Nachbedingung c bereits gilt



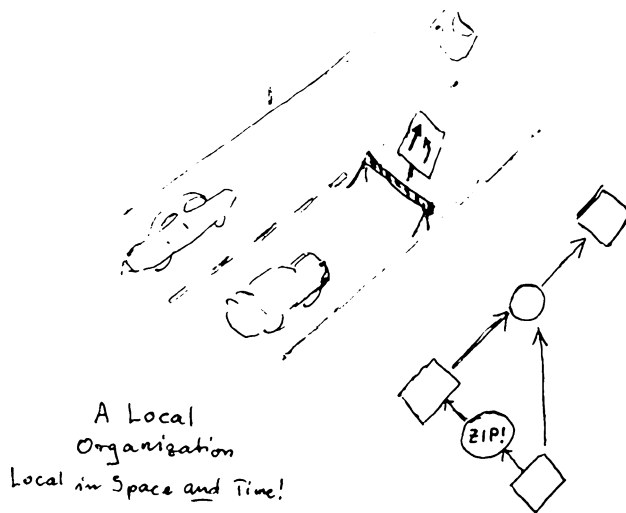


Abb. 6.7 Kontaktgefahr. Zeichnung Petris um 2002



Abb. 6.8 Eisenbahnsystem mit Zügen in den Gleisabschnitten a und c

on means a violation of the rule of the game.” Ähnlich wie bei der Konfusion geht er davon aus, dass Kontakte von schlechter Modellierung herrühren.

Petris Ansichten über Kontakte sind oft dahin gehend interpretiert worden, dass man diese aus dem Modell verbannen sollte, was ja auch technisch durch die sogenannte *Komplementbildung* für Stellen leicht möglich ist. Man erhält dadurch ein verhaltensgleiches System, bei dem aber jetzt jede *Nachbedingung* a , die für einen Kontakt verantwortlich ist, durch eine zusätzliche *Vorbedingung* $\bar{a}$ ergänzt wird, die gerade dann *nicht* erfüllt ist, wenn a es ist.

Eine Folge dieses Ansatzes ist aber, dass dadurch die Ausdrucksmächtigkeit des Netzmodells deutlich eingeschränkt wird.

Beispiel

Zur Illustration möge das in Abb. 6.8 dargestellte Modell eines Eisenbahnsystems dienen.

Die Strecke ist in Abschnitte a bis d eingeteilt. Gegenwärtig befinden sich zwei Züge in den Abschnitten a und c . Wenn jetzt der hintere Zug in den Abschnitt b einfährt, besteht möglicherweise eine Auffahrgefahr auf den im benachbarten Abschnitt c befindlichen Zug. Dies wird durch die Kontaktsituation im Fall $\{b, c\}$ dargestellt. Die durch das Vorliegen des Kontakts erkannte potentielle Gefahr kann jetzt zum Anlass genom-

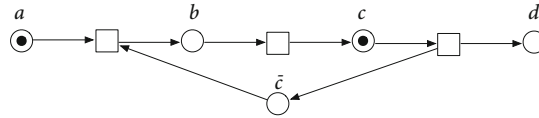


Abb. 6.9 Eisenbahnsystem aus Abb. 6.8 mit Auffahrtschutzmechanismus

men werden, in dem *wirklichen* System Maßnahmen zu ergreifen, die ein Auffahren technisch verhindert.

Das Modell des um *real implementierte* Auffahrtschutzmechanismen an den Gleisen modifizierten Systems könnte dann etwa aussehen wie in Abb. 6.9. Die Bedingung $\bar{c}$ gibt an, ob Abschnitt c frei ist.

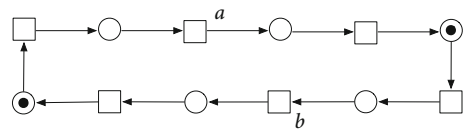
Wie in dem Beispiel illustriert, scheint es nicht sinnvoll, Kontaktsituationen im Netzmodell voreilig wegzudefinieren. Sie sind im Gegenteil von großem Nutzen bei der Erkennung von möglichem Fehlverhalten. Physikalisch *können* zwei Dinge *nicht* zur selben Zeit am selben Ort sein. Es mag aber sinnvoll sein, bereits den *Versuch* zu verhindern – wie das Drängen eines Zuges auf den belegten Gleisabschnitt.

6.4 Synchronieabstand

Wenn Ereignisse nebenläufig zueinander eintreten können, ergibt sich unmittelbar die Frage nach einem *quantitativen* Maß der Unabhängigkeit bzw. Kopplung. In *Interpretations of Net Theory* [8] führt Petri dazu den Begriff des *Synchronieabstands* $\sigma(a, b)$ zwischen Ereignissen a und b ein, der besagt, wie oft eins der Ereignisse höchstens eintreten kann, bevor das andere zum Zuge kommen muss.

In dem aus *Interpretations* [8] entlehnten System in Abb. 6.10 ist etwa $\sigma(a, b) = 2$. (Allgemein definiert Petri den Synchronieabstand sogar zwischen zwei *Mengen* von Ereignissen.) Die Idee war, dass sich aus dem Synchronieabstand mathematisch gesehen eine sogenannte *ganzzahlige Metrik* entwickeln ließe. Dieser Ansatz hat sich aber nicht als so tragfähig erwiesen, wie zunächst erhofft, hauptsächlich deshalb, weil die für eine Metrik wesentliche Dreiecksungleichung $\sigma(a, c) \leq \sigma(a, b) + \sigma(b, c)$ nur in vergleichsweise einfachen Systemen zutrifft. Der Ansatz ist auch später nicht entscheidend weiterentwickelt worden.

Abb. 6.10 Synchronieabstand
 $\sigma(a, b) = 2$



6.5 Enlogische Struktur

Ebenfalls in *Interpretations of Net Theory* und auch in *Nicht-sequentielle Prozesse* [9] finden wir eine deutlich tragfähigere Analyse- und Spezifikationsmethode. Sie beruht auf der formalen Einführung einer zusätzlichen Art von Transitionsformen – *hypothetischen gedachten* Transitionen – und der Untersuchung, welche Konsequenzen diese für das Systemverhalten hätten.

Beispiel

Zur Illustration betrachten wir das Druckersystem in Abb. 1.9 der Einleitung, und stellen uns eine zusätzliche Transition h'_a vor, die wie das echte Ereignis h_a aussieht, außer dass h'_a noch zusätzlich c_b als Ausgangsbedingung hat. Wenn jetzt h'_a im Fall $\{a?, c_a, b_{id}\}$ einträte, würde dadurch die Bedingung $a!$ erfüllt werden, der exklusive Zugriff auf den Drucker also dem Akteur a gewährt werden. Aber auch Bedingung c_b wäre jetzt erfüllt, die dem Akteur b fälschlicherweise auch Verfügbarkeit anzeigt.

Eine solche Transitionsform, die *mindestens einen* Fall in einen Nicht-Fall (korrespondierend zu einer eigentlich nicht erreichbaren Markenverteilung) überführt, nennt Petri *Violation*. Eine Transitionsform, die dagegen *immer* nur Fälle in Fälle überführen würde, bezeichnet er als *Process-Extension*. Insgesamt unterscheidet er 16 Typen von derartigen Transitionsformen. Diese charakterisieren dann die sogenannte *Enlogische Struktur* des Systems.

Facts

Von besonderem Interesse sind die sogenannten *Facts*, „tote“ Transitionsformen, die in *keinem* Fall des Systems eintreten könnten. Zur Illustration stelle man sich etwa Abb. 6.9 um eine Transition ergänzt vor, die b und c als Vorbedingungen hat. Diese könnte nie eintreten, da ja b und c konstruktionsbedingt nie gemeinsam erfüllt sind. Facts können aber auch für die Spezifikation von *gewünschtem* Verhalten verwendet werden. Zur Unterscheidung bezeichnet man diese gern als *Soll-Facts*. Würde man in Abb. 6.8 eine entsprechende Transitionsform mit Eingängen b und c hinzufügen, wäre sie eine Violation, aber sie kann auch als Soll-Fact verstanden werden mit der Bedeutung: Bitte das System so verändern, dass sie tatsächlich ein (Ist-)Fact wird.

Facts beschreiben aussagenlogische Invarianten des Systems. Sie enthalten als Unterklasse die sogenannten unreinen Transitionen, bei denen die Mengen der Vor- und Nachbedingungen nicht disjunkt sind. Diese entsprechen dann den aussagenlogischen Tautologien mit den Systembedingungen als Variablen. Für die Facts lassen sich die üblichen Umformungsregeln der Aussagenlogik anwenden, woraus sich dann ein umfassender logischer Invariantenkalkül für Netze entwickeln lässt. Dies ist in den 70er Jahren im Petri-Institut der GMD insbesondere von Gerda Thieler-Mevissen ausgearbeitet worden.

6.6 Stellen-Transitions-Netze

Der Begriff Petrinetz wird allgemein als Sammelbegriff für alle Netzmodelle verwendet, die sich auf Petris Ansatz zurückführen lassen. Als wesentliche Merkmale werden meist gesehen: Die zugrundeliegende Struktur besteht aus einem bipartiten gerichteten Graphen. Elemente der einen Sorte S werden als Datenträger interpretiert, die der anderen Sorte T als Aktionen, durch die die Daten auf den verbundenen S -Elementen bearbeitet werden.

Die Bezeichnung Petrinetz wird aber auch für eine spezielle Netzklasse verwendet, die Petri in *Interpretations of Net Theory* [8] unter dem Namen *Stellen-Transitions-Netze* (ST-Netze) eingeführt hat. Im Unterschied zu Bedingungs-Ereignis-Systemen, können bei ST-Netzen die Stellen eine Anzahl > 1 von Marken aufnehmen. Entsprechend können Transitionen so eingerichtet sein, dass sie in *einem* Schaltvorgang jeweils mehr als eine Marke abziehen oder hinzufügen. Man beachte auch die unterschiedliche Redeweise: In BE-Systemen treten Ereignisse ein, in ST-Netzen sagt man eher, dass *Transitionen schalten*. Auch spricht man nicht von *Fall*, sondern eher von *Markierung*.

Beispiel

Abbildung 6.11 zeigt ein Erzeuger-Verbraucher-System, bei dem der Erzeuger seine Produkte in einem Lager ablegt, aus dem der Verbraucher sie dann entnehmen kann.

Gegenwärtig enthält das Lager vier Produkteinheiten, gekennzeichnet durch die vier Marken. Der Verbraucher entnimmt dem Lager jeweils zwei Einheiten, gekennzeichnet durch die Inschrift 2 an der verbindenden Kante.

Inzidenzmatrix

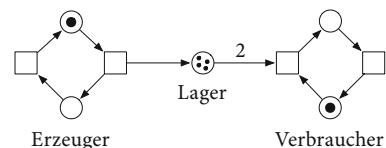
ST-Netze werden auch häufig durch ihre sogenannte *Inzidenzmatrix* dargestellt.

Beispiel

Abbildung 6.12 illustriert die Idee an einem einfachen Beispiel.

Die Inzidenzmatrix A besteht aus Einträgen, die die Wirkung der Transitionen beschreiben. Schalten von t_1 zieht beispielsweise jeweils eine Marke von den Stellen s_1 und s_2 ab, und legt dafür zwei Marken auf die Stelle s_3 . Ganz rechts ist die im Netzbild durch Marken dargestellte Anfangsmarkierung m_0 in der Schreibweise als Spaltenvektor angegeben.

Abb. 6.11 Erzeuger-Verbraucher-System



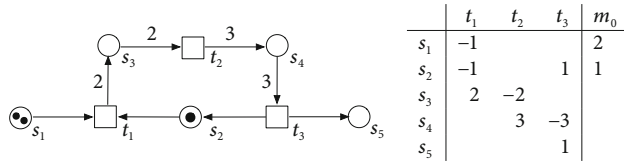


Abb. 6.12 ST-Netz, Incidenzmatrix A und Anfangsmarkierung m_0

S-Invarianten

Die Incidenzmatrix ist die Grundlage für eines der Arbeitspferde der Netztheorie, die Systemanalyse mit S -Invarianten. Eine S -Invariante ist ein Spaltenvektor i mit einem ganzzahligen Eintrag ≥ 0 für jede Stelle, so dass für die Matrixmultiplikation gilt: $i^T \cdot A = 0$.

Beispiel

Eine S -Invariante des Netzes in Abb. 6.12 ist z. B. $i^T = (0, 6, 3, 2, 0)$.

S -Invarianten können u. a. verwendet werden, um *Nicht*-Erreichbarkeit nachzuweisen. Es gilt nämlich für eine S -Invariante i , der Anfangsmarkierung m_0 und eine daraus erreichbare Markierung m für das skalare Produkt stets $i^T \cdot m_0 = i^T \cdot m$.

Beispiel

Im obigen Beispiel ist die Markierung $m^T = (2, 1, 0, 1, 0)$ nicht erreichbar; es gilt

$$i^T \cdot m_0 = (0, 6, 3, 2, 0) \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 6 \neq 8 = (0, 6, 3, 2, 0) \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = i^T \cdot m.$$

Eine S -Invariante i ordnet den Stellen also bestimmte Gewichte zu (im Beispiel der Stelle s_1 das Gewicht 0, der Stelle s_2 das Gewicht 6 usw.), so dass die derart gewichtete Markensumme durch das Schalten von Transitionen nicht verändert wird. Tatsächlich ist es für die angesprochene Nicht-Erreichbarkeits-Analyse nicht einmal erforderlich, dass der Vektor i nur ganzzahlige Einträge ≥ 0 enthält; jede Lösung i des Gleichungssystems $i^T \cdot A = 0$ erfüllt auch $i^T \cdot m_0 = i^T \cdot m$ für alle aus m_0 erreichbaren Markierungen m .

„Petrinetze“

Petri selbst misst den ST-Netzen eine eher untergeordnete Bedeutung zu. Er betrachtet sie nur am Rande, beispielsweise in *Interpretations of Net Theory* [8] und *General Net Theory* [10] bei der Charakterisierung des Synchronieabstands $\sigma(a, b)$ zwischen Ereignissen a

und b in Bedingungs-Ereignis-Systemen. Dazu kann man nämlich eine zusätzliche Stelle zwischen a und b einfügen, und sich fragen, mit wie vielen Marken diese mindestens belegt sein muss, um das Verhalten des Ausgangssystems nicht zu behindern.

In gewissem Sinne sind die ST-Netze sogar mit Petris Grundpostulat unverträglich: Bereits in seiner Dissertation betont er, dass kein realer Speicher beliebig große natürliche Zahlen aufnehmen kann. Mit Stellen unbegrenzter Kapazität kommt der Widerspruch zu realistischen physikalischen Annahmen aber durch die Hintertür wieder rein.

In einer auf englisch formulierten Notiz hat Petri sein Unbehagen mit den *Place-Transition-Nets* (englisch für ST-Netze) einmal so ausgedrückt: “We avoid ‘place’ as used in net literature. ‘Places’ are supposed to be capable of infinite size; and thus admissible as stores for natural numbers. This has led to grave misconceptions and errors in the assessment of the theoretical potential of net theory, and has severely harmed its development. The term evokes misleading associations, and is really a mistranslation of the German ‘Stelle’, which has been used to suggest *ST*ate *EL*ement by abbreviation. ‘Place’ has no place in net theory.”

Für Petri bilden die Bedingungs-Ereignis-Systeme die fundamentale Netzklasse. Daher ist es schon ein wenig paradox, dass es nicht sie, sondern die ST-Netze sind, die heute mit seinem Namen verbunden werden. In der weltweiten Anwendung spielen aber die ST-Netze eine deutlich wichtigere Rolle als BE-Systeme. Das ist dann letztlich auch der Grund, warum gerade sie mit dem Prädikat „Petri“ ausgezeichnet wurden.

6.7 Verbreitung

Wie erwähnt, wurden die Netztheorie und ihre Anwendungen in den frühen 1970er Jahren zuerst in den USA stark vorangetrieben, insbesondere durch die Computation Structure Group am MIT. Dort wurde auch 1975 die erste Konferenz mit Bezug zu Netzen durchgeführt.

Advanced Course Hamburg 1979

In Europa kam der Durchbruch 1979, als im Oktober ein zweiwöchiger *Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems* in Hamburg abgehalten wurde, in dem der damalige Stand der Entwicklung der wissenschaftlichen Öffentlichkeit und interessierten Anwendern vorgestellt wurde. Initiator und Leiter der Tagung war Prof. Wilfried Brauer, der auch im weiteren einer der großen Förderer der Petrinetze bleiben sollte. Brauer war in den 60er Jahren an der Universität Bonn tätig, wo er sich nach der Promotion in Mathematik der Automatentheorie zuwandte. Er war so schon seit längerem mit den Petrinetzen vertraut.

Bei der Tagung waren über 100 Teilnehmer aus 17 hauptsächlich europäischen Ländern anwesend. Veröffentlicht wurden die Beiträge als Nummer 84 der noch recht jungen Reihe

der *Lecture Notes in Computer Science* im Springer-Verlag. (Die Serie ist inzwischen etwa bei Nr. 7000 angekommen.)

Die damals zentralen Mitarbeiter Petris in der GMD, Hartman Genrich, Kurt Lautenbach und P. S. Thiagarajan (ausgeschrieben steht P. S. für Pazhamaneri Subramaniam) dokumentierten die Grundlagen der Netztheorie in einem etwa 130 Seiten umfassenden Artikel *Elements of General Net Theory*. Genrich und Lautenbach hatten bereits im Institut für Instrumentelle Mathematik der Universität Bonn mit Petri zusammengearbeitet, Thiagarajan kam 1975 vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) zur GMD.

Petri hielt zwei Vorträge *Introduction to General Net Theory* und *Concurrency*. Auf die darin behandelten Themen werden wir weiter unten zu sprechen kommen. Der Computer-Pionier Konrad Zuse stellte die Bedeutung der Petrinetze vom Standpunkt des Ingenieurs dar. Die Beziehung zwischen Zuse und Petri wird in einem eigenen Abschnitt beleuchtet.

Auswirkungen

In der Folge des Advanced Courses wurde nun ganz deutlich, was oben schon angesprochen wurde: Es waren die Petrinetze im Sinne der Stellen-Transitions-Netze, die von Anwendern wie Theoretikern begierig aufgegriffen wurden. Man bekam nun die Möglichkeit, Systeme mit verteilten Ressourcen intuitiv ansprechend darzustellen, gleichzeitig entwickelten sich mathematische Methoden u. a. zur bereits angesprochenen Erreichbarkeitsanalyse. Die Matrix-Darstellung erlaubte es, die Theorie der linearen Algebra in der Systemanalyse anzuwenden. Es begann die Entwicklung mächtiger Netz-basierter Simulationswerkzeuge.

Die Welle war so kräftig, dass die Bedingungs-Ereignis-Systeme der „reinen Netzlehre“ in den Hintergrund gedrängt und als ein Spezialfall der ST-Netze gesehen wurde, in etwa so, wie man in modernen Programmiersprachen logische Werte durch die Zahlen 0 und 1 darstellt und so gleichsam als unnötige Einschränkung der umfangreichen Arithmetik ansieht.

Die fundamentale Ebene der Netze, die auf der Logik von „erfüllt-sein“, „nicht erfüllt-sein“ von Bedingungen beruht, wurde hauptsächlich im engeren Petri-Umfeld bearbeitet. Bedingungs-Ereignis-Systeme befassen sich in diesem Sinn mit *veränderbaren Wahrheitswerten* von Aussagen. Von Mitarbeitern im Petri-Institut, insbesondere Hartmann Genrich und Kurt Lautenbach, wurde dieser Ansatz dann ausgeweitet zu Netzen, bei denen die Stellen zu *Prädikaten mit veränderbarer Extension* wurden, und so der Schritt vollzogen wurde wie der in der Logik von der Aussagenlogik zur Prädikatenlogik. Logisch zwar sauber, blieb aber für die Anwender die Einschränkung der Zweiwertigkeit: Ein Prädikat trifft zu oder auch nicht, es gibt keine Vielfachheiten. In Praktikerkreisen setzten sich dann Netze durch, die wie die ST-Netze aufgebaut waren, mit Vielfachheiten der Marken, aber außerdem auch mit verschiedenen *Typen* von Marken, anschaulich charakterisiert durch verschiedene „Farben“.

Die unterschiedlichen praxisorientierten Netzklassen sind in der Literatur ausführlich dokumentiert, so dass wir uns in der vorliegenden Darstellung weiterhin hauptsächlich auf Petris eigenes Werk konzentrieren können.

Die jährliche Petrinetz-Konferenz

1980 wurde in Strasbourg in Frankreich der *First European Workshop on Application and Theory of Petri Nets* veranstaltet, eine seitdem jährlich stattfindende Konferenz. Der zweite, 1981 in Bad Honnef in unmittelbarer Nachbarschaft des Petri-Instituts in Sankt Augustin, war gewissermaßen ein Heimspiel. Später wurde die Konferenz umbenannt in *International Conference on Application and Theory of Petri Nets*, um der wachsenden weltweiten Bedeutung der Netze gerecht zu werden. Außerhalb Europas fand sie das erste Mal 1993 in den USA in Chicago statt, seitdem u. a. auch in Japan, Australien und China.

Bücher

Anfang der 80er Jahre wurden die ersten Lehrbücher über Petrinetze veröffentlicht, in den USA *Petri Net Theory and the Modelling of Systems* von James Peterson, das dort einen großen Einfluss auch auf Nicht-Informatiker bekommen sollte. In der Bundesrepublik erschien *Petrinetze. Eine Einführung* von Wolfgang Reisig, in der DDR *Petrinetze: Grundlagen, Anwendungen, Theorie* von Peter Starke.

Inhaltsverzeichnis

7.1 Faltungen 69

7.2 Netz-Topologie 72

7.3 Petri und Zuse 73

Die Anwendungsreife der Netze ist also unter Beweis gestellt und erfordert nicht mehr dringlich das persönliche Eingreifen Petris. Er kann sich so dem weiteren Ausbau der Grundlagen widmen. Dabei geht es ihm letztlich darum, ausgehend von den Phänomenen *Verteiltheit* und *Unabhängigkeit*, eine Axiomatik der Nebenläufigkeit und der Theorie verteilter Systeme allgemein zu entwickeln. Wie beispielsweise 1978 in *Concurrency as a Basis of System Thinking* [12] dargelegt, handelt es sich bei diesem Programm um die systematische Durchdringung einer Folge begrifflicher Niveauebenen und deren Wechselbeziehungen (siehe Abb. 7.1).

7.1 Faltungen

Zur Durchführung des Programms ist es insbesondere erforderlich, verschiedene Netzebenen zueinander in Beziehung setzen zu können.

Ein typisches Beispiel für die Beziehung zwischen Netzebenen haben wir schon gesehen: Wie schon mehrfach erwähnt, wird das Verhalten von Bedingungs-Ereignis-Systemen durch nichtsequentielle Prozesse beschrieben, die – wieder in Netzform – die einzelnen Vorkommen von Ereignissen und Bedingungen samt ihrer strukturellen Abhängigkeiten und Unabhängigkeiten repräsentieren. Zur Erinnerung sei auf das System in Abb. 1.9 und den Prozess in Abb. 1.10 in der Einleitung verwiesen.

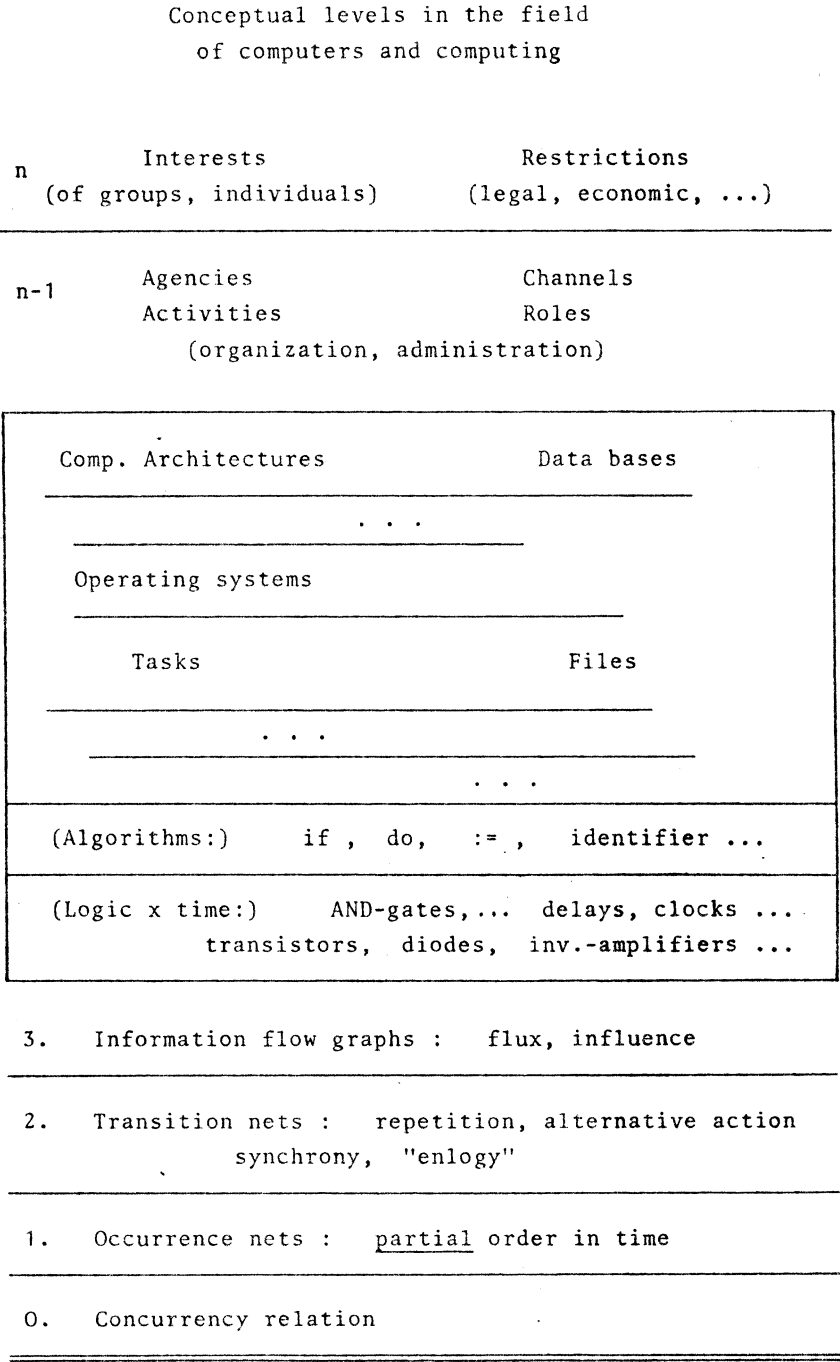


Abb. 7.1 Petris Begriffliche Niveauebenen der Informatik [12]

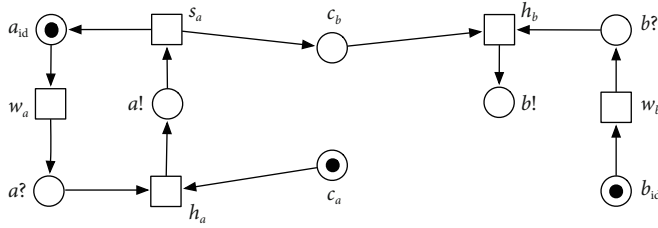


Abb. 7.2 System gefaltet aus dem Prozess in Abb. 1.10

Formal handelt es sich bei einem solchen nichtsequentiellen Prozess um eine *Entfaltung* des Systems, die aber auch wieder umgekehrt werden kann. Faltet man etwa den Prozess in Abb. 1.10 so zusammen, (1) dass gleich benannte Elemente aufeinander zu liegen kommen (in diesem speziellen Beispiel können nur die beiden Vorkommen von a_{id} zusammengelegt – mathematisch: *identifiziert* – werden, alle anderen kommen jeweils nur ein Mal vor), (2) wählt dann eine beliebige maximale Menge unabhängiger Bedingungen in der Prozessstruktur (in dem Beispiel etwa das erste Vorkommen von a_{id} , und c_a und b_{id}), und (3) markiert diese in dem zusammengefalteten Netz, erhält man wieder ein Bedingungs-Ereignis-System. Dies ist in Abb. 7.2 dargestellt.

In dem Prozess in Abb. 1.10 kommen nicht alle Elemente des Systems vor, die Faltung erzeugt daher auch nur ein *Teilsystem* des ursprünglichen. Wenn aber der Prozessablauf so umfassend ist, dass jedes Systemelement mindestens ein Mal darin vorkommt, wird das ursprüngliche Trägersystem vollständig zurückgewonnen. Es dürfte keine Schwierigkeiten bereiten, den Prozess in Abb. 1.10 so zu einem Prozess zu verlängern, der das ganze System überdeckt.

Petri selbst beschreibt die Beziehung zwischen Prozess, System und Faltung in *Interpretations of Net Theory* [8] so: “The occurrences of conditions and events form a net ...; it can be mapped ... to the underlying condition event net”. In *Nicht-sequentielle Prozesse* [9] spricht Petri von den „Kausalnetzen eines realen Prozessablaufs, also stellenunverzweigte unmarkierte Netze, die sich auf das System falten lassen und somit einen Ablauf beschreiben.“

Zur Illustration von Faltungen sind wir oben von einem existierenden System ausgegangen, und haben gesehen, wie man das System durch Faltungen *zurückgewinnen* kann. Umgekehrt kann man aber auch ohne Bezug zu einem bereits vorliegenden System ein gewünschtes Verhalten durch Angabe von Prozessen *spezifizieren* und die Frage stellen, wie ein System aussehen kann, in dem die vorgegebenen Prozesse ablaufen können. In vielen Fällen kann man dann geeignete Systeme tatsächlich durch Faltungen der Prozesse formal erzeugen.

In Kapitel 6.3 hatten wir Kontaktsituationen diskutiert, in denen ein Ereignis nur deshalb nicht aktiviert ist, weil eine Nachbedingung bereits gilt. Petri hat die Ursache von Kontakten gelegentlich darauf zurückgeführt (etwa in *Concepts of Net Theory* [7]), dass bei der Systemkonstruktion unsachgemäße oder ungeschickte Faltungen vorgenommen wurden.

7.2 Netz-Topologie

Entfaltung und Faltung sind also zueinander invers. In einem allgemeineren Sinn handelt es sich bei den Faltungen um einen Sonderfall bestimmter stetiger Abbildungen zwischen Netzen. Petri erläutert das u. a. in *General Net Theory* [10] näher. Gemäß der mathematischen Disziplin der Topologie bezeichnet er Teilmengen von Netzen, deren *Rand* nur aus *Stellen* besteht, als *offen*. Dabei gehört ein Element zum Rand der Teilmenge, wenn es eine Kantenverbindung nach außen besitzt.

Zur Illustration sehe man sich etwa noch einmal Abb. 1.9 in der Einleitung an. Beispielsweise ist die Teilmenge M , die aus $a?$, h_a , $a!$, c_a besteht, offen. Zum Rand gehören die *Stellenelemente* $a?$, $a!$, c_a , nicht aber h_a , denn h_a ist nur mit Elementen *innerhalb* von M verbunden. Die Teilmenge $\{a?, h_a, c_a\}$ ist dagegen nicht offen, weil jetzt das *Transitionselement* h_a zum Rand gehört.

Die Klasse der offenen Mengen legt dann auf den Netzen eine sogenannte *Topologie* fest, mit der u. a. der von den reellwertigen Funktionen bekannte Begriff der Stetigkeit verallgemeinert werden kann.

Die aus den stellenberandeten Teilnetzen generierte Topologie hat zwei von Petri definierte Eigenschaften. Sie ist *primitiv* und *elementar* (zur Erläuterung siehe unten). Die bezüglich dieser Topologie stetigen Abbildungen zwischen Netzen nennt er *Netz-Morphismen*. In diesem Sinne sind Faltungen dann tatsächlich besondere Morphismen. Der Begriff der Morphismen erlaubt auch weitere Zusammenfassungen, z. B. das Zusammenziehen eines stellenberandeten Teilnetzes auf eine einzige Bedingung. Die mit Abstand wichtigsten Morphismen sind aber die Prozessfaltungen. Die allgemeine Theorie der Netz-Topologie ist in den 1970er Jahren insbesondere von Petris Mitarbeitern in der GMD ausgearbeitet und dokumentiert worden, siehe etwa *Net Topology* [2] von César Fernández.

Petri, Hirzebruch und die reine Mathematik Daran, wie er auf die Kennzeichnung seiner Topologie als primitiv und elementar kam, erinnert Petri sich später so:

Als ich 1959 ans Mathematische Institut nach Bonn kam, empfing mich Hirzebruch ganz herzlich. Da ich nur zu gut wusste, dass Professoren der reinen Mathematik mit Verachtung auf Datenverarbeiter hinabblickten, war ich durch den warmen Empfang gerührt. Bald ging ich in den Hörsaal, wo Hirzebruch über Topologie vorlas. Ich verstand nicht ein einziges Wort; ich hatte mein Mathematikstudium beendet, und hatte nie von Topologie gehört. Ich hatte Angst.

Später sah ich in einer Glasvitrine ein Drahtmodell, das für einen Beweis einer Problemlösung in elf Dimensionen stand! Eine kombinatorische Einsicht! Ein Drahtspielzeug als Beweis. Ich beschloss sofort, Topologie zu studieren. Vier Jahre später schrieb ich ein Papier und wollte es für den Hausdorff-Preis einreichen. Ich traute mich nicht, zu Hirzebruch zu gehen, er war bereits damals weltberühmt. So zeigte ich mein Papier seinen Assistenten. Sie fertigten mich erbarmungslos ab, und sagten, dass meine Ideen *primitiv* und *elementar* seien. Ich habe diese Botschaft zu Herzen genommen. Ich habe nicht geruht, bis ich „primitiv“ und „elementar“ vernünftig in Formeln fassen und den Satz beweisen konnte, dass Netz-Topologien gerade die primitiven und elementaren sind.

Abb. 7.3 Petri mit Möbiusband (vgl. auch Abb. 2.1) und selbst durchdringenden Flächen



Petri nennt eine Topologie *primitiv*, wenn jede Einermenge entweder offen oder abgeschlossen ist, *elementar*, wenn die abgeschlossenen Mengen ebenfalls eine Topologie bilden.

Später hat sich Petri dann mit noch abstrakteren Strukturen beschäftigt, den sogenannten Kategorien, bei denen Morphismen ebenfalls eine zentrale Rolle spielen. Im Umfeld der University of California, Los Angeles soll er sogar das Kürzel UCLA in die Aufforderung übersetzt haben: *Use Category Language*.

Wie sich in den Folgejahren gezeigt hat, kann man die Netztheorie tatsächlich auch sehr gut ohne komplexe Begriffe aus der Topologie und Kategorientheorie verstehen.

Eine wichtige Rolle sollte die Topologie aber sicher spielen, nämlich in der Vermittlung zwischen dem vermeintlich grenzenlosen „Rechnenden Raum“ Konrad Zuses und einer endlichen Darstellung.

7.3 Petri und Zuse

Konrad Zuse (1910–1995) ist einer der großen Pioniere der Informationsverarbeitung in Deutschland. Er ist der Erfinder und Erbauer des weltweit ersten programmgesteuerten Computers, der Z3 aus dem Jahre 1941 (auf den ihm, wie Petri einmal bemerkt, ein Patent verweigert wurde – „wegen mangelnder Erfindungshöhe“!). Zur Programmierung entwickelte Zuse zwischen 1943 und 45 die erste höhere Programmiersprache, das sogenannte *Plankalkül*.

Mit seinem Plankalkül führte er später einige Arbeiten für die Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung durch. 1972 erschien seine Veröffentlichung *Das Plankalkül* als Schrift der GMD. In der GMD wurde die Arbeit dann auch ins Englische übersetzt und als *The Plankalkül* veröffentlicht. Allerdings konnte Zuse sich im angelsächsischen Raum



Abb. 7.4 Petri und Zuse 1975

nicht richtig durchsetzen; da gelten andere als Erfinder von Computern und Programmiersprachen.

Rechnender Raum In späteren Jahren wandte Zuse sich dann den theoretischen Grundlagen der Computertechnik zu. Wie Petri stellte er sich die Frage, ob man die physikalischen Naturgesetze nicht direkt für die dauerhafte Stabilität von Computern heranziehen könnte, kam aber zu der umgekehrten Frage, ob es nicht einfacher wäre, die physikalische Natur direkt in der Sprache des Computer-Ingenieurs neu zu beschreiben. Wenn das gelänge, würde die Welt als gigantischer Computer erscheinen.

Wie Petri sich erinnert, unternahm Zuse ernsthaft diesen Versuch, zum Kopfschütteln der meisten Zeitgenossen. Er begann mit dem Entwurf von „zellulären Automaten“: Hier wird der Raum in lauter gleichartige Zellen aufgeteilt, die wie kleine Maschinen nach einem vorgegebenen Verhaltensmuster mit ihren Nachbarzellen Information austauschen. 1969 veröffentlichte er das Buch *Rechnender Raum*.

Zusammenarbeit Wie Petri sich erinnert, besuchte Zuse ihn eines Tages in seinem Arbeitszimmer der GMD, und sagte, dass dieser ihm empfohlen worden war als erfinderischer Theoretiker mit Erfahrung als Leiter eines großen Rechenzentrums. Er bat Petri, ihn bei seiner Arbeit zum Rechnenden Raum zu beraten. Daraus erwuchs dann eine fruchtbare Zusammenarbeit.

Zuse vertrat zunächst seinen Ansatz der zellulären Automaten und verteidigte ihn vehement gegen Petris Bedenken. Diese bestanden laut Petri im Wesentlichen in Folgendem:

Erstens ergibt sich aus der räumlichen Anordnung der Zellen ein Raster im Raum, also eine Auszeichnung von drei bestimmten Richtungen. Das widerspricht aber der grundlegenden kosmologischen Annahme, dass der Raum *isotrop* ist. Diese Anisotropie kann

dann praktisch nur durch eine „Verrauschung“ wieder aufgehoben werden, also nur durch Einführung zufälliger Prozesse.

Zweitens wandte Petri ein, dass sich in diesem Modell die gesamte Physik in den Programmen jeder Zelle „verstecke“, sozusagen als nicht analysierbare DNA, und ohne direkten Bezug zu physikalischen Größen.

Zuse und die Netze Petri schlug Zuse deshalb eine andere Modellierungstechnik vor, nämlich die der Netze, die Zuse so gut gefiel, dass er später zwei Bücher darüber schrieb: *Petri-Netze aus der Sicht des Ingenieurs* (1980) und *Anwendungen von Petrinetzen* (1982). Petri konnte ihn davon überzeugen, dass in der topologischen Struktur der Netze nur endliche Netze kontinuierlich sind, und diese damit ein Bild eines endlichen grenzenlosen Universums darstellen könnten!

Danach einigten sie sich, dass der nächste praktische Schritt der weiteren Verkleinerung der Schaltelemente in den Bereich der Quanteneffekte führen musste. Sie beschlossen, den Fachphysikern die Arbeit der Übertragung ihrer Einsichten in den umfangreichen mathematischen Apparat der Quantenmechanik zu überlassen, eine Arbeit, zu welcher diese wohl geraume Zeit brauchen würden, wenn „sie einmal angefangen haben.“ Auf diesem Stand beendeten sie ihre gemeinsame Tätigkeit.

Über die Zusammenarbeit mit Zuse berichtet Petri an anderer Stelle (in einem Video, verfügbar auf der Internet-Seite der Kurt-Pauli-Stiftung): „Das Verhältnis war eigentlich ganz einfach. Er stellte die Fragen, und ich musste sie beantworten. Aber es ist ein himmelweiter Unterschied, auf welchem *Niveau* die Fragen gestellt werden, und Herr Zuse konnte Fragen stellen auf allerhöchstem Niveau und auf dem Niveau der Grundlagenforschung.“

Als ein sehr persönliches Erinnerungsstück an diese Zeit hing bis zu seinem Ausscheiden aus der GMD in Petris Arbeitszimmer ein großes von Zuse gemaltes Bild, in dem man (laut Petris Sohn Tobias) eine Staude mit schlanken, sich zum Licht hin öffnenden Blüten erkennen kann.

Inhaltsverzeichnis

8.1 Signalräume 78

8.2 Diskrete Dichte 80

8.3 Diskrete Vollständigkeit 84

8.4 Kombinatorische Mathematik 87

In Systemen laufen Prozesse ab, und umgekehrt lassen sich Systeme aus Abläufen durch Faltung erzeugen. Abläufe basieren auf physikalischen Prozessen. Die letzte Feststellung gibt Anlass zu der Frage: Kann man nicht, ausgehend von den Grundlagen physikalischer Prozesse, untersuchen, wie und wodurch sich diese als Prozesse der Informationsverarbeitung interpretieren lassen; und zwar zunächst als eigenständige Objekte, *ohne Bezug auf Systeme*, in denen sie ablaufen? Der niederländische Informatiker Edsger Dijkstra hat einmal pointiert gesagt, dass die Informatik genauso wenig die Lehre von Computern ist, wie die Astronomie die Lehre von Fernrohren.

Unter der Bezeichnung *Concurrency-Theorie* hat Petri einen großen Teil seiner Forschungsarbeit eben dieser Frage gewidmet, also der in Abb. 7.1 dargestellten untersten Ebene. Um sich nicht von vorgefertigten Vorstellungen leiten zu lassen, wählt er eine axiomatische Vorgehensweise. Erste Andeutungen zu seinen Ideen in dieser Richtung finden wir bereits 1967 in *Grundsätzliches zur Beschreibung diskreter Prozesse* [6]. Dass sich dann aber doch die bekannten Kausalnetze (occurrence-nets) der Ebene 1 in Abb. 7.1 als adäquate Prozessträger ergeben, bestätigt natürlich noch einmal den netztheoretischen Ansatz.

Grundbegriffe Da es in diesem Abschnitt etwas formaler zugeht, fassen wir die Grundbegriffe der nichtsequentiellen Prozesse, wie wir sie als Träger von Systemabläufen kennen gelernt haben, zusammen.

Ein nichtsequentieller Prozess besteht aus einem *azyklischen* Netz aus *Vorkommen von Bedingungen* B und *Ereignissen* E , genannt *Kausalnetz*. Die gerichteten Kanten zwischen Bedingungen und Ereignissen repräsentieren die *Flussrelation* F . Die aus den Kanten zusammengesetzten *gerichteten Pfade* definieren eine *Halbordnung* „ $<$ “ zwischen den Netzelementen. Daher übertragen sich auch Begriffe und Eigenschaften aus der Theorie der Halbordnungen auf die Kausalnetze.

Netztheoretisch wird aber oft eine leicht abgewandelte Sprechweise benutzt. Zwei Netzelemente x, y , die nicht geordnet sind, werden *nebenläufig* oder *concurrent* genannt. Man schreibt dafür $x \text{ co } y$. Ein *Schnitt* (englisch *Cut*) ist eine maximale Teilmenge, in der alle Elemente concurrent zueinander sind. Dual dazu ist eine *Linie* oder *Line* eine maximale Teilmenge, in der für je zwei Elemente x, y gilt: $x < y$ oder $y < x$, also ein *sequentieller Teilprozess*.

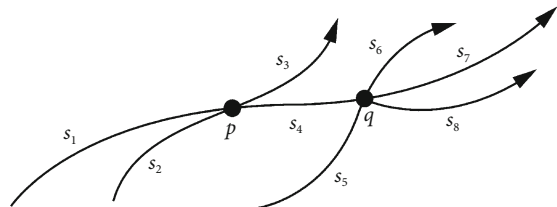
8.1 Signalräume

Petri fängt gewissermaßen völlig voraussetzungslos von vorne an. Als Grundbegriff greift er nochmals das *Signal* auf. Unter dem Begriff Signal lassen sich allgemein Dinge zusammenfassen, die als physikalische Träger von Information in Frage kommen. Dabei kann es sich etwa um Teilchen wie Elektronen, frequenzmodulierte Wechselspannungen, Hormone in biologischen Systemen oder um Billardkugeln handeln. Wesentlich ist jeweils, dass Signale sich *ausbreiten* und *interagieren*. Ein Geflecht der Ausbreitung und Interaktion einer Menge von Signalen soll hier informell *Signalraum* genannt werden.

Zur Charakterisierung von Signalräumen greift Petri auf Arbeiten von Hans Reichenbach, Kurt Lewin und Rudolf Carnap zurück, die in Einklang mit den Erkenntnissen der speziellen Relativitätstheorie ein Axiomensystem zur Ausbreitung von Wirkungen in Raum und Zeit aufgestellt haben. Als eigentlichen Erfinder des Concurrency-Konzepts sieht Petri nämlich Albert Einstein: „Er nannte es kausale Unabhängigkeit, und definierte sie ganz pragmatisch so: x ist kausal unabhängig von y genau dann wenn kein von x ausgehendes Signal y erreichen kann und umgekehrt.“ Die Grundidee ist in Abb. 8.1 illustriert.

Die Darstellung zeigt einige Signale und ihre Interaktionen; p bezeichnet eine Interaktion zwischen den Signalen s_1 und s_2 . Das Resultat pflanzt sich in den Signalen s_3 und s_4

Abb. 8.1 Signalraum



fort. Im Punkt q findet eine weitere Interaktion zwischen der Wirkung von p (vermittelt über s_4) und einem Signal s_5 statt.

Aus der Endlichkeit von Signalgeschwindigkeit und -dichte folgt zunächst, dass an jeder Interaktion nur eine beschränkte Anzahl von Signalen beteiligt sein kann; Interaktionen zwischen Signalen sind *lokale* Phänomene. Weiterhin wird auf der hier betrachteten untersten Abstraktionsebene einem Signal keine über eine Interaktion hinaus bestehende „Genidentität“ zugeordnet: Im obigen Beispiel soll s_4 als verschieden von sowohl s_1 als auch von s_2 betrachtet werden. Damit stellt sich auch nicht die Frage, welches der Signale s_6 , s_7 oder s_8 durch q „neu“ entstanden ist.

Diese Idee greift Petri auf, und betont z. B. in *State-Transition Structures in Physics and in Computation* [14]: „All physically possible computations can be described as embedded in physical processes.“

Er kann die Klasse der in Frage kommenden Prozesse noch einschränken. Wie bereits erwähnt, ist ihm die Idee der „Zeitumkehrinvarianz im Kleinen“ wichtig, so dass er voraussetzt, dass jede Interaktion jeweils

(*) mindestens zwei Ursachen und mindestens zwei Wirkungen

hat. Zusammenfassend beschreibt er seinen Ansatz 1982 in *State-Transition Structures in Physics and in Computation* so: „Two-particle interactions are sufficient to support well-organized information flow, including computation. We restrict our attention to the physical effect of a single and very simple structural type: that of the *interaction between two (or more) particles*.“

Diskrete Halbordnungen Was soll nun von einem Modell solcher Signallräume verlangt werden? Es ist offenbar erforderlich, dass sowohl (1) die Geometrie der einzelnen Signalketten, d. h. $s_1ps_4qs_6$, s_5qs_6 usw., adäquat dargestellt, wie auch, dass (2) die Struktur der Interaktionen vollständig abgebildet werden.

Die Struktur, die sich daraus ergibt, ist eine *diskrete Halbordnung*: Halbordnung, weil im relativistischen Sinn ein Signal nur diejenigen weiteren beeinflussen kann, die in seinem durch die Lichtgeschwindigkeit definierten Nach-Kegel liegen. Diskret, weil die Ereignismenge eben diskret ist. Wie sich die Signale *zwischen* Ereignissen verhalten, ist für die Interaktionsstruktur nicht von Belang.

Die grundlegenden Relationen sind so zum einen „später“ (im Sinne von „kausal nachgeordnet“), wenn ein Signal oder Ereignis im Nach-Kegel des anderen liegt, und zum anderen die komplementäre Beziehung „koinzident“, wenn sie sich nicht beeinflussen können. Die Koinzidenz ersetzt im relativistischen Sinn die Gleichzeitigkeit, ist aber im Unterschied zu letzterer nicht transitiv.

Abb. 8.3 Petri an der Universität Kyoto. 43 der 47 Präfekturen Japans werden *Ken* genannt. Kyoto ist eine der vier Ausnahmen.



K-Dichte Im Unterschied zur lokalen N-Dichte, bezieht sich die zweite Forderung unmittelbar auf die Gesamtstruktur. Wie in *Nicht-sequentielle Prozesse* [9] erläutert, soll diese die aus der „Physik bekannte Forderung verallgemeinern, dass jede Zeitreihe mit jedem Raum ein Element gemeinsam haben muss.“ Petri formuliert als Postulat:

Wir fordern, dass in jedem *Fall* für jeden sequentiellen Prozess festliegen soll, wie weit er fortgeschritten ist. ... Das heißt aber, dass jede maximale vollgeordnete Teilmenge ... mit jedem Schnitt ein Element gemeinsam haben muss.

Diese Eigenschaft nennt er *K-Dichte*. In *State-Transition Structures in Physics and in Computation* [14] fasst er zusammen: “The old physical postulate that every Cut represents a spatial distribution can now be written as ‘every Cut cuts every Line.’” Hierbei ist mit „Cut“ wieder der oben definierte Schnitt gemeint, also eine maximale Teilmenge, in der alle Elemente in der *co*-Relation zueinander stehen.

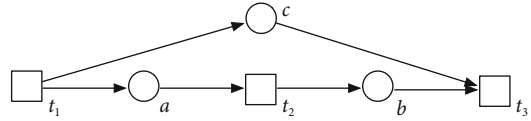
Anders als das N in „N-Dichte“, hat das K in „K-Dichte“ nichts mit der Form einer graphischen Erscheinung zu tun. Das K ist einfach der Anfangsbuchstabe der japanischen Bezeichnung „Ken“ für „Bezirk“, „Präfektur“.

Alle Kausalnetze sind N-dicht. Alle *endlichen* Kausalnetze sind auch K-dicht. Als Forderung bleibt die K-Dichte daher nur für unendliche Kausalnetze relevant. In *Nicht-sequentielle Prozesse* stellt Petri fest, dass sie dort aber auch nur dann verletzt werden kann, „wenn unendlich viele sequentielle Prozesse aufeinander warten müssen, also in einer Situation ohne praktisches Interesse.“

Petri kommt so zu dem Schluss, dass unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten gerade die K-dichten Kausalnetze sich als natürliche Träger von informationsverarbeitenden Prozessen ergeben.

Das Kontinuums-Netz Klassischerweise werden in der Modellierung physikalischer Abläufe Ereignisse mit Zeitpunkten t aus dem reellwertigen Kontinuum $\mathbb{R}$ assoziiert. Dieser

Abb. 8.4 Ausschnitt aus dem Vier-Jahreszeiten-Netz



Ansatz berücksichtigt aber eben nur *Ereignisse*, und nicht die *zwischen* Ereignissen bestehenden *Zustände*.

Es ist jedoch leicht, in eine Darstellung, die die Ereignisse t_1 und t_2 , $t_1 < t_2$ enthält, den Zustand s einzufügen, der mit Eintritt von t_1 beginnt und mit t_2 endet; es reicht, s als die Menge der zwischen den Ereignissen liegenden Zeitpunkte aufzufassen. Mathematisch ist dann s das *offene Intervall* $\{t \in \mathbb{R} \mid t_1 < t < t_2\}$, das oft auch in der Form $s = (t_1, t_2)$ geschrieben wird. Aus solchen Ereignissen t und Zuständen s lassen sich dann wiederum sehr einfach Kausalnetze aufbauen, indem man die Flussrelation F aus Bestandteilen der Form $t_1 F s$ oder $s F t_2$ für $s = (t_1, t_2)$ zusammensetzt.

Beispiel

Abbildung 8.4 zeigt einen Ausschnitt aus einem Jahresablauf, etwa des Jahres 2013. Die Ereignisse $t_1, t_2, t_3 \in \mathbb{R}$ bezeichnen den Frühlings-, Sommer- und Herbstbeginn.

Der Zustand a bezeichnet den Frühling. Er kann aufgefasst werden als die Menge der Zeitpunkte zwischen Frühlingsbeginn und -ende, also das offene Intervall $a = (t_1, t_2)$. Entsprechend besteht der Zustand b (Sommer) aus dem Intervall $b = (t_2, t_3)$. Der Zustand $c = (t_1, t_3)$ schließlich überdeckt die beiden Jahreszeiten Frühling und Sommer. Netztechnisch besteht zwischen dem Ereignis Frühlingsbeginn t_1 und dem Frühling a die Flussrelation $t_1 F a$. Entsprechend gilt die F -Relation auch für die anderen durch Pfeile verbundenen Netzelemente.

Aber es gilt auch die Umkehrung. Für jedes gegebene Kausalnetz (oder gleichwertig: Signalraum) kann man eine Darstellung mit Ereignissen aus $\mathbb{R}$ und Zuständen bestehend aus geeigneten offenen Intervallen festlegen.

Beispiel

Für den Signalraum aus Abb. 8.1 kann man etwa wie folgt ein derartiges Netz definieren: Es besteht aus den Ereignissen $p = 1$, $q = 2$ und den Zuständen $s_1 = (0, 1)$, $s_2 = (\frac{1}{2}, 1)$, $s_3 = (1, 3)$, $s_4 = (1, 4)$, $s_5 = (\frac{1}{2}, 2)$ und $s_i = (2, i)$ für $i = 6, 7, 8$. Die Flussrelation zwischen den Netz-Elementen ergibt sich dann automatisch.

Definition

Das umfassendste Netz, das so aufgebaut werden kann, ist das *Kontinuums-Netz*. Es besteht aus der Ereignismenge $E = \mathbb{R}$, und der Zustandsmenge B aller *beschränkten offenen Intervalle* in den reellen Zahlen $\mathbb{R}$, also die Menge aller b der Form $b = (t_1, t_2)$ für $t_1 < t_2 \in \mathbb{R}$. Die Flussrelation F zwischen Ereignissen t und Zuständen b ist gegeben

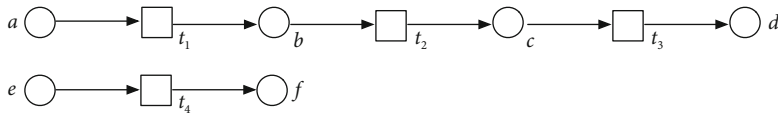


Abb. 8.5 Unternetz des Kontinuum-Netzes

durch

$$t F b \Leftrightarrow t = t_1 \text{ und } b F t \Leftrightarrow t = t_2 \text{ für } b = (t_1, t_2).$$

In *Nicht-sequentielle Prozesse* [9] begründet Petri den Stellenwert des Kontinuums-Netzes in Form einer These so:

1. Jede Netzdarstellung eines realen Prozessablaufs ist einem K-dichten Unternetz des mit dem Kontinuum assoziierten Netzes isomorph.
2. Reale Prozesse sind im allgemeinen nichtsequentiell. Ihre Bedingungen können als kausale Verknüpfungen von Ereignissen ausgewählt werden.
3. Nicht alle Zeitintervalle können kausalen Verknüpfungen entsprechen.

Punkt 1 ist der eigentliche „Darstellungssatz“: Alle praktisch interessierenden Kausalnetze – nämlich die K-dichten – lassen sich darstellen durch Ereignisse aus $\mathbb{R}$ und Zuständen aus offenen Intervallen in $\mathbb{R}$.

Punkt 2 stellt fest, dass eine *kausale* Verknüpfung von Ereignissen t_1, t_2 etwa durch die Bedingung bestehend aus dem Intervall (t_1, t_2) vermittelt werden kann.

Punkt 3 schließlich besagt, dass in der Darstellung das Intervall (t_1, t_2) nicht vorkommen darf, wenn *keine kausale Beziehung* zwischen den Ereignissen t_1 und t_2 besteht.

Beispiel

Insbesondere Punkt 2 und 3 seien noch einmal an einem Beispiel erläutert. Abbildung 8.5 zeigt ein Kausalnetz, das als Unternetz des Kontinuum-Netzes interpretiert werden soll.

Das lässt sich bewerkstelligen, indem man etwa $t_i = i$ für $i = 1, 2, 3, 4$ setzt. Dadurch sind dann auch $b = (1, 2)$ und $c = (2, 3)$ festgelegt.

Für a können wir irgendein Intervall der Form $a = (t, 1)$ mit $t < 1$ wählen, für d eins der Form $d = (3, t)$ mit $3 < t$, und analog für e und f .

Zwischen t_1 und t_3 besteht eine kausale Verbindung, die aber nicht über eine direkte Zwischenbedingung (in Frage käme das Intervall $(1, 3)$) vermittelt wird. Das Ereignis t_4 ist kausal unabhängig von den anderen t_i , so dass keins der möglichen „kausalitätsvermittelnden“ Intervalle $(i, 4)$ für $i = 1, 2, 3$ im Netz vorkommt.

Das Kontinuums-Netz ist nicht K-dicht Tatsächlich ist es die klassische Dichte der reellen Zahlen, die dafür sorgt, dass alle K-dichten Kausalnetze in das Kontinuums-Netz

eingebettet werden können. Gerade diese Dichteigenschaft hat aber auch die bemerkenswerte – fast paradoxe – Konsequenz, dass das umfassende Kontinuums-Netz selbst dagegen *nicht* K-dicht ist. Da ein vollständig ausgearbeiteter Nachweis dieser Aussage in der Literatur nicht vorzuliegen scheint, soll hier die Gelegenheit genutzt werden, das nachzuholen.

Satz (Petri [9]). *Das Kontinuums-Netz ist nicht K-dicht.*

Beweis. Es ist klar, dass $X := E \cup B$ nicht vollgeordnet ist, denn es gilt z. B. für beliebige $b, c \in B$:

$$(*) \quad b \text{ co } c \Leftrightarrow b \cap c \neq \emptyset.$$

Die Menge $E = \mathbb{R}$ ist offenbar eine vollgeordnete Teilmenge in X . Sie ist aber auch maximal, denn für jedes $b \in B$ ist $b \text{ co } t$ für $t \in b$.

Für den Beweis des Satzes reicht es daher, einen Schnitt in X anzugeben, der mit der Linie E kein gemeinsames Element besitzt. Sei dazu t ein beliebiges aber festes Element in E . Wir definieren

$$(**) \quad C_t := C_{t,1} \cup C_{t,2} \quad \text{mit} \quad C_{t,1} := \{b \in B \mid b F t\}, \quad C_{t,2} := \{b \in B \mid t \in b\}$$

und zeigen, dass diese Menge C_t wie gefordert ist.

Zunächst ist $C_t \cap E = \emptyset$ schon nach Definition von C_t offensichtlich.

Als nächstes weisen wir nach, dass alle Elemente in C_t paarweise ungeordnet sind. Für $b, c \in C_{t,1}$ ist t die gemeinsame obere Intervallgrenze. Daher ist sogar $b \subseteq c$ oder umgekehrt, also insbesondere $b \cap c \neq \emptyset$, und daher $b \text{ co } c$ nach $(*)$. Für $b, c \in C_{t,2}$ ist $t \in b$ und $t \in c$, also auch hier $b \text{ co } c$. Es bleibt der gemischte Fall $b \in C_{t,1}, c \in C_{t,2}$. Hier ist die obere Grenze des Intervalls b in dem Intervall c enthalten. Da b und c offene Intervalle sind, müssen sie daher einen nicht-leeren Durchschnitt besitzen, es gilt also auch hier $b \text{ co } c$.

Es bleibt zu zeigen, dass C_t maximal ist. Dazu müssen wir drei Fälle unterscheiden: (1) $t' \in E, t' \neq t$, (2) t selbst und (3) $c \in B$.

Für $t' \in E, t' \neq t$, ist klar, dass es ein $b \in C_{t,2}$ gibt, in dem t' nicht vorkommt, t' ist also nicht co zu allen Elementen in C_t . Letzteres gilt auch für das Element t selbst, denn es kommt in keinem der $b \in C_{t,1}$ vor.

Für ein $c \in B$, das alle Intervalle b mit der Obergrenze t schneidet, muss $t \in c$ gelten, also $c \in C_{t,2}$. Umgekehrt muss ein offenes Intervall c , das t enthält, auch alle b schneiden, die t als obere Grenze haben, also gilt $c \in C_{t,1}$.

Wie behauptet, ist C_t also maximal; und damit der Beweis des Satzes erbracht. $\square$

8.3 Diskrete Vollständigkeit

In den vorangegangenen Abschnitten sind wir Petris Argumentation gefolgt, dass es weder notwendig noch sinnvoll ist, für die Beschreibung realer informationsverarbeitender Prozesse von der klassischen Dichte auszugehen. Es reicht die Betrachtung von diskreten K-

dichten Kausalnetzen. Wie aber ist es mit der *Wahrnehmung kontinuierlicher Abläufe*, der Empfindung von Bewegung? Tatsächlich nehmen wir Bewegung als unmittelbares Grundphänomen wahr, die Auflösung in eine Menge von Einzelpunkten ist ein nachträglicher Gedankenakt.

Schon der griechische Philosoph Zenon von Elea hat sich bei der Betrachtung des fliegenden Pfeils gefragt, wie es denn komme, dass er die Bewegung des Pfeils wahrnehme, obwohl dieser in jedem Moment seiner Fluges einen bestimmten, exakt umrissenen Ort einnimmt, an dem er sich in Ruhe befindet, denn an einem Ort kann er sich nicht bewegen. Da sich der Pfeil in *jedem Moment* also in Ruhe befindet, müsste er sich auch *insgesamt* in Ruhe befinden.

In der klassischen Physik wird die Möglichkeit der Bewegung auf *unendlich kleine* Aufenthaltssdauer in jedem Punkt zurückgeführt, also mathematisch mit Hilfe des Grenzwertbegriffs als Limes einer Folge formuliert. Dazu wiederum wird im mathematischen Modell nicht nur Dichte, sondern darüber hinaus noch die sogenannte *Vollständigkeit* benötigt.

Wie schon bei der Dichte formuliert Petri nun auch die Vollständigkeit neu, um sie auf ihren eigentlichen Zweck zu reduzieren, und so den Bedürfnissen tatsächlicher diskreter Informationserhebung und -verarbeitung anzupassen.

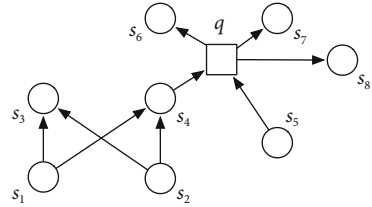
In *Concurrency and Continuity* [15] stellt er in Anlehnung an Zenon fest: “The movement of a falling apple is called continuous. We are quite certain that we can catch the falling apple in our hands at different heights above the ground, and indeed at any height we choose between the different heights we might have attained. Also, by taking flashlight snapshots we can show the falling apple in different positions by freely choosing some of the various possible times for taking the snapshots. We are not able to count the number of the possibilities which are open to our choice, and thus we are led to think that between two chosen different possibilities there is always another one.”

Zusätzlich zur bereits besprochenen Dichte kommt hier die Vorstellung des stetigen Prozessablaufs hinzu. Es geht ihm also darum, diese intuitive Kontinuität auf der einen, und die diskrete Artikulation tatsächlicher Beobachtungen auf der anderen Seite in Übereinstimmung zu bringen.

Dedekind-Schnitte Dazu schlägt Petri bereits 1978 in *Concurrency as a Basis of Systems Thinking* [12] eine an Richard Dedekind angelehnte Formulierung einer verallgemeinerten Vollständigkeit für Halbordnungen vor. Diese hat sich aber als recht sperrig und intuitiv nicht unmittelbar nachvollziehbar erwiesen. Der Ansatz ist in dem Buch *Nonsequential Processes. A Petri Net View* [1] von Eike Best und César Fernández, zwei langjährigen Mitarbeitern Petris in der GMD, ausführlich dokumentiert.

In einer *vollgeordneten* Menge X besteht ein *Dedekind-Schnitt* aus einem disjunkten Paar von Teilmengen A und B , so dass $X = A \cup B$, und für $a \in A$, $b \in B$ stets $a < b$ gilt. Die Ordnung ist (*Dedekind-*)*vollständig* wenn für jeden Dedekind-Schnitt (A, B) entweder A ein größtes oder B ein kleinstes Element besitzt. Bekanntlich ist die Menge der reellen Zahlen $\mathbb{R}$ in diesem Sinn vollständig, die der rationalen Zahlen $\mathbb{Q}$ aber nicht.

Abb. 8.6 Halbgeordnete Menge. Nicht Dedekind-vollständig



In seinem frühen Vorschlag greift Petri die in der Definition enthaltene *disjunkte Zerlegung* der Gesamtmenge auf, und will diese auf Halbordnungen übertragen. Später hat sich aber herausgestellt, dass eine zunächst für Vollordnungen angegebene äquivalente Definition des Dedekind-Schnittes besser für die Übertragung auf Halbordnungen geeignet ist.

Sie lautet: Ein Dedekind-Schnitt ist ein Paar (A, B) von Teilmengen, so dass A gerade aus all denjenigen Elementen besteht, die kleiner als alle Elemente in B sind, und umgekehrt B aus allen Elementen, die größer sind als alle Elemente in A .

In dieser Formulierung ist nicht mehr die Rede von einer disjunkten Zerlegung der Grundmenge. In Vollordnungen ergibt sich diese dann als Folgerung, in Halbordnungen dagegen nicht notwendigerweise.

Kegelpaare In *Concurrency and Continuity* [15] greift Petri 1987 diese zweite Variante auf. Ein Dedekind-Schnitt bildet dann in einer Halbordnung keine Zerlegung, sondern ein *Kegelpaar* in dem Sinn, dass der Unterkegel A mit einem Element a auch alle Vorgänger $a' < a$ enthält, und umgekehrt der Oberkegel B mit einem b die Menge aller Nachfolger $b' > b$. Die Definition der Dedekind-Vollständigkeit wird dagegen wörtlich übernommen.

Beispiel

Wir illustrieren die Idee am Beispiel der Halbordnung in Abb. 8.6. (Der Grund für die Kennzeichnung der Elemente durch Kreise und Kästchen wird weiter unten ersichtlich.) Ein Dedekind-Schnitt ist hier z. B. das Paar (A, B) mit $A = \{s_1, s_2\}$ und der Menge B bestehend aus allen restlichen Elementen *außer* s_5 . Insbesondere bildet der Schnitt also keine Zerlegung der Grundmenge. Die Kegel stoßen stumpf aufeinander in dem Sinn, dass weder A ein größtes Element noch B ein kleinstes besitzt. Die Ordnung ist also nicht Dedekind-vollständig. Füllt man aber die Lücke mit einem zusätzlichen Element p , so dass jetzt $s_1, s_2 < p < s_3, s_4$, dann ist (A, B) kein Dedekind-Schnitt mehr, dafür aber das Paar $(A \cup \{p\}, B)$. Die Struktur ist jetzt nach der Lückenfüllung Dedekind-vollständig. Tatsächlich entspricht sie jetzt dem Kausalnetz der Interaktionsstruktur des Signalraumes in Abb. 8.1.

Vollständige und dichte Kausalnetze Es gilt sogar allgemein, dass *jedes Kausalnetz*, bei dem Ereignisse jeweils mindestens zwei Vor- und zwei Nachbedingungen besitzen, in diesem Sinn *vollständig* ist.

Die oben angedeutete Korrespondenz zwischen punktförmiger Ergänzung von Lücken auf der einen, und Elementen eines Kausalnetzes auf der anderen Seite geht aber noch weiter. Entfernt man ein *Ereignis*, bleibt die Struktur N-dicht, es entsteht aber eine (Dedekind-) Lücke, die auf das zu ergänzende *T*-Element hindeutet. Entfernt man umgekehrt eine *Bedingung*, ist die Struktur nicht mehr N-dicht, und die Lücke verweist auf die zu ergänzende Stelle. In beiden Fällen ist der Ort der erforderlichen Ergänzung eindeutig bestimmt.

In *Concurrency and Continuity* fasst Petri die in den letzten Abschnitten geschilderten Überlegungen zu Dichte- und Vollständigkeitsforderungen so zusammen: “As a consequence, physical signalling structures can be modelled as a combinatorial (in this sense ‘discrete’) continuum.”

8.4 Kombinatorische Mathematik

Petri hat sich auch deshalb so ausführlich mit dem Inhalt der Dichte- und Vollständigkeitsforderungen beschäftigt, weil ihm langfristig eine kombinatorische Mathematik vor-schwebte, die den Umweg der Unendlichkeitsmathematik vermeidet.

Tatsächlich ist jede Menge von Beobachtungen – wie etwa Messwerterhebungen – endlich, liegt also als diskrete Menge vor (dazu mehr in Kapitel 10). Klassischerweise wird diese Menge dann in die reellen Zahlen eingebettet und so der Behandlung etwa durch Differentialgleichungen zugeführt. Zur numerischen Lösung dieser Gleichungen werden dann wieder Diskretisierungsmethoden eingesetzt, die aber mit der ursprünglichen Beobachtungsmenge in der Regel nichts zu tun haben. Aus diesem Grund strebt Petri als Fernziel eine kombinatorische Mathematik an, in der direkt mit den Beobachtungen gearbeitet wird, ohne doppelte „digital-analog-, analog-digital“-Wandlung.

Von den Betrachtungen in den letzten Abschnitten bis hin zu einer umfassenden kombinatorischen Kontinuitätsmathematik ist es sicher noch ein weiter Weg. Petris Verdienst besteht aber zweifelsfrei darin, wesentliche Fragen der Modellierung auf die Diskretheit ihrer Objekte zurückgeführt zu haben, ohne ungeprüft idealisierende Hypothesen zu übernehmen – ganz im Sinne des Newtonschen „non fingo“, das er auch schon bei seinem asynchronen Ansatz zur Rechnermodellierung befolgt hat.

Inhaltsverzeichnis

9.1 Die Disziplinen 91

9.2 Kanal-Instanz-Netze 92

Wie schon erwähnt, war Petri in den 1960er Jahren an der Entwicklung des ARPA-Netzes beteiligt, dem Vorläufer des Internets. Angesichts der Neuartigkeit eines derartigen Netzes, mit dem zum ersten Mal Computer weiträumig miteinander verbunden werden sollten, tauchten naturgemäß auch neue Fragestellungen auf, von rein technischen der physikalischen Vernetzung bis hin zu Fragen der Regelung des Umgangs mit dem Netz durch die beteiligten Individuen. Rechner werden durch die Vernetzung eben zu einem *Medium der Kommunikation*, so dass der Begriff der *Kommunikation mit Automaten* in Petris Dissertation doch noch zu seiner dritten Bedeutung Kommunikation *via* Automaten kam, sei diese nun anfänglich intendiert oder auch nicht.

Petri konnte zu der Lösung einer Reihe praktischer Probleme des ARPA-Netzes beitragen. Wie sein Freund Lu Ruqian später mit chinesischer Liebe zum numerischen Detail berichtet, soll er nach Analyse der Aufzeichnung der Daten von Netz-Testläufen rund 1300 Entwurfs- und Programmierfehler aus 450 Problemklassen entdeckt haben, die er dann in zwölf große Gruppen einteilte.

Die Landkarte Auch wenn sich die Zahlenangaben einer nachträglichen Bestätigung entziehen, lag hier doch sicher einer der Ursprünge für die Identifizierung von zwölf Teilgebieten der Kommunikation, die Petri 1979 in der Veröffentlichung *Kommunikationsdisziplinen* [13] dokumentiert. Es handelt sich dabei um die in Abb. 9.2 dargestellten Problemkomplexe. Petri betont aber, man solle diese Einteilung mit allem Vorbehalt darüber, ob die „Einteilung vollständig und ob sie zweckmäßig ist“, betrachten – denn, wie er sagt: „Wir

Abb. 9.1 Petri in „weitgehend unbekanntem Territorium“ [13]



betreten weitgehend unbekanntes Territorium und können nicht überrascht sein, wenn unsere vorläufige Landkarte der Korrektur bedarf.“

Die zwölf Teilgebiete, die er als unterscheidbare Kommunikationsdisziplinen sieht, werden in der Reihenfolge des Schwierigkeitsgrads für eine vollständige mathematische Durchdringung angegeben, so wie sie sich nach Ansicht der damals Beteiligten am ARPA-Projekt darstellte.

Petri kommentiert die Einteilung so: „Man könnte von den ‚niederen‘ Disziplinen 1–7 sprechen, die scheinbar technischer Natur sind, und, ‚höheren‘ Disziplinen 8–12, die sich nur auf geistige Prozesse, Rechtsfragen und Organisation zu beziehen scheinen.“ Er hebt aber hervor, dass eine derartige strenge Abgrenzung kaum zweckmäßig ist.

Abb. 9.2 Kommunikationsdisziplinen

1 Synchronisation	2 Identifikation
3 Adressierung	4 Benennung
5 Kopieren	6 Stornierung
7 Formatierung	8 Modellbildung
9 Autorisierung	10 Wertsetzung
11 Delegierung	12 Reorganisation

9.1 Die Disziplinen

- Unter *Synchronisation* versteht Petri „allgemein die Abstimmung von Aktivitäten aufeinander in zeitlicher Hinsicht, seien sie technischer oder organisatorischer Art.“ Als Beispiel, wie man sich eine mathematische Theorie zur Behandlung der einzelnen Disziplinen vorstellen könnte, diskutiert er Synchronisation anhand des bereits erwähnten Synchronieabstands in Petrinetzen.
- Zum Komplex der *Identifikation* gehörig sieht er die Frage an, „wann ein elektrisches Potential einen bestimmten logischen Wert bedeutet“, aber auch den „Nachweis der Zuständigkeit von Instanzen für bestimmte Aktionen.“
- Unter *Adressierung* versteht er die „Bezeichnung von Wegen und Wegsystemen durch Teile von Nachrichten.“
- Typische Fragestellungen der Disziplin *Benennung* sind etwa: „Wie können die inkompatiblen Benennungen von Dateien in COBOL und FORTRAN als spezielle Ausprägungen einer einzigen Benennungsdisziplin verstanden werden?“
- Ein zentrales Problem beim *Kopieren* ist die Veränderung des pragmatischen Status einer Nachricht, wenn sie kopiert wird. Beispielsweise kann dadurch ihr Dokumentencharakter verlorengehen.
- Fragen bei der *Stornierung* sind etwa: „Besteht ein Unterschied zwischen der Regelung für Fehlerkorrektur und der Regelung für den Fall, dass eine Instanz infolge „Sinneswandels“ eine Nachricht (z. B. einen Auftrag) zurücknehmen möchte?“
- *Formatierung* behandelt die Festlegung der Struktur von Nachrichten. Darüber hinaus sieht Petri sie im „engen Zusammenhang mit der Gestaltung von Denkmodellen“ in der Disziplin der Modellbildung.
- Bei der *Modellbildung* stellt er fest: „Die Entstehung der Modell-Schemata ist gewöhnlich ein historischer Prozess, der ohne eine bewusste methodische Technik abläuft.“ Als Beispiel hebt er hervor, dass Modelle, die in einem Gebiet erfolgreich waren, ohne Sorgfalt auf andere Gebiete übertragen werden, etwa die „Verwendung reeller Zahlen zur Bezeichnung realer Maßgrößen, obwohl die Gültigkeit der Axiome für reelle Zahlen im Bereich der Maßgrößen nicht erweisbar ist.“

Im nächsten Kapitel werden wir ausführlich auf diese Problematik der Maßgrößen eingehen.

- *Autorisierung* betrifft technische Zugriffsrechte, aber im Bereich personaler Instanzen auch Weisungsbefugnisse und deren Überwachung. Diese Disziplin sollte eine Denkweise umfassen, welche „ethische Restriktionen und technische Kontrolle auf gemeinsame Prinzipien zurückführt.“ Petri bemerkt aber auch, dass dies noch in weiter Ferne zu liegen scheint.
- *Wertsetzung*: Information ist als Ressource aufzufassen, „als etwas, was ungleichmäßig verteilt und daher an manchen Stellen knapp ist. Gegenstand einer Theorie wäre dann zunächst die Austauschbarkeit von Ressourcen, die ihrem *Wesen* nach verschieden sind (Zeit, Speicherraum, Energie, Werkzeuge, Programme, Information, usw.).“

- *Delegierung* ist das Übertragen von Aufgaben von einer Instanz auf eine andere. Eine wichtige Frage ist der Verbleib der mit der Aufgabe verbundenen Verantwortung. Bei der Delegierung an eine nicht-personale Instanz, z. B. durch Programmierung, kann sie nicht mit-delegiert werden.
- Unter *Reorganisation* schließlich versteht Petri „Aktionsschemata für organisatorische Änderung eines Systems.“ Hier wird auch eine weitere Quelle der Kommunikationsdisziplinen deutlich, nämlich die in der Dissertation angesprochene Metakommunikation zur Erweiterung von Automaten.

Eine wesentliche Forderung bei der Disziplin der Reorganisation, bei der die Lehren aus der Dissertation besonders klar hervortreten, ist: „Solche Schemata werden zweckmäßig zusammen mit dem zu schaffenden System entworfen und sollten als dessen Bestandteil gelten. Gerade bei diesen Aktionsschemata erweist sich, warum sequentielle Schemata oft nicht ausreichen; außer der Dimension der Sequenz bedürfen sie im allgemeinen der Dimensionen der Alternative und der Nebenläufigkeit.“

9.2 Kanal-Instanz-Netze

Zur formalen Behandlung der „höheren“ Disziplinen schlägt Petri entsprechend abstraktere Petrinetze vor. Diese bestehen ebenfalls aus zwei Sorten von Elementen (oder *Funktionseinheiten*), nämlich *Kanälen* zur Darstellung von Nachrichten, und *Instanzen* zu deren Verarbeitung.

Graphisch werden die Funktionseinheiten wieder durch *S*- und *T*-Elemente dargestellt. Die Kanten in einem solchen *Kanal-Instanz-Netz* sind aber nicht notwendigerweise gerichtet. Wenn zum Beispiel nur dargestellt werden soll, dass Zustandsträger an Aktivitäten teilnehmen, ist damit nicht immer eine Richtung des Informationsflusses festgelegt, wie er durch das Markenspiel der Bedingungs-Ereignis-Systeme ausgedrückt wird. Als Beispiel für ungerichtete Netze verweist Petri auf die von Anatol Holt vorgeschlagenen *Role-Activity-Nets*.

Kanal-Instanz-Netze eignen sich auch zur Spezifikation in einem frühen Stadium der Modellbildung, die dann später zu einer Darstellung mit Bedingungs-Ereignis-Systemen verfeinert wird. Beispielsweise kann mit Kanal-Instanz-Netzen die in der Dissertation angesprochene Metakommunikation zur Erweiterung von Automaten (also etwa die Forderung nach Bandverlängerung) formuliert und so tendenziell in die gemeinsame Sprache der Netze überführt werden.

Inhaltsverzeichnis

10.1 Klassische Auffassung 94

10.2 Petris Ansatz 94

10.3 Empirische Indifferenz 95

10.4 Referenzskalen 97

10.5 Petris Doppelskala 99

10.6 Konflikt und Konfusion 100

10.7 Die zwei Wurzeln der Concurrency-Theorie 100

10.8 Vollständige K-dichte Messskalen 101

10.9 Rückwirkungen der Messordnungen auf Prozesse 102

Nach Petris Verständnis geht es in der Informatik nicht nur um Informations-*Verarbeitung*, sondern auch um deren *Erfassung* und *Verwendung*. Den Gesamtzusammenhang erläutert er ausführlicher etwa in der im letzten Kapitel angesprochenen Schrift *Kommunikationsdisziplinen* [13]. Dabei spielt der Umgang mit *kontinuierlichen* Größen und ihre *diskrete Behandlung* eine wichtige Rolle. Bereits seit seiner Zeit als Flakhelfer beschäftigt sich Petri ja mit Fragen der Erhebung und Verwendung von Messwerten. Daraus ist dann eine empirisch begründete Theorie des Messens entstanden. Die Grundlagen hat er 1977 in einem Vortrag *Modelling as a Communication Discipline* [11] vorgestellt. Da die Unterlagen zum einen offenbar nicht in veröffentlichter Form vorliegen (die genannte Referenz skizziert nur eine kurze Zusammenfassung des Vortrags), zum anderen aber für das Verständnis von Petris Werk und Denken nicht unerheblich sind, soll hier etwas näher darauf eingegangen werden. Dazu stützen wir uns u. a. auf Darstellungen des Autors, die er im Rahmen einer von Petri betreuten Dissertation ausgearbeitet hat.

10.1 Klassische Auffassung

Nach klassischer Auffassung bedeutet Messen die Zuordnung reeller Zahlen. Wie es beispielsweise in der DIN-Norm *Grundbegriffe der Messtechnik* heißt, besteht Messen darin, „den speziellen Wert einer physikalischen Größe als Vielfaches einer Einheit oder Bezugswertes zu ermitteln. Das Ziel jeder Messung ist, den wahren Wert einer Messgröße zu ermitteln.“

Zahlenwerte sind nach dieser Auffassung Eigenschaften, die den Gegenständen objektiv zukommen. Allerdings, wie die DIN-Norm einschränkt: „Wegen ... bei der Messung wirkenden Einflüsse treten Messabweichungen auf. Sie sind der Grund, warum es keine Möglichkeit gibt, den wahren Wert x_W zu finden.“

In mathematischer Formulierung findet man in dem Buch *Axiomatische Grundlagen einer allgemeinen Theorie des Messens* von Johann Pfanzagl: „Das allgemeine Ziel der Messung ist es, jedem Element einer gegebenen Menge M eine reelle Zahl so zuzuordnen, dass man aus den Relationen zwischen den Maßzahlen Rückschlüsse auf korrespondierende Relationen zwischen den zugehörigen Elementen der Menge M ziehen kann.“

Nach diesen Vorstellungen besteht Beobachten und Messen also darin, die wahren Werte mehr oder weniger genau zu erfassen und wiederzugeben. Vergleiche zwischen verschiedenen Gegenständen können dann durch die Betrachtung der zugehörigen Zahlen durchgeführt werden: Messen – d. h. das Zuordnen dieser Zahlen – scheint dem Vergleichen begrifflich wie auch praktisch voranzugehen.

10.2 Petris Ansatz

Es stellt sich aber sofort die Frage, ob die Annahme von objektiven reellwertigen Größen für den praktischen Umgang mit Messwerten überhaupt notwendig und zweckmäßig ist, wenn daraus zwangsläufig folgt, dass jede Feststellung von Messwerten fehlerhaft, jede diskrete Repräsentation kontinuierlicher Größen als Approximation angesehen werden muss.

Zu einem erweiterten Verständnis des Messens gelangt man, wenn nicht nur der technische Vorgang, sondern der *pragmatische Gesamtkontext* des jeweiligen Anwendungszusammenhangs berücksichtigt wird: Nach diesem Verständnis besteht das letztendliche Ziel des Messens darin, *Entscheidungen zwischen Handlungsalternativen* in realen Situationen zu begründen. Daher wird auch der pragmatisch relevante *Informationsgehalt* einer Messung von der Anzahl der möglichen alternativen Handlungen abhängen. Diese Anzahl ist aber sicherlich stets beschränkt. In diesem Sinn liefert daher jeder Messvorgang einen *endlichen* Informationsgehalt.

Im Unterschied zu den oben betrachteten klassischen Ansätzen vertritt Petri die Auffassung, dass es dem realen Umgang mit kontinuierlichen Größen angemessener ist, den idealisierenden Umweg über die reellen Zahlen zu vermeiden und stattdessen die prinzipielle Endlichkeit des Informationsgehalts von Messungen auch beim Aufbau der Theorie zu berücksichtigen.

Petri schlägt auch hier vor, „elements of a suitable chosen structure“ statt der reellen Zahlen zu verwenden, und die Grundlagen des Messens aus einem Verständnis der Tätigkeit des praktischen Vergleichens heraus zu entwickeln. Er will von den empirischen Feststellungen selbst ausgehen, nämlich von *beobachtbar größer* und der Komplementärrelation der *empirischen Indifferenz*, auch *Fastgleichheit* oder *Ununterscheidbarkeit* genannt.

10.3 Empirische Indifferenz

Die Idee der empirischen Indifferenz lässt sich am Gewichtsvergleich von Gegenständen x, y mit einer Balkenwaage illustrieren. Wenn die Waagschale, die y enthält, sich senkt, nachdem man die Körper x und y jeweils in eine Schale der Waage gelegt hat, ist offenbar y schwerer als x . Dadurch wird eine Ordnung „ y ist beobachtbar schwerer als x “ definiert. Wir schreiben dafür $x < y$. Es ist aber auch möglich, dass x und y sich die Waage halten. Dafür schreiben wir dann $x \approx y$. Die Relation $\approx$ bezeichnet die empirische Indifferenz „mit der Waage festgestelltes Gleichgewicht“.

Die alles entscheidende Frage ist jetzt: Wenn $x \approx y$ das Gleichgewicht hält, und $y \approx z$ das Gleichgewicht hält, wird dann auch $x \approx z$ das Gleichgewicht halten? In Formeln: Wenn $x \approx y$ und $y \approx z$, gilt dann auch $x \approx z$? Mathematisch: Ist die Relation $\approx$ transitiv?

Das ist nun tatsächlich von vielen Autoren bejaht worden, z. B. von dem bereits im Zusammenhang mit Signalstrukturen erwähnten Philosophen Rudolf Carnap in seinem Buch *Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften*. Petri lehnt diese Annahme dagegen vehement ab. Er argumentiert, dass die Transitivität von $\approx$ *empirisch* nicht zu rechtfertigen ist – wohl aber durch Beispiele widerlegt werden kann.

Beispiel

Das folgende Beispiel illustriert die Idee. Aus einem langen Holzstab sollen Kopien eines vorgegebenen Stäbchens x_0 geschnitten werden. Dazu legt man die Vorgabe an den langen Stab, markiert deren Länge und schneidet dann an der markierten Stelle die Kopie x_1 ab, *und so weiter*. Die Frage ist nur, was man mit „und so weiter“ meint. Nimmt man die Kopie zum weiteren Abmessen, und dann die Kopie der Kopie ...? Dann erhält man

$$(1) \quad x_0 \approx x_1, x_1 \approx x_2, x_2 \approx x_3, \dots$$

Oder nimmt man immer dieselbe Originalvorlage x_0 ? Dann erhält man

$$(2) \quad x_0 \approx x_1, x_0 \approx x_2, x_0 \approx x_3, \dots$$

Jeder, der Methode (1) versucht hat, weiß, dass so nach wenigen Schritten ein deutlicher Unterschied zum Original erwächst. Durch Methode (2) bleibt die gewünschte Fastgleichheit erhalten. Petri zieht den Schluss, dass die empirische Indifferenz eben *nicht transitiv* ist.

Abb. 10.1 (P1). Gestrichelte Linien bedeuten $\approx$

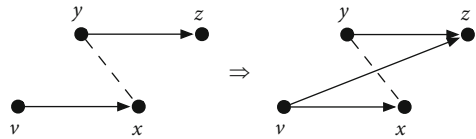
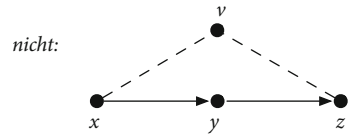


Abb. 10.2 (P2). Gestrichelte Linien bedeuten $\approx$



Grenzen der Nichttransitivität Wenn die empirische Indifferenz aber nicht transitiv ist, sind dann gar keine verlässlichen Aussagen möglich? Tatsächlich lassen sich sehr enge Grenzen für die Abweichung von der Transitivität festlegen. Betrachten wir beispielsweise die Aufgabe, durch direkten Vergleich eine Menge von Stäben der Länge nach zu ordnen. Nehmen wir an, die Person P habe zwischen den Stäben x und y keinen deutlichen Unterschied erkennen können, wohl aber v als deutlich kürzer als x und y als deutlich kürzer als z festgestellt. Dann scheint es plausibel anzunehmen, dass P bei einem direkten Vergleich v als deutlich kleiner als z feststellen würde. Als Postulat:

(P1) Wenn $v < x$, $x \approx y$ und $y < z$, dann gilt $v < z$.

Graphisch ist das Postulat in Abb. 10.1 illustriert.

Weiterhin scheint folgende Annahme plausibel: Wenn P festgestellt hat, dass sowohl x kürzer als y als auch y kürzer als z ist, dann ist nicht zu erwarten, dass es einen Stab v gibt, der zugleich ununterscheidbar von x und von z ist. Man kann also von folgendem Postulat ausgehen:

(P2) Wenn $x < y < z$, dann gibt es kein v , so dass $x \approx v \approx z$.

(P2) ist in Abb. 10.2 illustriert.

Die Postulate (P1) und (P2) spiegeln also einerseits die Tatsache wider, dass empirische Indifferenz im allgemeinen *nicht* transitiv ist, legen aber andererseits sehr *enge Schranken* für die *Abweichung* von der Transitivität fest. Diese Schranken sind von grundlegender Bedeutung für Petris Ansatz. Es mag daher sinnvoll sein, sie an einem weiteren Beispiel zu beleuchten.

Beispiel

Nehmen wir an, wir haben eine Balkenwaage, mit der wir Mengen von Reiskörnern sicher unterscheiden können, wenn sie um ≥ 9 Körner voneinander abweichen. Wenn aber der Unterschied ≤ 6 Körner beträgt, können wir davon ausgehen, dass sich die beiden Mengen die Waage halten.

Betrachten wir die Situation in (P1). Die Variablen sollen jetzt direkt für Anzahl Reiskörner stehen. Der Pfeil etwa von v nach x bedeutet dann $v + 9 \leq x$, und entsprechend für die anderen Pfeile. Die gestrichelte Linie zwischen x und y bedeutet $|x - y| \leq 6$. Man sieht jetzt, dass unter diesen Voraussetzungen immer $v + 12 \leq z$ gilt, das Postulat (P1) für unsere Messanordnung also erfüllt ist.

(P2) gilt aber auch, denn offenbar ist $x + 18 \leq z$, und daher kann es kein v geben, so dass $|v - x| \leq 6$ und $|z - v| \leq 6$.

Anders als Carnap erkennen andere Theoretiker an, dass die Relation der unmittelbaren empirischen Indifferenz nicht transitiv ist, behaupten dann aber, dass dieser eine echte transitive Äquivalenz *zugrundeliege*, die durch nachträgliche Deduktionen aus den unpräzisen Messerhebungen wiedergewonnen werden könne.

Ein bedeutender Vertreter dieser Auffassung ist der US-amerikanische Mathematiker und Begründer der Kybernetik Norbert Wiener. In einem Artikel *A New Theory of Measurement. A Study in the Logic of Mathematics* diskutiert er die Frage in allgemeiner Form und kommt – in das Beispiel der Balkenwaage übertragen – zu folgendem Schluss: Wenn wir beobachten, dass $x \approx y < z$ oder $x < y \approx z$, dann ist in beiden Fällen in Wirklichkeit z schwerer als x . Die zu dieser „in Wirklichkeit schwerer als“-Ordnung gehörende Komplementärrelation ist dann tatsächlich transitiv, also wie die echte Gleichheit eine Äquivalenzrelation.

Petri lehnt diesen Ansatz entschieden ab, und hält dagegen, dass es sich nur um eine *formale* Konstruktion handelt, aus der über die direkte Beobachtung hinaus *keine größere Genauigkeit* deduziert werden kann.

10.4 Referenzskalen

Im Zusammenhang des empirischen Vergleichens besteht die Konstruktion von *Vergleichsskalen* in der Bereitstellung einer Menge ausgezeichnete Objekte als *Referenzen* für Vergleichsvorgänge. Zwei charakteristische Parameter solcher Referenzmengen sind *Auflösung* und *Umfang*: Die Referenzmenge sollte aus einer Anzahl Elemente bestehen, die es erlaubt, möglichst „genau“ zu messen, also eine möglichst hohe Auflösung gestattet. Aus Gründen der Handhabbarkeit ist aber umgekehrt natürlich ein möglichst geringer Umfang der Referenzmenge wünschenswert.

Auflösung Betrachten wir zunächst die Auflösung: Eine Menge von Vergleichsreferenzen ist sicherlich dann ausreichend fein abgestuft, wenn jeder zu vergleichende Gegenstand (innerhalb einer bestimmten Bandbreite) sich zu einem Element der gegebenen Menge als indifferent erweist.

Es ist nicht unmittelbar klar, wie eine derartige Auflösung a priori durch „endogene“ Eigenschaften von Referenzmengen gewährleistet werden kann, da sie ja Aussagen über *alle denkbaren* Vergleichsvorgänge macht.

Unter der Annahme des Postulats (P2) ist das jedoch tatsächlich sehr einfach. Dann ist es nämlich hinreichend und notwendig, dass das folgende Postulat (P3) gilt:

(P3) Zu je zwei direkt aufeinanderfolgende Objekten x, y *innerhalb* der Menge gibt es ein drittes z innerhalb der Menge, das zu beiden indifferent ist.

Zur Erläuterung kehren wir noch einmal zu dem Beispiel mit der Balkenwaage aus dem letzten Abschnitt zurück.

Beispiel

(1) Betrachten wir zunächst eine Menge Z von Referenzgewichten z_i , die jeweils aus $20i$ Reiskörnern bestehen. Diese Menge ist zu grob. Für $v = 30$ Körner ergibt sich $z_1 < v < z_2$ (wobei hier wieder mit $<$ die Relation „beobachtbar schwerer“ gemeint ist). Es gibt also kein Referenzgewicht, das v die Waage hält.

(2) Die Menge Y soll dagegen gerade Gewichte y_i umfassen, die aus $10i$ Körnern bestehen. Jetzt ist es tatsächlich so, dass *jede* zu vergleichende Menge v von Körnern mindestens einem der y_i die Waage halten wird. v bestehe etwa aus 17 Körnern. Dann wird $y_1 < v \approx y_2$ gelten.

Es gibt aber keine Möglichkeit, den Unterschied zwischen den Situationen in (1) und (2) an *den Referenzmengen selbst* festzustellen. In beiden Fällen gilt $z_i < z_{i+1}$ bzw. $y_i < y_{i+1}$.

(3) Das ändert sich aber, wenn wir die Referenzmenge X betrachten, die aus Gewichten x_i zu $5i$ Körnern besteht. Jetzt haben wir *innerhalb* der Menge X jeweils

$$x_i < x_{i+2} \quad \text{und} \quad x_i \approx x_{i+1} \approx x_{i+2},$$

so dass durch Betrachtung der Referenzmenge selbst gewährleistet ist, dass kein zu messendes Gewicht zwischen zwei Referenzen fallen kann. Für die Menge X gilt eben gerade das Postulat (P3).

Kohärenz Eine Konsequenz von (P3) ist, dass die *ganze* Referenzmenge in einer Folge

$$x_1 \approx x_2 \approx \dots \approx x_n$$

von Indifferenzschritten durchlaufen werden kann. Petri bezeichnet diese Eigenschaft als *Kohärenz*. Er sieht sie als ein auch allgemein wichtiges Prinzip: Kohärenz ist u. a. eine notwendige Bedingung für das Empfinden der Stetigkeit. Der Ablauf eines Films erscheint bekanntlich nur deshalb stetig, weil zwischen den Einzelbildern kein Sprung erkennbar ist, die Folge der Bilder also kohärent ist.

In diesem Zusammenhang mag auch die von Zenon von Elea aufgeworfene Frage betrachtet werden, woher es komme, dass ein einzelnes fallendes Hirsekorn kein Geräusch hervorbringt, wohl aber ein fallender Sack Hirse.

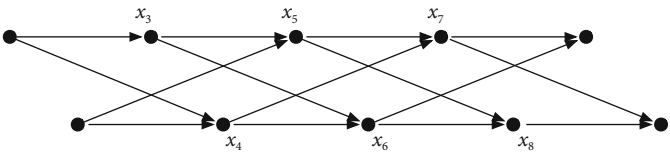


Abb. 10.3 Minimale Referenzskala. Pfeile bedeuten $<$, keine Verbindung: $\approx$

Umfang Es bleibt die letzte Frage, diejenige nach dem *minimalen Umfang* einer Referenzmenge, die (P3) erfüllt. Die ist jetzt aber auch leicht zu beantworten.

Eine Referenzmenge, für die (P3) gilt, ist minimal, wenn jede Teilmenge, in der alle Elemente paarweise indifferent sind, aus genau *zwei* Elementen besteht. In der Sprache der Halbordnungen lautet die Forderung: Jeder Schnitt besteht aus genau zwei Elementen. Ein Ausschnitt aus einer solchen „schmalen“ Referenzmenge ist in Abb. 10.3 dargestellt.

Beispiel
Kehren wir noch ein Mal zu dem obigen Beispiel mit den Reiskörnern zurück. Die Menge X in (3) ist genau von der gewünschten Art. Die Beziehungen in Abb. 10.3 sind für die $x_i \in X$ leicht zu überprüfen.

10.5 Petris Doppelskala

Etwas weniger abstrakt kann man sich der empirischen Indifferenz und korrespondierenden Messskalen auch durch die Betrachtung eines realen Analog-Digital-Umsetzers nähern.

Dieser gerät durch die Ausdehnung seiner Sensoren unvermeidbar in Situationen, in denen ein Wert nicht eindeutig zugeordnet werden kann. Technisch kann man das dadurch auffangen, dass man etwa mit *zwei versetzten* Sensoren abtastet, so dass in jedem Fall *zumindest einer* der beiden Werte eindeutig ist.

Genauso gut könnte man mit *versetzten Skalen* statt mit versetzten Sensoren arbeiten. Petri illustriert die hinter solchen Konstruktionen liegende Idee gern durch die *Doppelskala* in Abb. 10.4.

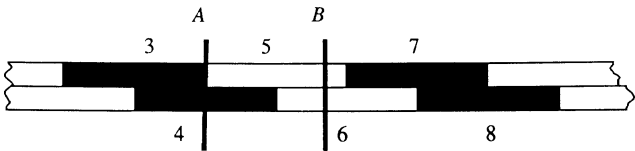


Abb. 10.4 Petris Doppelskala

Der Zeiger in Position *A* gestattet es nicht, auf der oberen Skala einen eindeutigen Wert abzulesen. In solchen Fällen ist es aber *konstruktionsbedingt* immer möglich, einen *definiten* Wert auf der unteren Skala festzustellen (hier 4). Werden also nur eindeutige Ablesewerte *i* zugelassen, erhalten wir zweifelsfreie Ordnungsaussagen der Form $i < i + 2$, können aber im allgemeinen nicht $i < i + 1$ oder $i + 1 < i + 2$ schließen. Dem widerspricht auch nicht, dass es in vielen Fällen (aber eben nicht allgemein) doch möglich ist, auf beiden Skalen einen eindeutigen Wert abzulesen, hier etwa die Werte 5 und 6 in Position *B*. Wir stellen diesen Ablesewert durch die Angabe 5&6 dar.

Wer noch einen Negativstreifen eines Kleinbildfilms besitzt, kann im übrigen feststellen, dass auch dort zur eindeutigen Kennzeichnung einer Aufnahme zwei versetzte Skalen verwendet werden.

Wenn also Lesefehler um ± 1 letztlich unvermeidbar sind, muss die Forderung an eine Messskala sein, dass ein solcher Fehler für den *gegebenen Zweck* tolerierbar ist. Für einen Optiker ist etwa eine feinere Auflösung notwendig als für einen Schreiner.

Eine Skala kann als ausreichend genau angesehen werden, wenn die empirische Ordnungsrelation $<$ durch eine Folge von Fastgleichheiten überdeckt werden kann. Im obigen Beispiel hätte man etwa $3 < 5$ und $3 \approx 4 \approx 5$. Es ist nicht schwer zu erkennen, dass diese Ordnungsstruktur genau dem entspricht, was in den vorangegangenen Abschnitten theoretisch begründet wurde. Die Postulate (P1) und (P2) ergeben sich unmittelbar; und auch Umfang und Auflösung entsprechen dem, was dort gefordert wurde.

10.6 Konflikt und Konfusion

Interessanterweise treten bei der Beschreibung von Messvorgängen auch die bereits in der elementaren Netztheorie beobachteten Phänomene *Konflikt* und *Konfusion* auf. Bei der Doppelskala in Abb. 10.4 könnte man sagen, dass Zeigerposition *A* auf einen Zuordnungskonflikt zwischen den Werten 3 und 5 verweist. Wenn aber umgekehrt der Wert 4 angegeben wird, ist im Nachhinein nicht immer klar, ob dahinter eine Entscheidung zum Übergang auf die versetzte Skala stand – also eine typische Konfusionssituation.

In der Philosophie ist dieses Phänomen bekannt als das Problem von Buridans Esel, der zwischen zwei gleich großen und gleich weit entfernten Heuhaufen steht und schließlich verhungert, weil er sich nicht entscheiden kann, welchen er zuerst fressen soll. Wenn er sich nun aber doch zuerst dem einen Haufen zuwendet, können wir im Nachhinein vermutlich nicht feststellen, ob dieser tatsächlich näher lag oder ob der Esel einen Konflikt durch eine Entscheidung gelöst hat.

10.7 Die zwei Wurzeln der Concurrency-Theorie

Vergleicht man Petris Entwicklung der nichtsequentiellen Prozesse und seinen Ansatz zur Messtheorie, fällt sofort auf, dass beide auf diskreten Ordnungsstrukturen beruhen, bei de-

nen der Komplementärrelation *Nicht-Ordnung* eine entscheidende Bedeutung zukommt. Sowohl die Relation der Nebenläufigkeit co wie auch die der empirischen Indifferenz $\approx$ sind nicht transitiv. Tatsächlich hat Petri oft darauf hingewiesen, dass die beiden Ansätze zwei Ausprägungen derselben Theorie – eben der Concurrency-Theorie – sind. (Die vierte Relation sm rechts unten in Abb. 1.6 in Kapitel 1 soll gerade *Similarity*, *Likeness*, also *Ähnlichkeit* darstellen.)

Bei den nichtsequentiellen Prozessen spielen K-Dichte und Dedekind-Vollständigkeit eine große Rolle. Bei den Messanordnungen sind es kontrollierte Abweichung der empirischen Indifferenz von der Transitivität sowie Stetigkeit in dem Sinn der Überdeckbarkeit durch Indifferenzschritte.

Das scheint eher auf Unterschiede als auf Gemeinsamkeiten hinzudeuten. Wie wir im Folgenden sehen werden, ist die Beziehung zwischen den beiden Fragestellungen aber tatsächlich sehr eng.

10.8 Vollständige K-dichte Messskalen

Sehen wir uns die Skala in Abb. 10.3 an. Sie ist offenbar nicht K-dicht. Eine Linie, die x_4 und x_7 enthält, hat mit dem Schnitt $\{x_5, x_6\}$ kein Element gemeinsam. (Zur Erinnerung: Mit *Linie* ist eine maximale geordnete, mit *Schnitt* eine maximale ungeordnete Teilmenge gemeint.) Wenn wir aber in jeden Schnitt ein zusätzliches Element einfügen, so wie in Abb. 10.5, dann ist die resultierende Struktur K-dicht.

Man könnte diese Konstruktion nun für einen inhaltsleeren Kunstgriff halten, aber so ist es nicht. Betrachtet man Petris Doppelskala in Abb. 10.4, sieht man, dass man in vielen Fällen eben doch eindeutige Werte auf beiden Skalen ablesen kann, nur dass es nicht *immer* so ist. Wir hatten die Zwischenwerte mit $5 \& 6$ usw. bezeichnet. Nimmt man diese unsicheren Werte in die Betrachtung auf und fügt sie so ein, dass die beobachtbare Größer-Ordnung nicht verletzt wird, erhält man z. B. auch Beziehungen der Form $5 \approx 5 \& 6 \approx 6$ und $4 \& 5 < 5 \& 6$. Die entstehende Ordnungsstruktur entspricht genau der in Abb. 10.5 dargestellten, wenn wir die Elemente auf der Mittellinie entsprechend benennen.

Der bemerkenswerte Zusammenhang zwischen Mess- und Prozessbetrachtungen geht aber noch weiter. Verfolgt man nämlich den Zeiger, während er die Doppelskala in Abb. 10.4 von links nach rechts überstreicht, sollte sich das als Prozess darstellen lassen.

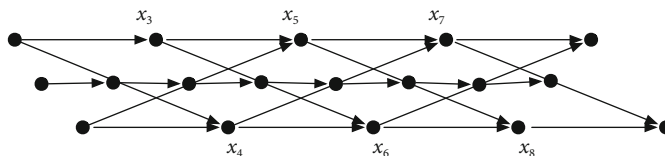


Abb. 10.5 Minimale K-dichte Referenzskala. *Pfeile* bedeuten $<$, keine Verbindung bedeutet $\approx$

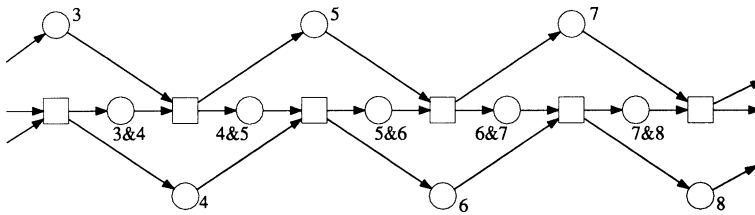


Abb. 10.6 Überstreichen der Doppelskala als Prozess

Zunächst sieht man, dass die Ordnung in Abb. 10.5 nicht Dedekind-vollständig ist. Die Lücken deuten aber an, wo man zusätzliche Elemente zwischen den Messwerten einfügen muss. Diese zusätzlichen Elemente stellen dann aber gerade die Ereignisse des *Übergangs* zwischen den Messablesungen dar.

Als Resultat erhält man gerade das Kausalnetz in Abb. 10.6, das ja schon aus anderen Zusammenhängen bekannt ist, nämlich als Prozess des Vier-Jahreszeiten-Systems in der Einleitung.

10.9 Rückwirkungen der Messordnungen auf Prozesse

Bei den Betrachtungen zur Theorie des Messens bezogen sich die Beispiele auf die physikalischen Fundamentalgrößen *Gewicht* und *Länge*. Dieselben Fragen treten aber auch in Bezug auf die dritte Fundamentalgröße der Physik – die *Zeit* – auf, und zwar immer dann, wenn es darum geht, Entscheidungen zu treffen, bei denen es auf die Reihenfolge wechselseitig unabhängiger Ereignisse ankommt.

Beispiel

Im Sport ist das eine der typischen Fragestellungen. Beim 100-Meter-Lauf wird der Sieger bestimmt durch Feststellung der zeitlichen Ordnung der „nebenläufigen“ Ereignisse Überquerung der Ziellinie (Wortspiel nicht beabsichtigt, aber billigend in Kauf genommen). In diesem speziellen Fall kann zur Entscheidung der zeitlichen Reihenfolge das Problem auf einen räumlichen Vergleich anhand eines Zielfotos zurückgeführt werden.

Beispiel

Deutlich komplexer ist die Situation bei der *Abseitsregel* beim Fußball. Im Unterschied zum 100-Meter-Lauf müssen hier zwei Ereignisse geordnet werden, die an verschiedenen Orten stattfinden, das Abspielen des Balls und die Überquerung der Abseitslinie durch einen anderen Spieler. Mit dem Problem haben sich schon Augenspezialisten beschäftigt und in der renommierten medizinischen Fachzeitschrift *Lancet* dokumentiert: Der Linienrichter muss den Blick von einem Punkt zum anderen wandern lassen. Das nimmt Zeit in Anspruch, typischerweise etwa 250–300 Millisekunden. Bei einer

geschickt aufgebauten Abseitsfalle kann das zu einer Fehleinschätzung in der Größenordnung von 4,50 Meter führen. Bei der Bewertung muss der Linienrichter dann aus der zweiten Beobachtung zu dem Zeitpunkt zurückrechnen, an dem der Ball abgespielt wurde. Im Sport sind solche Fragen natürlich besonders kritisch, weil die Entscheidungen weitreichende Folgen haben. Sieg oder Niederlage kann davon abhängen.

Bei den oben betrachteten Messanordnungen zum Längen- und Gewichtsvergleich ergab sich, dass man immer mit einer ± 1 -Unschärfe rechnen muss. In einem wohlgestalteten System versucht man, die Auswirkungen gering zu halten, in dem Sinn, dass eine solche Abweichung für den jeweils betrachteten Zweck erträglich ist. Tatsächlich kann man dieselbe Idee bei der Bewertung der Reihenfolge nebenläufiger Ereignisse anwenden.

Beispiel

Zur Illustration stelle man sich einen Bus vor, der sich der Haltestelle nähert. Wenn ein Fahrgast wartet, muss der Fahrer anhalten und ihn mitnehmen. Wenn niemand wartet, darf der Fahrer ohne zu halten vorbeifahren. Nun hat sich ein Kunde bei dem Fuhrunternehmen beschwert, er habe gewartet, aber der Bus habe nicht angehalten. Der Fahrer entgegnet, der Kunde habe *nicht* gewartet, als der Bus die Haltestelle passiert hat. Er habe im Rückspiegel gesehen, dass der Fahrgast eindeutig später gekommen sei. Es steht Wort gegen Wort, und der Fall wird wohl nicht geklärt werden.

Aber *eins* geht daraus hervor: Wenn es Streit um *diesen* Bus gibt, dann ist der Fahrgast unzweifelhaft rechtzeitig zum *nächsten* gekommen. Es geht also auch hier wieder um ein typisches ± 1 -Problem. Wenn die Bus-Frequenz ausreichend ist, kann der Schaden entsprechend eingegrenzt werden.

Beispiel

Betrachten wir noch einmal die Druckersteuerung in Abb. 1.9 der Einleitung. Diese sei so eingerichtet, dass in dem Fall, dass Akteur *a* Bedarf angemeldet hat (Marke auf Stelle *a*?) und die Steuerung bereit ist, die Anfrage anzunehmen (Marke auf *c_a*), sie dann auch wirklich dem Akteur *a* den Drucker zuweist. Wenn die Steuerung aber feststellt, dass *a*? nicht erfüllt ist, soll das Ereignis *l_a* eintreten und so dem Akteur *b* den Drucker anbieten. Das Schlimmste, was passieren kann, ist, dass *a einmal* übergangen wird, etwa wenn das Anfrage-Signal auf *a*? sich noch nicht stabilisiert hat.

Wenn also der innere Abfragezyklus nur so schnell abläuft, dass sich die Signale innerhalb eines Zyklus stabilisieren können, erhält man wieder ein ± 1 -Problem, mit dem man leben kann, aber vermutlich auch leben muss, weil keine entscheidend andere Lösung möglich scheint: Die Modellierung ohne Konfusion ist unmöglich und die Steuerung muss auf einer Prioritätsregelung beruhen, die anhand der Reihenfolge der nebenläufigen Ereignisse entscheidet, die in die Konfusion eingehen. (Es sei aber betont, dass es nur um zeitliche Reihenfolge von Ereignissen in der *unmittelbaren Umgebung eines potentiellen Konflikts* geht, nicht etwa um die Annahme einer Globalzeit.)

Abb. 10.7 Petri und die Globalzeit?



Petri hat sich mit dieser Folgerung seiner Messtheorie für zeitliche Reihenfolge nicht explizit beschäftigt, wohl auch deshalb, weil er die Theorie zu einer Zeit entwickelt hat, als er noch der Ansicht war, man könne in der Modellierung ohne Konfusion auskommen.

Kehren wir noch einmal zu der Diskussion zwischen Dijkstra, Meisel und Petri in Abschn. 6.2 zurück, in der es um den *Glitch* ging. Allen dreien ist zuzustimmen. Derartige Phänomene sind aus naturgesetzlichen Gründen unvermeidbar; es kann nur darum gehen, die Folgen zu minimieren. Und, wie Petri in diesem Zusammenhang bemerkt hat, *das Problem ist die Konfusion*.

Inhaltsverzeichnis

11.1 Weitere Institutsaktivitäten 109

11.2 Zeit und Stochastik 110

11.3 Advanced Course 111

11.4 Ehrungen 111

11.5 Werner-von-Siemens-Ring 112

11.6 Weitere Ehrungen 113

Anfang der 80er Jahre saß Petri fest im Sattel. Sein Institut bestand aus einer eingeschworenen Gemeinde, die ihre Bedeutung sicher nicht unterschätzte. Was dort ablief, wurde von den eher bodenständig orientierten Kollegen anderer Institute oft als abgehobenes Glasperlenspiel angesehen. Das Institut für Systemforschung (ISF) – als es noch so hieß – wurde gelegentlich sogar als Institut für Science Fiction gebrandmarkt. Wie dem auch sei, das Institut war – um im Jargon zu bleiben – das *Mothership der Netztheorie*. Gastforscher aus aller Welt gaben sich die Klinke in die Hand, um von dem Meister zu lernen. Denn das war er inzwischen geworden: der uneingeschränkte Verwalter der Einsichten der Netztheorie. Manche würden ihn als Papst der Netze bezeichnen – andere aber nicht, weil, wie jemand einmal bemerkte, der Papst noch einen über sich hat.

Seine Art war berühmt und gefürchtet. Er konnte stundenlang erläutern. Wenn man als Mitarbeiter mit der Aufforderung „Haben Sie einen Augenblick Zeit?“ zu einem Gespräch in sein Arbeitszimmer eingeladen wurde, war der Tagesplan nichts mehr wert. Erfolgte die Aufforderung vormittags, konnte man Mittagessen vergessen, erfolgte sie nachmittags, musste man das Abendprogramm verschieben.

Man saß da, Petri hielt die Zigarette in der Linken, den Stift in der Rechten, und erläuterte mit Diagrammen und kleiner Schrift netztheoretisch basierte Verfahren zur Abüstungskontrolle, die Fehler der Bohrschen Auffassung der Quantenmechanik, den Un-



Abb. 11.1 Petri Mitte der 80er Jahre

terschied zwischen Information und Entropie (im wesentlichen nur das Vorzeichen) oder den Grund, in Bedingungs-Ereignis-Systemen keine Nebenbedingungen zuzulassen. Die Sekretärin, Frau Kuhle, brachte immer wieder Kaffee bis sie dann zu fortgeschrittener Stunde vorsichtig fragte, ob sie noch gebraucht würde. Draußen wurde es dunkel, aber man traute sich nicht vorzuschlagen, das Licht anzuschalten. Zwischendurch hielt Petri mitten in einem Gedanken inne, blieb minutenlang unbeweglich sitzen, die Zigarette glühte vor sich hin. Kurz bevor die Aschesäule abbrach, sprach er weiter an eben der Stelle, an der er innegehalten hatte. Offensichtlich hat er viele seiner Gedanken auf diese Art in den Sprechpausen weiterbearbeitet.

Einen bestimmten Mitarbeiter lud er aber nicht gerne zu solchen Gesprächen ein, mit der Begründung: „Der monologisiert immer so“, um dann gleich hinzuzufügen: „Dabei monologisiere ich doch selbst so gern.“

Letztlich waren diese Gespräche aber die beste Möglichkeit, von Petris Wissen zu profitieren, und oft auch die einzige; er hat seine Erkenntnisse immer nur sporadisch veröffentlicht. Auch bei Konferenzen konnte man nie sicher sein, welches Thema er anschnitten würde. Als Material für einen Vortrag packte er einmal noch einige Folien ein, mit der Bemerkung: „Falls Fragen kommen.“ Auf das Erstaunen hin, wie er denn vorausahnen könne, welche Fragen gestellt werden würden, kam die einfache Antwort: „Ich tu so als würde ich die Frage beantworten, lege dann diese Folien auf und erläutere sie.“

Reisen Anfang der 80er Jahre konnte er die immer häufigeren internationalen Einladungen nicht alle annehmen. Oft ließ er sich aus Krankheitsgründen entschuldigen, gelegentlich gab er als Begründung an, der Vorstand hätte keine Reisegenehmigung erteilt. Prof. Norbert Szyperski, von 1981 bis 1986 Vorstandsvorsitzender der GMD, erinnert sich: „Wenn ich Herrn Petri begegnete, eröffnete ich das Gespräch schon mal mit der Frage, welche Reise ich ihm denn diesmal verbieten sollte.“



Abb. 11.2 Petri in China 1981

Ein Land gab es allerdings, bei dem er jede Möglichkeit zu einem Besuch nutzte: China. Ihn faszinierten die Menschen, die Geschichte, die Kultur und die Natur. Bis ins hohe Alter hielt er dort immer wieder Vorträge und Vorlesungen an verschiedenen Universitäten und Akademien. Umgekehrt lud er immer wieder chinesische Gastforscher in die GMD ein.

Wegbereiter Die weltweite Verbreitung der Netztheorie wurde ab den 1980er Jahren aber auch insbesondere durch Grzegorz Rozenberg und Wolfgang Reisig entscheidend vorangetrieben.

Rozenberg, ein aus Polen stammender niederländischer Informatiker, war seit 1979 Professor an der Universität Leiden, wo er sich u. a. mit Automatentheorie und formalen Sprachen beschäftigte. Er nahm am ersten Advanced Course 1979 in Hamburg teil, und erkannte schnell das Potential der Petrinetze. Auf Grund seiner Kombination aus wissenschaftlichem Renommee und herausragenden Management-Fähigkeiten avancierte er bald zum unbestrittenen Oberhaupt der Netz-Gemeinde. Er organisierte Konferenzen, war Herausgeber von Schriftenreihen, u. a. die jährlich im Springer-Verlag erscheinenden *Advances in Petri Nets*; letztlich gab es kaum eine größere Aktivität auf dem Netz-Gebiet, an der er nicht maßgeblich beteiligt war.

Im Rahmen der jährlichen internationalen Petrinetz-Konferenz gab es auch immer ein einleitendes Tutorium. Hier hatte sich Rozenberg mit sicherem Gespür das Filetstück reserviert: die Einführung in die grundlegenden Bedingungs-Ereignis-Systeme.

Wenn man ihm auf einer Konferenz begegnete, konnte man damit rechnen, mit einer *dringenden* Aufgabe beauftragt zu werden, beispielsweise die Erstellung eines Gutachtens über einen eingereichten Artikel: "The deadline is in two weeks." Auf die Erwiderung, dass man *überhaupt* keine Zeit habe, zeigte er sich verständnisvoll, überlegte kurz und entschied: "Tell you what, we will make that *three* weeks."

Wolfgang Reisig war der Verfasser des ersten Standardwerks über Petrinetze, das Anfang der 80er Jahre zunächst auf deutsch, später dann auch in englischer, italienischer,



Abb. 11.3 Von links nach rechts: Wolfgang Reisig, Petri, Grzegorz Rozenberg

polnischer, chinesischer und japanischer Übersetzung erschien. 1984 kam er zur GMD, wo er dann die Netzentwicklung im Sinne einer anwendungsorientierten Grundlagenforschung gemäß dem Leitspruch: „Nichts ist so praktisch wie eine gute Theorie“ maßgeblich beeinflusste. Mit diplomatischem Geschick förderte er die Verbreitung der Netze auch in Fachkreisen, die eher anderen Modellierungsmethoden zugeneigt waren, indem er immer wieder Vorträge hielt der Art: „Was Petrinetze und Modell X voneinander lernen können“.

Seinen Schwerpunkt sah er nicht in der Auseinandersetzung mit Petris physikalisch-philosophischen Ansätzen, obwohl – wie der Autor aus eigener Erfahrung weiß – er auch dazu durchaus Substantielles zu sagen hatte. 1988 nahm er eine Professur an der Technischen Universität München an, wohin bereits vorher Wilfried Brauer von der Universität Hamburg gegangen war, so dass dort jetzt eine der Hochburgen der Netztheorie entstand. 1993 wechselte er an die Humboldt-Universität Berlin – in einem gewissen Sinn auch eine Art deutsch-deutsche Wiedervereinigung. Dort war nämlich bereits Peter Starke tätig, der wohl prominenteste Vertreter der Netze in der DDR.

Ein großer Unterstützer der Ansätze Petris war zu der Zeit Prof. Norbert Szyperski, ab 1979 Mitglied des Aufsichtsrats der GMD, von 1981 bis 1986 Vorstandsvorsitzender, danach bis Frühjahr 1991 Vorsitzender des Aufsichtsrates. Bis 1981 hatte Szyperski an der Universität Köln einen Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre inne. 1984 wurde er Gründungspräsident des Trägervereins für das Deutsche Forschungsnetz (DFN). Vor diesem Hintergrund erkannte er insbesondere die weitreichende interdisziplinäre Relevanz der Petrinetze. In persönlichen Gesprächen mit Petri und seinen damaligen Mitarbeitern hat der Autor den Eindruck gewonnen, dass die Jahre unter Szyperski zu den fruchtbarsten der GMD gehörten.

Tatsächlich sucht Szyperski bis zum heutigen Tag im Rahmen seiner vielfältigen Tätigkeiten zur Förderung innovativer Technologien die Ideen Petris einzubringen. Der Autor ist daher besonders dankbar, dass Prof. Szyperski sich bereit erklärt hat, ein Geleitwort für die vorliegende Ausarbeitung zu verfassen. Und darüber hinaus ist er der Überzeugung, dass Petri das genauso gesehen hätte.

11.1 Weitere Institutsaktivitäten

Im Zuge einer Reorganisation der GMD ging 1982 das von Petri geleitete Institut für Systemforschung (ISF) in das neugegründete Institut für methodische Grundlagen (IMG) auf, in dem Bereiche mit eher langfristigen Perspektiven zusammengefasst wurden. Das IMG erhielt eine kollegiale Institutsleitung, bestehend aus Petri, Prof. Fritz Krückeberg und Prof. Ulrich Trottenberg.

Krückeberg war bis 1981 wissenschaftlich-technischer Geschäftsführer und Vorstandsvorsitzender der GMD und wurde in dem Triumvirat geschäftsführender Leiter. Er war schon lange mit den Arbeiten Petris vertraut und unterstützte ihn auch in der Institutsleitung nach Kräften, u. a. indem er ihn von vielen administrativen Tätigkeiten entlastete, für die Petri offensichtlich keine große Neigung empfand. Aber auch inhaltlich förderte er in seiner Institutsabteilung die Entwicklung der Netze; viele seiner Mitarbeiter arbeiteten an Methoden zur algorithmischen Analyse von Petrinetzen. Darüber hinaus wurden in der Abteilung Krückeberg Verfahren der Intervallarithmetik untersucht, eine Methodik zur Fehlerabschätzung bei numerischen Berechnungen.

Die Gruppe um Trottenberg bestand aus Mathematikern, die sich mit numerischen Algorithmen beschäftigten, u. a. mit Mehrgittermethoden zur Auswertung von Differentialgleichungen. Organisatorisch funktionierte die Zusammenarbeit der Institutsteile gut, der möglicherweise erhoffte inhaltliche Synergieeffekt hielt sich jedoch in Grenzen. Zu Einzelheiten sei auf die bereits erwähnte *Geschichte der GMD* [21] verwiesen.

Im Rahmen seiner Institutsleitung förderte Petri neben der Netztheorie auch Bereiche, von denen er bedeutende Beiträge für die Kommunikation mit Automaten im weiteren Sinn sah. War es in den Anfangsjahren des ISF u. a. um Software-Technologie und Datenbanken gegangen, verlagerten sich die Aktivitäten später insbesondere auf die Erforschung von alternativen Rechnerkonzepten und die rechnerunterstützte Mathematik.

Alternative Rechnerarchitekturen Die meisten heute benutzten Computer sind nach dem Prinzip der Von-Neumann-Architektur aufgebaut, bei denen Programmbefehle sukzessive auf in Speicherzellen gehaltene Daten angewendet werden. Im Grunde handelt es sich dabei um die Realisierung der bereits bei der Turingmaschine vorgeschlagenen Arbeitsweise.

Neben der Turingmaschine gibt es aber noch weitere Berechnungsmodelle, die gleich mächtig sind, jedoch von gänzlich anderen Ansätzen ausgehen. Eins davon ist der Churchsche *Lambda-Kalkül*, bei dem komplizierte Ausdrücke zur Berechnung einer Funktion

nach bestimmten Regeln zu einfacheren reduziert werden, bis das Resultat vorliegt. Ein Ansatz, eine entsprechende *Reduktionsmaschine* zu entwerfen, die direkt nach diesem Prinzip arbeitet, wurde in den 70er und Anfang der 80er Jahre im Petri-Institut untersucht, und es wurde sogar der Prototyp einer entsprechenden Maschine realisiert, die aber wegen der überwältigenden Konkurrenz der Von-Neumann-Maschinen nicht in Serie ging. Die beiden Hauptprotagonisten Klaus Berkling und Werner Kluge führten die theoretischen Arbeiten später an der Universität Syracuse in den USA bzw. an der Universität Kiel weiter.

Computeralgebra Der Einsatz von Computern in der Mathematik beschränkte sich bis Mitte der 60er Jahre auf numerische Berechnungen. Zu der Zeit kam dann die Idee der Computeralgebra auf, bei der der Rechner selbst symbolische Formelumwandlungen vornahm. Damit dringt der Computer in die eigentliche Mathematik ein, und entlastet den praktizierenden Mathematiker, indem er notwendige aber lästige Umformungen übernimmt. So können z. B. komplexe Systeme partieller Differentialgleichungen maschinenunterstützt symbolisch gelöst werden. Petri sah sehr früh die Tragweite dieser Art von Kommunikation mit Automaten und baute im Institut eine entsprechende Forschungsgruppe auf. Besonders eng war dabei die Zusammenarbeit mit dem Entwickler des sogenannten Reduce-Systems, Prof. Anthony Hearn von der Universität Utah und Mitarbeiter der Rand-Corporation.

11.2 Zeit und Stochastik

Mit der Verbreitung der Netze kam auch der Wunsch auf, sie in den verschiedenartigsten Zusammenhängen einzusetzen. In der Leistungsbewertung von Systemabläufen (englisch *Performance Evaluation*) war man etwa daran interessiert, zeitliche Beziehungen durch Netze auszudrücken. Dazu wurden Netzklassen vorgeschlagen, bei denen das Schalten von Transitionen oder die Aufenthaltsdauer von Marken auf Stellen mit Zeitparametern versehen werden.

Der erste einer Reihe von Internationalen Workshops speziell zu diesem Thema fand bereits 1985 in Turin statt. So sinnvoll solche Ansätze in der Praxis auch sein mögen, für Petri stellen sie geradezu einen Widerruf seiner Fundamentalannahme dar, dass man in großen Systemen auf globale Zeitannahmen verzichten muss. Wie bei den Stellen-Transitionen-Netzen wird gerade das, was Petri aus der Theorie entfernen wollte, sogleich durch die Hintertür wieder hineingetragen. In Anbetracht der ersten Konferenz in Italien hat er sich aber vielleicht der Worte des großen italienischen Dichters Dante Alighieri erinnert: „Segui il tuo corso e lascia dir le genti“ – folge deinem Weg und lass die Leute reden.

Gemäß seiner Grundannahmen konnte er sich genauso wenig mit stochastischen Ansätzen anfreunden, bei denen etwa die Schaltdauer von Transitionen nach Maßgaben der Wahrscheinlichkeitsrechnung festgelegt oder Konflikte probabilistisch gelöst werden.

11.3 Advanced Course

Nach dem ersten großen Advanced Course on Petri Nets 1979 in Hamburg wurde 1986 der zweite in Bad Honnef bei Bonn veranstaltet. Petri hielt zwei Vorträge, *Concurrency Theory* und *“Forgotten Topics” of Net Theory*. In letzterem hebt er die für ihn wichtigen Fragen hervor, und grenzt sich von – seiner Ansicht nach – vorschnellen und leichtfertigen Erweiterungen des Netzmodells ab.

Die Idee der Advanced Courses wurde 1993 von einem ehemaligen Mitarbeiter Petris, César Fernández, aufgegriffen. Unter seiner Leitung wurde ein *Latin American Petri Nets Course '93* in Santiago de Chile abgehalten. Dieser wurde gefolgt von dem *Second International Course on Petri Nets for Latin America* im November 1995 in Campina Grande, Brasilien.

11.4 Ehrungen

Nachdem sich Petrinetze in den 1980er Jahren endgültig als Modellierungstechnik durchgesetzt hatten, ist Petri vielfach geehrt worden.

1988 erhielt er das Verdienstkreuz 1. Klasse des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland.

1988 wurde Petri zum Honorarprofessor der Universität Hamburg ernannt. In dem Brief, mit dem er die Benachrichtigung über die Ernennung erhielt, stand, dass er bis zum tatsächlichen Ernennungsakt „vorläufig berechtigt“ sei, den Titel Professor zu führen. Auf die Frage, was das bedeute, antwortete er: „Ich kann nicht einfordern, dass man mich mit Herr Professor anredet, muss aber auch nicht mehr widersprechen, *wenn* man es tut.“ Bis dahin *hatte* er immer widersprochen, mit der Bemerkung, dass er keine Lehrtätigkeit aus-



Abb. 11.4 Petri mit Ehefrau Christel. Feier zu Ehren von Petris 60. Geburtstag 1986 im Schloss Birlinghoven

übte. Der Universität Hamburg blieb Petri bis zu seinem Tod verbunden. U. a. hielt er dort noch lange Jahre Seminare über Allgemeine Netztheorie.

1989 wurde er kurz nach der Gründung der Academia Europaea in London zum Mitglied gewählt. Ziel der Akademie ist es unter anderem, das Verständnis der Wissenschaften in der Gesellschaft zu fördern. Sie hat etwa 2000 Mitglieder, unter ihnen 38 Nobelpreisträger.

1993 erhielt Petri die Konrad-Zuse-Medaille der Gesellschaft für Informatik. Dieser Preis wird seit 1987 alle zwei Jahre für besondere Verdienste um die Informatik verliehen. Die Konrad-Zuse-Medaillen sind die bedeutendsten Auszeichnungen für Informatik in Deutschland. In der Begründung heißt es:

Professor Dr. rer. nat. Carl Adam Petri gehört zu den führenden, weltweit anerkannten und noch immer wissenschaftlich aktiven Pionieren der Informatik. Vor über 30 Jahren begann er – seiner Zeit weit voraus –, eine allgemeine Theorie diskreter Systeme zu entwickeln, die auf den Konzepten der Nebenläufigkeit, der Verteiltheit und der asynchronen Kommunikation aufbaut. Durch ideenreiche Mitwirkung Petris entstand ein neues Gebiet der Informatik, das Teile der theoretischen, der praktischen und der technischen Informatik umfasst sowie viele Anwendungen in anderen Disziplinen hat. Ein wesentliches Konzept und Modellierungshilfsmittel für verteilte Systeme und parallele Prozesse, mit dem zugleich auch das gesamte Forschungsgebiet bezeichnet wird, trägt den Namen seines Erfinders: das Petrinetz.

11.5 Werner-von-Siemens-Ring

Die Ehrung, die ihn persönlich am meisten bewegt hat, war aber unzweifelhaft die Verleihung des Werner-von-Siemens-Rings 1997, ein mit Smaragden und Rubinen besetzter Goldring. Er gilt als eine der höchsten deutschen naturwissenschaftlich-technischen Auszeichnungen, und wird etwa alle drei Jahre verliehen. Berühmte Ringträger sind u. a. Werner von Braun, deutscher und später US-amerikanischer Raketeningenieur; Walter Bruch, Pionier des deutschen Fernsehens, der das PAL-Farbfernsehsystem entwickelte; Artur Fischer, der Erfinder des Fischer-Dübels; und als einziger weiterer Informatiker Konrad Zuse. Petri war auf Vorschlag der Ringträgerin 1993, Prof. Eveline Gottzein, nominiert worden, einer zufällig ebenfalls aus Leipzig stammenden Ingenieurin, Expertin u. a. für Trag- und Führungssysteme bei Hochgeschwindigkeits-Magnetbahnen. In ihrer Laudatio sagte sie:

Bei den Ingenieuren führten Petrinetze zu einem Durchbruch in der Behandlung diskret gesteuerter Systeme. Petrinetzen kommt bei der Lösung des Entwurfsproblems eine Schlüsselrolle zu, weil diese erstmals eine eindeutige Beschreibung und auch eine aussagekräftige Analyse diskret gesteuerter Systeme zulassen. Auf der Basis von Petrinetzen können nun auch für diskrete Steuerungssysteme System-Invarianten angegeben werden.

Bei der Verleihung war auch der damalige Bundespräsident Roman Herzog, in seiner Eigenschaft als Schirmherr des Stiftungsrats, anwesend. Auf ihn schien der System-Ansatz Petris aber keinen bleibenden Eindruck hinterlassen zu haben. Petri erinnert sich: „Herzog war zuvor Präsident des Bundesverfassungsgerichts gewesen. Deshalb sprach ich ihn

an; ich sagte, dass ich das Werkzeug, für das ich jetzt geehrt wurde, bereits für die Analyse parlamentarischer Debatten und Gerichtsprozesse verwendet hatte. Ich erhoffte einen Kommentar. Er gab ihn: „Da hättense was Besseres tun können“. Sprach’s und wandte sich Herrn Bölkow zu, der Flugzeuge gebaut hatte.“

11.6 Weitere Ehrungen

1999 wurde Petri Ehrendoktor der Universität Zaragoza in Spanien. Die lokale Presse berichtete unter der Überschrift „Karl Petri. El Filósofo de la Informática“ über die Ernennung; sie hatten den vermeintlichen Rechtschreibfehler im Namen Carl stillschweigend korrigiert.

2003 wurde Petri Commandeur in de Orde van de Nederlandse Leeuw. Der Orden vom Niederländischen Löwen wurde 1815 von König Wilhelm I. gestiftet und ist der höchste zivile Verdienstorden in den Niederlanden. Als Großmeister nimmt der König oder die Königin die Ernennungen unter der Verantwortung des zuständigen Ministerrates vor.

2007 wurde Petri für sein Lebenswerk von der Academy of Transdisciplinary Learning and Advanced Studies (ATLAS) mit einer Ehrenmedaille in Gold geehrt.

2008 erhält Petri den renommierten IEEE Computer Pioneer Award.

Die Ehrungen können aber auch in die umgekehrte Richtung gehen: Zu Ehren Petris vergibt die Society for Design and Process Science (SDPS) einmal im Jahr den nach ihm benannten Carl Adam Petri Distinguished Technical Award. Der erste Preisträger war im Jahre 2000 Prof. Tadao Murata von der Universität in Chicago, der sich u. a. um die Verbreitung der Petrinetze in den USA verdient gemacht hat.

Inhaltsverzeichnis

12.1 Rentner 116

12.2 Netztheoretische Grundlagen der Physik 117

12.3 Formale Pragmatik 118

12.4 Abschließende Bemerkungen 120

Nach langer schwerer Krankheit starb 1988 Petris Ehefrau Christel, mit der er 32 Jahre verheiratet gewesen war. Wie sein Sohn Tobias berichtet, musste er daher ab 1987 in seiner Arbeit etwa fünf Jahre kürzer treten. Ganz hat er sich wohl nie mehr von diesem Schlag erholt.

Es kam hinzu, dass in dieser Zeit die Forschungspolitik der GMD von der Grundlagenforschung wegstrebte. Insbesondere gehörte Prof. Gerhard Goos, von 1986 bis 1991 technisch-wissenschaftliches Vorstandsmitglied der GMD, nicht unbedingt zu den Förderern Petris. Goos war zusammen mit seinem Mentor Friedrich Ludwig Bauer Verfasser eines der ersten deutschen Informatik-Lehrbücher. Bei der GMD war Goos zuvor Leiter des Instituts für Systemtechnik und der Karlsruher Forschungsstelle für Programmstrukturen gewesen und schien jetzt bestrebt, das Petri-Institut ebenfalls nach seinen Vorstellungen zu prägen. Ob da gelegentlich auch außerwissenschaftliche Erwägungen eine Rolle spielten, sei dahingestellt. Eine Folge war aber zumindest, dass schon sehr früh im Vorfeld der Pensionierung Petris öffentlichkeitswirksam nach einem Nachfolger aus einer *netzfremden* Forschungsrichtung gesucht wurde.

Petri kommentierte diese Ausprägung der Forschungspolitik achselzuckend so: „Es geht ja schließlich um die Nachfolge auf dem Stuhl Petri.“ Chinesische Gastforscher, die zu der Zeit im Institut tätig waren, bekamen die gedämpfte Stimmung natürlich mit, und fühlten sich an die von ihnen so bezeichneten „schweren Jahre“ erinnert, als Deng Xiaoping ihr Land führte.

Nachfolger auf dem Stuhl Petri wurde dann Prof. Thomas Lengauer, der im Institut ab 1991 eine leistungsfähige Forschungsgruppe zur Bioinformatik aufbaute. Ganz fachfremd war Lengauer aber nicht, er hatte über Petrinetze promoviert.

12.1 Rentner

Im Alter von 65 Jahren schied Petri 1991 aus dem offiziellen Berufsleben in der GMD aus. Sein Lebenswerk sah er aber noch lange nicht als vollendet an. Er beabsichtigte u. a. ein Buch zu schreiben, in dem er seine persönliche Auffassung der Netztheorie darstellen wollte. Tatsächlich beruht die vorliegende Ausarbeitung zu einem nicht unerheblichen Teil auf entsprechenden handschriftlichen Skizzen, die er während eines Türkei-Urlaubs 2002 in Antalya verfertigt hat. Wie er dort sagt, hatte ihn sein früherer Vorgesetzter, Norbert Szyperski, zu einer solchen Aufarbeitung ermuntert. Petri empfand die Darstellung aber als so vorläufig, dass er zunächst von einer Veröffentlichung Abstand nahm. Später ist er nicht mehr dazu gekommen, wohl weil er seine nachlassenden Kräfte lieber auf neue Aufgaben ausrichten wollte und nicht auf Rückblick.

Privatgelehrter Bisher war Petri es gewohnt, seine Manuskripte handschriftlich zu formulieren, die Reinschrift dann von seiner Sekretärin oder gelegentlich auch von seiner Ehefrau erstellen zu lassen. Nun beschloss er, sich nach über 20 Jahren rein theoretischer Tätigkeit wieder praktisch mit Computern zu beschäftigen und richtete einen Heimarbeitsplatz mit PC ein. Auf dem Rechner liefen neben den üblichen Büroanwendungen auch Programme zur Computeralgebra, die er intensiv bei seinen weiteren Arbeiten einsetzte.

Je mehr er sich mit den inzwischen entstandenen Möglichkeiten der Heimrechner vertraut machte, umso mehr begann er, seine Vorträge und deren Präsentation mit den mod-



Abb. 12.1 Petri um 1991

ernsten Hilfsmitteln zu erstellen, wobei ihm sein Sohn Tobias sehr oft mit der graphischen Ausarbeitung half. War zunächst geplant, ein Buch mit beiliegender CD zu verfassen, verlegte Petri sich hauptsächlich auf die Erstellung von CD-*Vorträgen*, die er dann auch als solche vorstellte und verteilte.

Lehrtätigkeit Bis 2007 führt er seine Seminare in Hamburg fort. Daneben hält er auch noch wiederholt Vorlesungen an verschiedenen Universitäten in China. Mit China hatte Petri schon seit langem besondere Beziehungen, und auch in seinen letzten Jahren war es ihm eine besondere Freude, seine Erkenntnisse dort verbreiten zu können. An der Pekinger Universität hielt er Vorlesungen vor großem Publikum. Diese wurden gefilmt und in dieser Form auch den anderen chinesischen Universitäten zur Verfügung gestellt.

Die letzten Vorlesungen, die er bis Anfang 2008 noch in Form von Präsentationen auf CD für die Universität von Xi'an ausgearbeitet hatte, konnte er wegen ärztlicher Bedenken gegen Flugreisen nach China dann nicht mehr selbst halten; er vertraute Prof. Rüdiger Valk aus Hamburg, der dort ebenfalls als Gastdozent eingeladen war, das gesamte neue Material an, und Valk hielt Petris Vorlesungen dann stellvertretend für ihn. Die CD von 2008 mit dem Titel *On the physical Basis of Information Flow* liegt ebenfalls noch vor.

Das Licht erlischt Gesundheitlich sollte sich Petri nicht wieder erholen. Körper und Geist bauten stetig und irreversibel ab. Zehn Tage vor seinem 84. Geburtstag starb Carl Adam Petri in Siegburg. Wie hatte sein Sohn Tobias das Gemälde Konrad Zuses geschildert, das in Petris Arbeitszimmer der GMD und später in seinem Wohnzimmer zu Hause hing?: „Ein Bild, in dem man eine Staude mit schlanken, sich zum Licht hin öffnenden Blüten erkennen kann.“

12.2 Netztheoretische Grundlagen der Physik

In seinen späten Arbeiten beschäftigt Petri sich insbesondere mit der Beziehung der Netze zur Physik, wobei er jetzt verstärkt die Betonung darauf legt, wie *physikalische Gesetze* diskret (Petri bevorzugt die Bezeichnung *kombinatorisch*) *durch Netze dargestellt* werden können. Besonderes Augenmerk legt er zum einen auf die *Lorentz-Transformation*, die beschreibt, wie in der speziellen Relativitätstheorie die Feststellung von Zeit und Ort von Ereignissen durch verschiedene Beobachter zueinander in Beziehung stehen. Zum anderen will er durch seinen kombinatorischen Ansatz dazu beitragen, den vermeintlichen *Paradoxien der Quantenmechanik* auf die Spur zu kommen.

Seine Ansätze veröffentlicht er u. a. 1996 in dem Artikel *Nets, Time and Space* in der Zeitschrift *Theoretical Computer Science* [16]. Eine Übersicht liegt auch in Form einer CD-Präsentation *Petri's Belated Insights* von 2005 vor. Dasselbe Thema, diesmal mit besonderer Betonung der Zusammenarbeit mit Konrad Zuse, behandelt er in der CD *Computing Nets Universe – dedicated to Konrad Zuse*. 2007 verfasst er einen Artikel *Das Universum als großes*

Abb. 12.2 Petri um 2000

Netz für eine Zuse gewidmete Spezialausgabe der Zeitschrift *Spektrum der Wissenschaft* mit dem Generalthema: *Ist das Universum ein Computer?*

Seit seiner Begegnung mit den Werken Einsteins in der Leipziger Nationalbibliothek war Petri fasziniert von Einsteins radikaler Infragestellung vermeintlich offensichtlicher Wahrheiten. Für Petris gesamtes Werk stellte die Einsteinsche Physik immer den Referenzrahmen dar.

Petri sprach später sogar von der „Physik als dem Geburtsort der Netztheorie.“ Sein ganzes wissenschaftliches Leben hindurch bedauerte er, dass die Netztheorie zwar viele verschiedenartige erfolgreiche Anwendungen gefunden hatte, aber eben leider nicht an ihrem „Geburtsort“. Wie oben erwähnt, hat er dies dann selbst in die Hand genommen. Er wollte nicht so weit gehen wie Zuse, der das physikalische Universum als Inkarnation der Informationsverarbeitung sah. Was er aber wollte, war, die physikalischen Gesetze auf ihren kombinatorisch diskreten Inhalt zurückzuführen, so wie er das bereits im Fall der Dichte und Stetigkeit und auch im Bereich des Messens getan hatte.

Vermutlich empfand er auch eine Dankbarkeit; die Physik hatte ihm so viel Anregung gegeben, nun war es an ihm, seinerseits die Physik zu befruchten. Das war ihm so wichtig, dass er das andere Leitmotiv seiner Arbeit, die Entwicklung einer formalen Pragmatik, möglicherweise etwas zu kurz kommen ließ.

12.3 Formale Pragmatik

Die Bestrebung, eine formale Pragmatik zu entwickeln, zieht sich durch das ganze Werk Petris. Einige Ideen hat er in dem Artikel *The Pragmatic Dimension of Net Theory* [17]

zusammengefasst, aber zu einer systematischen Darstellung ist er leider nicht mehr gekommen.

Zur formalen Pragmatik gehört insbesondere die Frage nach dem Zweck und der Wirkung von Kommunikation. In seiner Theorie des Messens argumentiert Petri etwa, dass Messwerte überhaupt nur im Zusammenhang mit der Frage, *wofür* sie erhoben werden, einen Sinn bekommen. Der Informationsgehalt einer Messung ergibt sich aus der Anzahl der möglichen Handlungsalternativen, von denen dann eine bestimmte durch das Messergebnis ausgewählt wird.

In den *Kommunikationsdisziplinen* [13] hat er darauf verwiesen, dass das Kopieren einer Nachricht diese selbst nicht ändert, möglicherweise aber sehr wohl ihre Bedeutung in dem Kontext der beteiligten Personen. Überhaupt kann man bei den Kommunikationsdisziplinen durchweg pragmatische Begriffe erkennen, z. B. Zuständigkeit, Sinneswandel, Gestaltung von Denkmodellen, Weisungsbefugnisse.

Der in Petris Dissertation verwendete Begriff „Kommunikation mit Automaten“ erhält so tatsächlich noch eine weitere Bedeutung: Der Umgang mit Computern basiert auf einer regelbasierten Kommunikation, die aber auch zweckgerichtete Kommunikation *zwischen* menschlichen Akteuren einschließt.

Zivilprozessordnung Als Beispiel, wie regelbasierte Kommunikation zwischen Individuen und Gruppen von Individuen aussehen kann, hat Petri Anfang der 80er Jahre in der GMD ein interdisziplinäres Forschungsprojekt zur netztheoretischen Durchdringung der Zivilprozessordnung durchführen lassen. Das Projekt baute u. a. auf Vorarbeiten von seinem bereits mehrfach erwähnten langjährigen Weggefährten Anatol Holt auf, der 1971 in einer amerikanischen juristischen Fachzeitschrift einen Artikel *Petri Nets and Legal Systems* veröffentlicht hatte.

In der Analyse der Prozessordnung hat sich gezeigt, dass der formale Umgang mit Interessen, Verantwortung, Fristen sich in Netzen ausdrücken lässt; für eine wirklich zufriedenstellende Behandlung sollten aber auch die Grundlagen des Müssens, Sollens, Nicht-Dürfens, Verhandelns entsprechend aufgearbeitet werden.

In der Folgezeit sind diese Bemühungen leider nicht gebührend weiterverfolgt worden. Das lag zum einen möglicherweise daran, dass solche scheinbar esoterische Themen nicht unbedingt die Unterstützung des damaligen Vorstands der GMD fanden. Zum anderen lag es möglicherweise daran, dass Petris Vorarbeiten, die er wie meist bis zur Schriftreife nur in seinem Kopf aufbewahrte, durch eine Krankheit verloren gegangen sind.

Logiken Fragestellungen, die dann aber doch punktuell weiter untersucht worden sind, betrafen insbesondere verschiedene formale Logiken und ihre Beziehung zur Netztheorie. In der *Modallogik* werden beispielsweise die Begriffe *möglich* und *notwendig* präzisiert. Hier konnte nachgewiesen werden, dass die Fallklassen von Bedingungs-Ereignis-Systemen natürliche Modelle der Modallogik im Sinne der in der Modallogik weit verbreiteten *Kripke-Semantik* bilden.

Dasselbe gilt im wesentlichen auch für die *deontische Interpretation* der Operatoren im Sinne von *dürfen* und *müssen*. In der Untersuchung der Zivilprozessordnung hatte sich aber gezeigt, dass das Müssen nicht unmittelbar in Netzen ausdrückbar ist, weil es immer mit einer *Frist* einhergeht, innerhalb derer der Verpflichtung nachzukommen ist.

Als besonders vielversprechend für eine formale Pragmatik sah Petri die sogenannte *dialogische Logik*, die sich am menschlichen Argumentieren orientiert. Die Idee kann durch einen Reisenden *R* illustriert werden, der mit zwei Koffern 1 und 2 zur Zollkontrolle kommt. Der Zöllner fordert: Machen Sie Koffer 1 auf. *R* öffnet den Koffer, der tatsächlich kein Schmuggelgut enthält, und *R* wird durchgelassen. Bei Kontrollen handelt es sich ja um *Stichproben*. Die Zigaretten waren in Koffer 2.

Hätte der Zöllner gefordert: Machen Sie mal *einen* der Koffer auf, und *R* hätte Koffer 1 gewählt, wäre das unmittelbare Resultat dasselbe, der pragmatische Status aber ein anderer, es wäre keine Stichprobe mehr.

In ähnlicher Weise hat Petri auch den Unterschied zwischen den logischen Operatoren „und“ und „oder“ auf den pragmatischen Kontext zurückgeführt. Ein Verbrecher hat einen der Fluchtwege *A* oder *B* gewählt. Die Polizei weiß aber nicht welchen, und muss daher beide Wege *A* und *B* verfolgen.

Es ist nur zu bedauern, dass Petri seine formale Pragmatik nicht zu einer vollständigen Theorie ausbauen konnte. Petri selbst hätte das vielleicht so kommentiert: Wir nehmen den Polarstern als Richtungsweiser, auch wenn wir ihn nicht erreichen.

12.4 Abschließende Bemerkungen

Den weltweiten Erfolg verdanken die Petrinetze ihrer Anpassungsfähigkeit an die verschiedensten Einsatzmöglichkeiten. Wie wir gesehen haben, geht es für Petri selbst dagegen in erster Linie um die Erkenntnis fundamentaler Zusammenhänge, und erst in zweiter Linie um die Modellierung konkreter Systeme. Vergleicht man die verbreiteten Ansätze mit Petris persönlichem Werk, ist tatsächlich nicht immer sofort erkennbar, dass sie letztlich alle auf einer gemeinsamen Grundidee aufbauen.

Bei näherem Hinsehen erkennt man aber die tiefere gemeinsame Wurzel, die sich sowohl durch Petris Grundlagenforschung, wie auch durch alle Theorien und Anwendungen der Netze zieht, nämlich die *asynchrone, diskrete* Modellbildung, die präzise wie wohl kein anderer Ansatz die scharfe Trennung von *kausaler Abhängigkeit* und *Unabhängigkeit* ermöglicht hat. Nur dadurch konnte ein Instrument entstehen, das gebührenden Abstand von klassischen Vorstellungen wahrt, die letztlich doch immer in vollgeordneten Strukturen, in Zeitmetriken und im reellwertigen Kontinuum verankert sind.

Tatsächlich basieren auch alle modifizierten Ansätze, wie *zeitbehaftete* oder *stochastische* Petrinetze, letztlich auf der zugrunde liegenden Kausalstruktur. Dadurch wird eine *zweistufige* Herangehensweise ermöglicht: Die kausale Ebene bleibt immer erkennbar, weil es sich eben um Petrinetze handelt. Die temporalen oder wahrscheinlichkeitstheoretischen Bewertungen finden in einer zweiten darüber liegenden Schicht statt.



Abb. 12.3 Carl Adam Petri

Automatentheorie und Physik Es ist nichts Außergewöhnliches, dass ein theoretisches Modell in einem bestimmten Zusammenhang vorgeschlagen wird, dann aber in einem anderen weit größere Bedeutung erlangt. Warren McCulloch und Walter Pitts wollten mit ihrem Neuronenmodell die Fähigkeit des menschlichen Gehirns ausleuchten, ihre Ideen fanden aber hauptsächlich Verbreitung in der informatischen Automatentheorie. Noam Chomsky ging es um das Verständnis der Tiefenstruktur menschlicher Sprachen, erfolgreich waren seine Ansätze aber eher in der Charakterisierung von *Programmiersprachen*.

Bei Petri ist der Fall vergleichbar, wenn auch umgekehrt. In seiner Dissertation wollte er einen Beitrag zur Automatentheorie leisten; Anklang fand der Ansatz aber in ganz anderen Zusammenhängen. Ein Großteil seiner späteren Bemühungen war auf die physikalischen Grundlagen der Informationsverarbeitung ausgerichtet, die Anwendungen verselbständigten sich aber auf Grund der Leistungsfähigkeit des Modells in ganz andere Richtungen.

Wie bereits angedeutet, war Petri in seinen letzten Jahren enttäuscht, dass seine Netze nicht an, wie er sagt, ihrem „Geburtsort“, der Physik, verwendet und anerkannt worden waren. Er beschloss, das selbst in die Hand zu nehmen. Die Physiker konnte er damit aber nicht überzeugen. Die empfanden das vermutlich so, wie die Justiz es empfindet, wenn jemand mit privat angelesenem Rechtswissen vor Gericht seine Sache mit Bezug auf das Grundgesetz selbst vertritt. Bei seinen Gesprächen mit Physikern, etwa Richard Feynman, John Stewart Bell, Gerard 't Hooft, kam man in der Regel nicht über gegenseitige Anerkennung und Respekt hinaus.

Carl Adam Petri, die Person Petri hat sich oft wenig mit dem Alltag der jeweiligen Fachwelt auseinandergesetzt. In seiner frühen Phase fast ängstlich und scheu, wuchs er dann überschnell in die Rolle eines gleichsam über der Welt stehenden Lehrmeisters hinein, mit einem Gefolge von treuen Anhängern, die ihm immer Großes zutrauten. Der Außenwelt erteilte er Ratschläge, kämpfte aber nicht nach den dortigen Gepflogenheiten für seine Vorstellungen.



Abb. 12.4 Ausblick

Sehr überspitzt könnte man sagen, die Netze haben sich nicht *wegen* Petri, sondern *trotz* Petri durchgesetzt. Das trifft den Kern dann aber doch nicht. Eben weil er im Grunde auf vielen Gebieten Autodidakt war, hat er auch keinen falschen Respekt vor Fachautoritäten gehabt. Vermutlich kann man nur auf diese Art radikal mit überkommenen Vorstellungen brechen. Meistens geht so etwas daneben, aber im Fall Petri führte es eben zum Erfolg.

Über spezielle Fragestellungen hinaus war an Petri besonders bemerkenswert, dass er auch bereit war, scheinbar noch so unwichtige Details zu hinterfragen und immer wieder zu prüfen. Das war auch das Faszinierende an seinen Arbeiten und Vorträgen: Man las, hörte zu, verstand nicht alles, aber plötzlich überkam einen die Erkenntnis: Ja natürlich, so ist es, warum habe ich das bisher nicht so gesehen?

Ausblick Viele der Fragestellungen, die Petri aufgeworfen hat, werden wohl noch lange auf zufriedenstellende Antworten warten, so z. B. die Entwicklung einer Endlichkeitsmathematik, die direkt von den Zwecken der Anwender ausgeht; oder Messanordnungen, die historisch gewachsene Rahmenbedingungen hinterfragen, und nur so zukunftsweisend sein können; oder der Gesamtzusammenhang der Informationsverarbeitung unter Einbeziehung der Interessen und Verpflichtungen der Akteure; oder der einheitliche Umgang mit Kommunikation zwischen verschiedenen Instanzen, seien es Menschen, Gruppen oder Maschinen.

Petri wollte die Informatik radikal reformieren, oder genauer gesagt, sah er sie vielmehr ganz am Anfang und wollte dazu beitragen, dass sie in ihrer Prägephase und Jugend in die richtige Richtung gelenkt wurde. In einem seiner wegweisenden Artikel *Nicht-sequentielle Prozesse* stellt er fest: „Die Geschichte der Geometrie misst nach Jahrtausenden, die der Informatik nach Jahrzehnten. Werden nicht spätere Generationen uns heutige Informatiker mit den Vermessungsspezialisten vergleichen, die im Nilschlamm des alten Ägyptens – mit ausreichendem Werkzeug – ihre Arbeit verrichteten?“

Literatur

1. E. Best, C. Fernández, *Nonsequential Processes. A Petri Net View*. Springer-Verlag (1989)
2. C. Fernández, *Net Topology I, II*. St. Augustin: Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung, Interner Bericht ISF-75-09, 76-02 (1975/6)
3. H.J. Genrich, Ein Kalkül des Planens und Handelns. *Berichte der GMD 111: Ansätze zur Organisationstheorie rechnergestützter Informationssysteme*. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, S. 77-92 (1979)
4. C.A. Petri, *Kommunikation mit Automaten*. Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM Nr. 2 (1962)
5. C.A. Petri, Fundamentals of a Theory of Asynchronous Information Flow. *Proc. of IFIP Congress 62*. Amsterdam: North Holland Publ. Comp., S. 386-390 (1963)
6. C.A. Petri, Grundsätzliches zur Beschreibung diskreter Prozesse. 3. *Colloquium über Automaten-theorie, Hannover 1965*. Basel: Birkhäuser-Verlag, S. 121-140 (1967)
7. C.A. Petri, Concepts of Net Theory. *Mathematical Foundations of Computer Science: Proc. of Symposium and Summer School, High Tatras, Sep. 3-8, 1973*. Math. Inst. of the Slovak Acad. of Sciences, S. 137-146 (1973)
8. C.A. Petri, *Interpretations of Net Theory*. St. Augustin: Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung, Interner Bericht ISF-75-07 (1976)
9. C.A. Petri, *Nicht-sequentielle Prozesse*. St. Augustin: Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung, interner Bericht ISF-76-6, 3. revidierte und ergänzte Auflage (1976)
10. C.A. Petri, General Net Theory. *Computing System Design: Proc. of the Joint IBM University of Newcastle upon Tyne Seminar, Sep. 1976*, S. 131-169 (1977)
11. C.A. Petri, Modelling as a Communication Discipline. Unveröffentlichtes Manuskript. Zusammenfassung in: *Measuring, Modelling and Evaluating Computer Systems*. Amsterdam: North Holland Publishing Company, S. 435 (1977)
12. C.A. Petri, *Concurrency as a Basis of System Thinking*. St. Augustin: Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung, Interner Bericht ISF-78-06 (1978)
13. C.A. Petri, Kommunikationsdisziplinen. *Berichte der GMD 111: Ansätze zur Organisationstheorie rechnergestützter Informationssysteme*. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, S. 63-76 (1979)
14. C.A. Petri, State-Transition Structures in Physics and in Computation. *Int. Journal of Theoretical Physics*, **21**(12), 979-992 (1982)
15. C.A. Petri, E. Smith, Concurrency and Continuity. *Lecture Notes in Computer Science Vol. 266: Advances in Petri Nets 1987*. Springer-Verlag, S. 273-292 (1987)

16. C.A. Petri, Nets, Time and Space. *Theoretical Computer Science*, **153**, 3–48 (1996)
17. C.A. Petri, E. Smith, The Pragmatic Dimension of Net Theory. *Journal of Integrated Design & Process Science. Transactions of the SDPS*, **2**(1), 1–7 (1998)
18. W. Reisig, *Petrinetze. Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien*. Vieweg-Teubner Verlag (2010)
19. W. Reisig, *Understanding Petri Nets. Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies*. Springer-Verlag (2013)
20. E. Smith, On the border of causality: Contact and confusion. *Theoretical Computer Science*, **153**, 245–270 (1996)
21. J. Wiegand, *Informatik und Großforschung. Geschichte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung*. Campus Verlag (1994)

Sachverzeichnis

A

Abseitsregel (Fußball), 102
Adressierung, 91
aktiviert (Transition), 1, 2, 60
ARPA-Netz, X, 41, 42, 52, 89
Automat, 28
 endlicher, 28
 zellulärer, 74
Autorisierung, 91

B

Bach, Johann Sebastian, 13
Bar-Hillel, Yehoshua, 39
Bauer, Friedrich Ludwig, 51, 115
Bavink, Bernhard, 13
Bedingung (in Netz), 1
Bedingungs-Ereignis-System, 53, 54, 66, 67, 69, 107, 119
Beethoven, Ludwig van, 23
Bell, John Stewart, 43, 121
Benennung, 91
Berkling, Klaus, 110
Best, Eike, 85
bipartiter Graph, *siehe* Graph, bipartiter
Bohr, Niels, 42, 105
Bölkow, Ludwig, 113
Boolesche Bijektion, 45
Boolesche Funktion, 44
 inverse, 45
Brauer, Wilfried, 66, 108
Braun, Wernher von, 112
Bruch, Walter, 112
Buridans Esel, 100

C

Carnap, Rudolf, 78, 95

Case, *siehe* Fall

Chomsky, Noam, 121
co Concurrency-Relation, 78
Computeralgebra, 110, 116
Concurrency, *siehe* Nebenläufigkeit
concurrent, *siehe* nebenläufig
Connection Machine, 35
Cray-1, 30
Cut, *siehe* Schnitt

D

Dante Alighieri, 110
Deadlock, *siehe* Verklemmung
Dedekind, Richard, 85
Dedekind-Schnitt, 85, 86
 in Halbordnung, 86
Dedekind-vollständig, 85, 102
 in Halbordnung, 86
Delegierung, 92
DeMarco, Tom, 41
Deng Xiaoping, 115
deontische Logik, *siehe* Logik, deontische
Determinismus, 42, 43
dialogische Logik, *siehe* Logik, dialogische
Dichte (in Ordnung), 80
Dijkstra, Edsger, 57, 77, 104
Dining Philosophers Problem, 58
Doppelskala (Petrus), 99, 101
Dylan, Bob, 1

E

Eckert, John Presper, 40
Einstein, Albert, 14, 28, 42, 78, 118
Eintritt (Transition), 1
empirische Indifferenz, *siehe* Indifferenz,
 empirische

Enlogische Struktur, 63
 Entropie, 106
 Epheser, Helmut, 20, 21
 Ereignis (in Netz), 1
 erfüllt (Bedingung), 1, 53
 Esch, Jürgen, 22
 Extensionalitätsprinzip, 60

F

F Flussrelation, 78
 Fact, 63
 Fall (in Netzsystem), 54
 Fallklasse (in Netzsystem), 54, 119
 Faltung (Netz-), 71
 Fermat, Pierre de, 15
 Fernández, César, 72, 85, 111
 Feynman, Richard, 121
 Fischer, Artur, 112
 Flussrelation (in Netz), 78
 formale Logik, *siehe* Logik, formale
 formale Pragmatik, *siehe* Pragmatik, formale
 Formatierung, 91
 Fredkin, Ed, 46
 Fredkin, Joyce, 46
 Fredkin-Gate, 46
 Freud, Sigmund, 11, 13

G

Genrich, Hartmann, IX, 6, 34, 46, 67
 Genrich, Helga, 46
 Gleitkommaarithmetik, 22
 Glitch, 58, 104
 Global Positioning System, 30
 Goebbels, Joseph, 12
 Goethe, Johann Wolfgang von, 20, 21
 Goos, Gerhard, 115
 Gottzein, Eveline, 112
 Graph, bipartiter, 38, 64

H

Hausdorff-Preis, 72
 Hearn, Anthony, 110
 Hegel, Georg Wilhelm Friedrich, 14
 Heisenberg, Werner, 13, 16
 Herzog, Roman, 112
 Hillis, Daniel, 35
 Hirzebruch, Friedrich, 72
 Hitler, Adolf, 11, 12
 Holt, Anatol, 40, 41, 56, 92, 119

Hoof, Gerard 't, 44, 121

I

Identifikation, 91
 indifferent, 98
 Indifferenz, empirische, 95–97, 101
 Information, 22, 43, 106
 Informationsflussgraph, 44, 45
 Inzidenzmatrix, 64
 Isotropie, 74

K

Kanal-Instanz-Netz, 92
 Kant, Immanuel, 39
 Kategorie, 73
 kausal nachgeordnet, 79
 Kausalität, 14, 43, 56, 57
 Kausalnetz, 43, 71, 77, 78, 80–82, 86
 K-Dichte, 81
 Ken, 81
 Kleene, Stephen, 40
 Kluge, Werner, 110
 Kohärenz, 98
 koinzident, 79
 Kolmogorow, Andrei Nikolajewitsch, 43
 Kommunikationsdisziplin, 90, 92
 Komplementbildung (für Stellen), 61
 Konflikt (in Netz), 3, 32, 42, 55–58, 100
 Konfusion (in Netz), 55, 56, 58, 59, 100, 103, 104
 Konrad-Zuse-Medaille, 112
 Kontakt (in Netz), 60, 61, 71
 Kontinuums-Netz, 82–84
 Kopieren, 91
 Kripke-Semantik, 119
 Krückeberg, Fritz, 28, 109
 Kuhle, Hedi, 106
 Kurt-Pauli-Stiftung, 75

L

Laika (Hund), 23
 Lambda-Kalkül (Churchscher), 109
 Laplace, Pierre-Simon, 42
 Laplacescher Dämon, 42
 Lautenbach, Kurt, 67
 Lengauer, Thomas, 116
 Lewin, Kurt, 78
 Line, *siehe* Linie
 Linie (in Halbordnung), 78
 Logik

- deontische, 120
- dialogische, 120
- formale, 119
- reversible, 44–47
 - Hauptsatz, 45
- Lorentz-Transformation, 117
- lose gekoppelte Systeme, 34
- Lu Ruqian, X, 89
- M**
- Mach, Ernst, X
- massiv paralleles System, 35
- Mauchly, John W., 40
- McCarthy, John, 40
- McCulloch, Warren, 121
- Modallogik, 119
- Modellbildung, 91
- Murata, Tadao, 113
- N**
- N-Dichte, 80
- Nebenbedingung (in Netz), 15, 106
- nebenläufig, 78
- Nebenläufigkeit, 2
- Netz-Morpismus, 72
- Netz-Topologie, 72
- Neumann, John von, 30
- Newton, Isaac, 20
- nichtsequentieller Prozesse, *siehe* Prozess,
 - nichtsequentieller
- O**
- Occurrence-net, *siehe* Kausalnetz
- Oder-Gatter, 32
- Oehlkers, Otto, 20
- P**
- Performance Evaluation, 110
- Peschl, Ernst, 52
- Peterson, James, 68
- Petri, Christel geb. Wienhold, 23, 24, 111, 115
- Petri, Elfriede geb. Dietze, 9, 19
- Petri, Luise geb. Oehlkers, 10
- Petri, Max, 9, 19
- Petri, Max sen., 10
- Petri, Olaus, 9, 20
- Petri, Tobias, X, 2, 10, 24, 26, 47, 75, 115, 117
- Petri-Gatter, 44, 45
- Petrinetz, 1, 41, 53, 64, 112
- Pettersson, Olof, *siehe* Petri, Olaus
- Pfanzagl, Johann, 94
- Pfeilfunktion, *siehe* Petri-Gatter
- Philosophenproblem, *siehe* Dining Philosophers Problem
- Pitts, Walter, 121
- Place-Transition-Net, *siehe* Stellen-Transitions-Netz
- Plancksche Konstante, 16
- Plankalkül, 73
- Pragmatik, 22, 40, 42
 - formale, 22, 41, 118, 120
- pragmatisch, 11, 94, 119
- pragmatischer Status, 23, 38, 91, 120
- Priorität, 103
- Process-Extension, 63
- Prozess, 5, 37, 38
 - nichtsequentieller, 6, 43, 54, 69, 78
 - reversibler, 44
- Prozessfaltung, 72
- Pythagoras, 57
 - Satz des, 57
- Q**
- Quantencomputer, 44
- Quantenmechanik, verborgene Parameter, 43
- Quine, Willard Van Orman, 46
- R**
- Rabin, Michael, 40
- Rechnender Raum, 74
- Reduce-System, 110
- Reduktionsmaschine, 110
- Reichenbach, Hans, 78
- Reisig, Wolfgang, IX, 6, 68, 107
- Reorganisation, 92
- reversible Logik, *siehe* Logik, reversible
- Richter, Gernot, 59
- Rozenberg, Grzegorz, 107
- S**
- Schnitt (in Halbordnung), 78
- Semantik, 22
- Semaphor, 59
- Semiotik, 22
- sequentieller Teilprozess, 78
- Sequenz, 3
- Signal, 37, 78
- Signalraum, 78
- S-Invariante, 65
- Starke, Peter, 68, 108

Stelle (in Netz), 1
Stellen-Transitions-Netz, 64–67, 110
stochastisches Netz, 110, 120
Stornierung, 91
Synchronieabstand, 62, 65, 91
Synchronisation, 91
Syntax, 22
Szyperski, Norbert, 106, 108, 116

T

Tanenbaum, Andrew, 59
Tautologie, 63
Thiagarajan, P. S., 67
Thieler-Mevissen, Gerda, 63
Toffoli-Gate, 46
Transition (in Netz), 1
Trottenberg, Ulrich, IX, 109
Turing, Alan, 27
Turingmaschine, 32, 34, 109

U

Und-Gatter, 31, 44
Unger, Heinz, 21, 26, 27, 52, 53

V

Valk, Rüdiger, 117
Verklemmung, 58

Violation, 63
Vogel-Strauß-Algorithmus, 59
Vollständigkeit (in Ordnung), 85
Von-Neumann-Architektur, 109, 110

W

Walther, Alwin, 27
Werner-von-Siemens-Ring, 6, 112
Wertsetzung, 91
Wiener, Norbert, 97
Wienhold, Rudolf, 17, 23
Wittgenstein, Ludwig, 53

Y

Yngve, Victor, 39

Z

zeitbehaftetes Netz, 110, 120
zellulärer Automat, *siehe* Automat, zellulärer
Zemanek, Heinz, 40
Zenon von Elea, 85, 98
Zufall, 43
Zuse, Konrad, X, 67, 73–75, 112, 117
Zustand (in Netz), 1
 vorliegend, 1
Zuweisungssystem, 34