

# Carl Adam Petri 1926 - 2010

## Visionär und bedeutender Wissenschaftler

Wolfgang Reisig

9. August 2010

Am 2. Juli 2010 ist einer der originellsten und bedeutendsten Informatiker gestorben: Carl Adam Petri, der Begründer der weltweit bekannten und beliebten „Petrietze“. Was Petri erreichen wollte, was er davon tatsächlich erreicht hat und was er uns an offenen Fragen hinterlässt, skizziert dieser Nachruf.

### Inhaltsverzeichnis

<b>1 Was Petri erreichen wollte</b>	<b>2</b>
1.1 Die Zielsetzung . . . . .	2
1.2 Das Umfeld . . . . .	2
1.3 Die Dissertation . . . . .	3
<b>2 Womit Petri bekannt wurde</b>	<b>4</b>
2.1 Das elementare Modell . . . . .	4
2.2 Der Weg in die USA . . . . .	5
2.3 Varianten und Fragestellungen . . . . .	6
<b>3 Was Petris Ansatz von anderen unterscheidet</b>	<b>7</b>
3.1 Abläufe . . . . .	7
3.2 Szenarien und Nebenläufigkeit . . . . .	8
3.3 Prinzipien und Theoriebildung . . . . .	9
<b>4 Was Petri hinterlassen hat</b>	<b>10</b>
4.1 Eine anerkannte Modellierungstechnik . . . . .	10
4.2 Eine lebendige Wissenschaftsgemeinde . . . . .	11
4.3 Offene Fragen . . . . .	11
<b>5 Carl Adam Petri</b>	<b>12</b>
5.1 Die Ehrungen . . . . .	13

## Zusammenfassung

Seine wissenschaftliche Laufbahn beginnt C.A. Petri Anfang der 1960er Jahre mit überaus ehrgeizigen, ambitionierten Zielen. Einige seiner Vorschläge werden Ende der 1970er Jahre anerkannt. Seit den 1980er Jahren werden sie zunehmend ausgebaut und bilden heute ein überaus solides Gerüst zur Modellierung komplexer Systeme. Für viele Bereiche sind Petrinetze eine inzwischen zentrale Modellierungstechnik und bilden die Grundlage anderer Modellierungstechniken. Viele seiner Vorschläge wurden jedoch noch nicht in dem Maße aufgegriffen und ausgearbeitet, wie sie es vielleicht verdient hätten.

# 1 Was Petri erreichen wollte

## 1.1 Die Zielsetzung

Petri begann seine wissenschaftliche Arbeit nach seinem Diplom in Mathematik im Jahr 1956. In dieser Zeit hatte sich das Konzept des Digitalrechners gegenüber dem Analogrechner durchgesetzt, Computer wurden nun in größeren Stückzahlen gebaut und in Rechenzentren betrieben. An der Universität Bonn wurde das Institut für Instrumentelle Mathematik gegründet, dessen Rechenzentrum Carl Adam Petri zwischen 1963 und 1968 geleitet hat.

Im Raum stand damals die Frage, wie man Computer sinnvollerweise aufbaut und effizient nutzt, und - generell gefragt - , was man damit überhaupt alles machen kann. Petri wollte die Frage mit einem grundlegenden, systematischen Ansatz angehen. Er suchte nach einer allgemeinen Theorie *diskreter* dynamischer Systeme (im Unterschied zu reellen Funktionen als Theorie *kontinuierlicher* dynamischer Systeme). Sie sollte nicht nur zum Verständnis der aufkommenden Informatik beitragen, sondern auch anderen Disziplinen helfen, insbesondere der Physik, der Chemie und den Ingenieurwissenschaften. Dort überwogen damals Modelle kontinuierlicher Systeme. Petri erschien der Versuch aussichtsreich, auch Prozesse dieser Gebiete diskret, kombinatorisch aufzufassen, so wie die aufkommende Informatik offensichtlich eine Theorie diskreter Systeme brauchen würde. Naturwissenschaftliche Theoriebildung nahm Petri ansonsten als Vorbild. Insbesondere wollte er Begriffe so bilden, dass Erhaltungssätze gelten. So suchte er beispielsweise nach einem Begriff von „Information“, deren "Maß" bei ihrer Verarbeitung erhalten bleibt, analog zur Energieerhaltung oder auch zur Stofferhaltung bei physikalischen oder chemischen Prozessen. Der Fluss von Information in einem informationsverarbeitenden System sollte genau so bilanzierbar sein wie der Fluss von Geld in einer Bank.

## 1.2 Das Umfeld

Die Suche nach einer solchen allgemeinen Theorie war am Ende der 1950er und zu Beginn der 1960er Jahre ein recht ungewöhnliches Unterfangen. In der aufkommenden Informatik wurde die Theorie der formalen Sprachen vorangetrieben; mit ihren Grammatiken und Automaten. Ihr Nutzen im Übersetzerbau,

ihr ordnender Rahmen der berechenbaren Funktionen und ihr enger Bezug zur Logik etablierten diesen theoretischen Ansatz schnell als grundlegende theoretische Basis der Informatik. Er spielt diese Rolle bis heute.

Trotz ihrer Erfolge erschien Petri diese Theorie nicht hilfreich zur Beantwortung seiner Fragen. Als ein Beispiel für die Unzulänglichkeit der Automaten-theorie zur Modellierung des Verhaltens diskreter Systeme nennt Petri ihre Verwendung *globaler* Zustände. Petri betrachtet solche Zustände als eine ganz unzumutbare, sogar die Wirklichkeit verfälschende Idealisierung und Abstraktion. Die Auffassung eines diskreten Schrittes als Übergang von einem gegebenen globalen Zustand in einen neuen mag für „kleine“ Systeme passen. Sie bringt aber wenig Einsicht in das Verhalten „großer“ diskreter Systeme (heutzutage würde man als Beispiel eines solchen großen Systems das Internet nennen können): Wenn in einem System räumlich weit auseinander liegende Ereignisse  $a$  und  $b$  unabhängig voneinander ungefähr gleichzeitig eintreten, gibt es kein objektives Verfahren um  $a$  und  $b$  zeitlich zu ordnen. Zudem wäre diese Ordnung ( $a$  vor  $b$  oder  $b$  vor  $a$  oder  $a$  und  $b$  gleichzeitig) irrelevant zum Verständnis des Systems.

Stattdessen hielt Petri es für interessant, eine Theorie des „ungefähr gleichzeitigen“ zu bilden. Wir gehen später auf weitere Gründe ein die Petri damals veranlasst haben, sich dem Sog der „theoretischen Informatik“ zu entziehen und nach einem ganz anderen Ansatz zu suchen. Die praktische Informatik jener Zeit bestand aus Großrechnern für numerische Berechnungen mit Lochstreifen und Lochkarten zur Eingabe und „Endlos“-Papierstapel zur Ausgabe. Globaler Takt war als Konzept selbstverständlich, an die Vernetzung mehrerer Rechner hat niemand gedacht. Mit Software wurden vorwiegend numerische Probleme und Sortierprobleme gelöst, vorwiegend in der seit 1956 verbreiteten Sprache FORTRAN. Mit der Entwicklung von ALGOL60 hatte eine systematische Theorie der Programmierung sequentieller Prozesse begonnen. Petris Vorschlag, die Ein- und Ausgabe asynchron zu gestalten, fand keine Zustimmung.

Als dritte Richtung gab es höchst spekulative Aussagen der „Kybernetik“ und der „künstlichen Intelligenz“, teilweise ohne realistische Vorstellung für ihre Verwirklichung (wie beispielsweise für den "General Problem Solver"). In diesem Umfeld begann Petri, über eine völlig andere Theorie nachzudenken, die der Praxis hilft und realisierbar ist.

### 1.3 Die Dissertation

Was Petri bis 1962 an Bausteinen für seine Theorie diskreter Systeme entwickelt hatte, hat er in seiner Dissertation [Petri 1962] zusammengetragen. Diese Arbeit ist keine konventionelle Dissertation, in der etwa ein offenes Problem gelöst oder ein neues theoretisches Konstrukt vorgestellt und ausgearbeitet wird. Wie in vielen seiner späteren Arbeiten auch, formuliert Petri eine Fülle von Anregungen und Vorschlägen, die eher einem Forschungsprogramm ähneln.

Eindrucksvoll ist ein Gedankenexperiment, bei dem es darum geht, Speicherplatz zu organisieren, dessen Umfang anfangs unbekannt ist (man braucht das zur Berechnung nicht-primitiv-rekursiver Funktionen): Bei Bedarf muss beliebig oft zusätzlicher Speicherplatz bereitgestellt werden. Petri zeigt, dass das

möglich ist. Allerdings ist ein solches System notwendigerweise asynchron.

Damit war klar, dass die angestrebte Theorie ihrer Natur nach *asynchron* sein sollte. Zudem sollten elementare Schritte nach dem Vorbild der Naturwissenschaften *reversibel* sein: In einem Schritt

$$S \xrightarrow{t} S' \tag{1}$$

einer Transition  $t$  von einem beschränkten, lokalen Zustand  $S$  zu einem Zustand  $S'$  soll nicht nur  $S'$  aus  $S$  und  $t$  ableitbar sein, sondern umgekehrt auch  $S$  aus  $S'$  und  $t$ . (Eine Wertzuweisung  $x := 1$  verletzt diese Forderung). Schließlich sollte die Theorie nicht nur das Implementierbare beschreiben können, sondern auch den pragmatischen Umgang von Menschen mit Rechensystemen.

In der *Kommunikation mit Automaten* sah Petri damals schon den eigentlichen Zweck informationstechnischer Systeme, daher der Titel seiner Dissertation. Er ist ja durchaus doppeldeutig: Ein Mensch kommuniziert mit einem Automaten und Menschen kommunizieren *mit Hilfe* eines Automaten.

Im Verlauf der Arbeit verwendet Petri eine Reihe formaler Notationen, teils Graphen, teils Formelausdrücke mit einem Paralleloperator (wie sie viel später bei den Prozessalgebren verwendet wurden). Außerdem wurden dort die für Petrietze grundlegenden Begriffe der *Stelle* (zur Beschreibung lokaler Zustände) und der *Transition* (für lokal wirkende Aktionen, Ereignisse, usw.) eingeführt. Man kann sich leicht vorstellen, wie sehr diese Ideen den Vorstellungen des damaligen Umfeldes zuwider liefen. Es war der Darmstädter Professor Alwin Walter, damals ein führender Pionier der ersten Generation elektronischen Rechnens, der die Bedeutung von Petris Arbeit erkannt und dafür gesorgt hat, dass sie als beste Dissertation des Studienjahres 1961/1962 ausgezeichnet wurde.

In den USA wurde die Dissertation Mitte der 1960er Jahre ins Englische übersetzt.

## 2 Womit Petri bekannt wurde

### 2.1 Das elementare Modell

Als ersten Schritt auf dem Weg zu seiner Theorie diskreter dynamischer Systeme schlug Petri ein einfaches Modell für diskrete Schritte und ihre Komposition vor. Zentral ist die Idee *lokaler Zustandskomponenten* statt *globaler* Zustände. Im einfachsten Fall modelliert eine Zustandskomponente eine *Bedingung* mit dem aktuellen *Status* „erfüllt“ oder „unerfüllt“. *Dynamisches Verhalten* entsteht, indem einige Bedingungen zugleich ihren Status wechseln. Technisch wird das durch den Eintritt einer Transition beschrieben. Abbildung 1 zeigt dafür ein Bei-

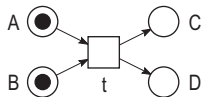


Abbildung 1: 4 Bedingungen und 1 Transition

spiel mit vier Bedingungen A, ..., D und einer Transition, t. Schwarze Punkte („Marken“) kennzeichnen die dabei erfüllten Bedingungen (A und B). Die Pfeile zeigen den „Fluss“ der Marken bei Eintritt der Transition t. Abbildung 2 zeigt den Status der Bedingungen *nach* Eintritt von t. Mit dieser simplen Konstruk-

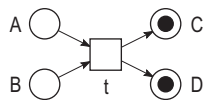


Abbildung 2: Nach dem Eintritt von t

tion können durchaus schon interessante verteilte Systeme modelliert werden, beispielsweise das Erzeuger-/ Verbrauchersystem aus Abb. 3. Dieses System ist

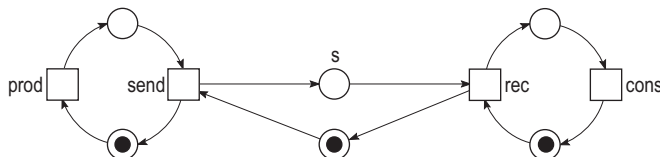


Abbildung 3: Erzeuger-/ Verbrauchersystem mit einem Speicher der Kapazität 1

*deterministisch*: Niemals besteht eine Alternative zwischen Transitionen. Nicht-deterministisches Verhalten modelliert man, indem mehrere Transitionen um ein Marke konkurrieren (Abb. 4): Indem  $t_1$  eintritt, ist  $t_2$  nicht mehr möglich und indem  $t_2$  eintritt, ist  $t_1$  nicht mehr möglich. Damit kann man beispielsweise wie

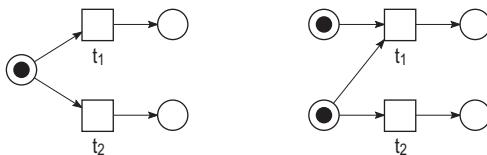


Abbildung 4: Beispiele für Alternativen

in Abb. 5 das System aus Abb. 3 um eine zweite Speicherzelle  $s'$  ergänzen. Wenn beide Speicherzellen frei sind, belegt der Produzent eine von beiden mit *send* oder *send'*. Wenn beide belegt sind, entnimmt der Konsument eine der beiden Marken mit *rec* oder *rec'*. Die beiden Abbildungen 3 und 5 zeigen Beispiele für *Petrietze*. Ihre graphische Darstellung hat Petri das erste Mal in [Petri 1965] vorgestellt.

## 2.2 Der Weg in die USA

Es war vor allem Anatol Holt, der schon frühzeitig an Hochschulen und Forschungsinstituten der USA für die Verbreitung von Petrietzen (und ihrer Na-

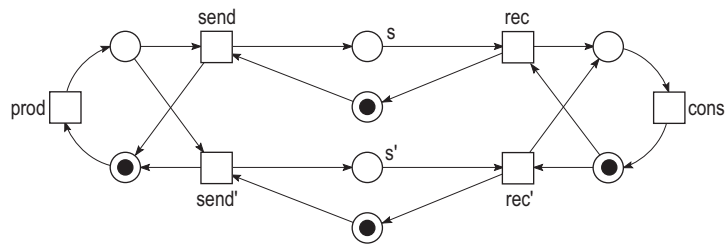


Abbildung 5: Ergänzung einer alternativen Speicherzelle,  $s'$

mensgebung) gesorgt hat. Bereits Ende 1964 sah der bekannte Softwarepionier Tom DeMarco Petrinetze bei den Bell Telephone Laboratories im ESS1-Projekt (in dem „the worlds first commercial stored program telephone switch“ entwickelt wurde) Petrinetze und schreibt in [Broy & Denert 2005] „Among the documents describing the simulation was a giant diagram that Ms. Hoover called a Petri Net. It was the first time I had ever seen such a diagram. It portrayed the system being simulated as a network of sub-component nodes with information flows connecting the nodes...“ (Ms. Erna Hoover leitete das Team). Etwas später schrieb DeMarco: „One of my colleagues, Jut Koder, observed that Erna’s Petri Net was a better spec than the spec.“

### 2.3 Varianten und Fragestellungen

Wie viele andere in Europa entwickelte Konzepte, fanden auch Petrinetze mit dem Umweg über die USA Ende der 1960er Jahre Anerkennung in Europa. Dabei half sicher auch der intuitiv so einfache Umgang mit den Marken, der an ein einfaches Brettspiel erinnert. Abbildung 6 zeigt Petri bei einem solchen Spiel.

Abbildung 6: Petri spielt „Petrinetze“

Diese spielerische Einfachheit elementarer Petrinetze birgt die Gefahr, dass man ihre Ausdrucksstärke unterschätzt. Schnell wurden Varianten und Verallgemeinerungen für Petrinetze vorgeschlagen. Insbesondere die Beschränkung auf *eine* Marke in einem Platz und damit seine Interpretation als „Bedingung“ wurde aufgehoben. So zeigt Abb. 7 das Erzeuger-/Verbrauchersystem mit einem Speicher für unbeschränkt viele Marken (aktuell sind es drei). Anfang der 1970er Jah-

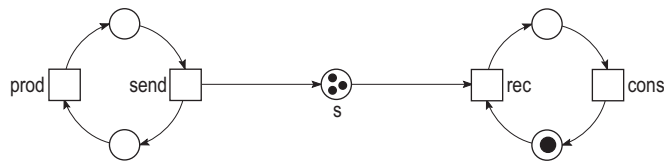


Abbildung 7: Unbeschränkter Speicher,  $s'$

re wurden die üblichen Fragen an Systemmodelle auch für Petrinetze gestellt: Wann leisten zwei Netze dasselbe? Welche Varianten und Verallgemeinerungen sind echt ausdrucksstärker? Als hartnäckig erwies sich das *Erreichbarkeitsproblem*: Gegeben sei ein Netz  $N$  und zwei Markierungen (Verteilungen von Marken)  $M$  und  $M'$  in  $N$ : Gibt es eine Folge von Schritten  $N$ , die bei  $M$  beginnt und bei  $M'$  endet? Erst Anfang der 1980er Jahre wurde das Problem gelöst [Mayr 1984].

Im Grund wurde so aus Petrinetzen eine Art Automatentheorie: Beispielsweise beschreibt der Automat in Abb. 8 die gleichen Sequenzen von Schritten wie das Petrinetz in Abb. 3, darunter beispielsweise die Sequenz

$$\text{prod.send.prod.rec.cons.send.} \quad (2)$$

Insbesondere in den USA wurden in den 1970er Jahren Petrinetze primär als Mechanismus zur Charakterisierung formaler Sprachen angesehen.

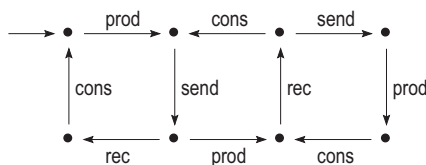


Abbildung 8: Automat des Erzeuger-/Verbrauchersystems

### 3 Was Petris Ansatz von anderen unterscheidet

Die breite Akzeptanz seiner Modellierungstechnik hat Petri darin bestätigt, auf dem richtigen Weg zu sein. Aber mit ihrer automatentheoretischen Ausrichtung war er überhaupt nicht einverstanden! Für ihn standen ganz andere Fragestellungen im Vordergrund. Die Modelle in Abb. 3 und Abb. 7 betrachtete er als Beispiele höchst unterschiedlicher Modellierungstechniken. Insbesondere fand er den Aspekt der *Verteiltheit* fundamental. 30 Jahre nach Petri Dissertation sagte Robin Milner in seiner Dankesrede zur Verleihung des Turing-Awards 1991: „Much of what I have been saying was already well understood in the sixties by Carl Adam Petri, who pioneered the modelling of discrete concurrent systems. Petri’s work has a secure place in the root of concurrency theory.“

Einige Konsequenzen aus der Betonung *verteilten* Verhaltens seien hier vorgestellt.

#### 3.1 Abläufe

Jedes Petrinetz und jeder Automat beschreibt eine Menge von *Abläufen*. Petri erläutert, dass ein einzelner Systemablauf nicht angemessen mit einer Sequenz der Form (2) beschrieben werden kann. Denn eine solche Sequenz dokumentiert nicht hinreichend präzise die Ordnung, in der das Systemmodell den Eintritt von

Transitionen festlegt. Die Sequenz in (2) kann beispielsweise alternativ mit `rec` oder mit `prod` fortgesetzt werden. Dabei stehen `rec` und `prod` in (3) keineswegs alternativ gegeneinander; vielmehr treten sie beide *unabhängig* voneinander ein!

Nun fragt man sich, was denn an die Stelle von Sequenzen  $w$  der Form (2) treten soll. Um Petris Vorschlag dazu leicht zu verstehen, fassen wir jedes einzelne Vorkommen einer Transition  $t$  in  $w$  als ein *Ereignis* auf und versehen dabei  $t$  mit dem Index  $i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ), wenn  $t$  das  $i$ -te Mal in  $w$  eintritt. Damit ist  $w$  eine total geordnete Menge solcher Ereignisse und wir schreiben (2) als

$$\text{prod}_1 \rightarrow \text{send}_1 \rightarrow \text{prod}_2 \rightarrow \text{rec}_1 \rightarrow \text{cons}_1 \rightarrow \text{send}_2 \quad (3)$$

wobei die Notation  $x \rightarrow y$  das Ereignis  $y$  als unmittelbaren Nachfolger des Ereignisses  $x$  kennzeichnet.

Was beschreibt nun die (totale) Ordnung (3)? Der Anfang,  $\text{prod}_1 \rightarrow \text{send}_1$ , ist objektiv im System (Abb. 3) vorgegeben. Auf  $\text{send}_1$  folgt nun im System unmittelbar nicht nur  $\text{prod}_2$  sondern auch  $\text{rec}_1$ . Die richtige Ordnung wäre also

$$\begin{array}{c} \dots \rightarrow \text{send}_1 \rightarrow \text{prod}_2 \rightarrow \dots \\ \quad \searrow \\ \quad \text{rec}_1 \rightarrow \dots \end{array} \quad (4)$$

Das *tatsächliche* Verhalten des Systems besteht damit aus einer *halbgeordneten* Menge von Ereignissen, die Abb. 9 zeigt. Der Fehler von Sequenzen wie (3)

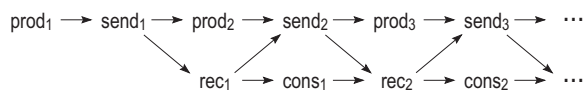


Abbildung 9: Tatsächliches Verhalten des Erzeuger-/Verbrauchersystems aus Abb. 3

liegt also im Zwang zu einer totalen Ordnung. Dort hat die Relation der unmittelbaren Nachfolge nicht überall den gemeinten Sinn. Beispielsweise liefert das System in Abb. 3 keinerlei Begründung dafür, warum in (3) das Ereignis  $\text{rec}_1$  auf  $\text{prod}_2$  folgt.

Andere Systemmodelle versuchen, dieses Defizit mit Hilfe eines *Beobachters* zu beheben. Wie die Naturwissenschaften zeigen, erzeugt die Annahme von Beobachtern und die Interpretation ihrer Messergebnisse neue, komplexe Fragestellungen.

### 3.2 Szenarien und Nebenläufigkeit

Die Beschreibung einzelner Abläufe als Halbordnungen wird immer wieder aufgegriffen, u.a. von Lamport, allerdings ohne Bezug zu Petri. In den letzten Jahren ist für verschiedene Systemmodelle der Begriff des Szenarios populär geworden, häufig als ein in sich sinnvoll abgeschlossenes Stück gemeinsamen



Verhaltens mehrerer Partner. Für das Erzeuger-/Verbrauchersystem in Abb. 3 liegt als Szenario das Verhaltensstück



nahe, das von der Produktion bis zum Konsum eines Objektes reicht. Tatsächlich ist der Ablauf in Abb. 9 aus Instanzen dieses Szenarios komponiert. Zudem zeigt Abb. 9 den *einzigsten* Ablauf des Modells. *Mehrere* Abläufe entstehen durch *Alternativen* im Modell. Tatsächlich hat das Modell in Abb. 5 mit seinen beiden alternativen Speicherzellen unendlich viele verschiedene Abläufe. Sie sind allerdings sehr regelmäßig strukturiert: Sie sind aus zwei Szenarien zusammengesetzt; das zweite entsteht aus (5) durch Apostrophe an send und rec.

### 3.3 Prinzipien und Theoriebildung

Mit der ausführlichen Erörterung verteilter Abläufe im letzten Abschnitt wollten wir verdeutlichen, was Petri ein wichtiges Anliegen war: Sein Ansatz folgt fundamental anderen Prinzipien als die gängigen Mechanismen zur Manipulation von Symbolen. Zwei weitere Prinzipien seien hier noch genannt:

- Reversibilität von Schritten. Wie in Abschnitt 1.3 skizziert, ist ein Schritt  $S \xrightarrow{t} S'$  *reversibel* wenn nicht nur  $S'$  aus  $S$  und  $t$ , sondern auch  $S$  aus  $S'$  und  $t$  ableitbar ist. Intuitiv formuliert, geht bei einem reversiblen Schritt „keine Information verloren“ - eine gute Voraussetzung zum Auffinden eines „Informationsmaßes“ für ein Invarianten-Theorem (vgl. 1.1). Auch ohne ein solches Theorem hat Reversibilität ihren Nutzen: Sie ist Ursache der starken Ausdruckskraft und einfachen Herleitbarkeit von *Platzinvarianten* und *Transitionsinvarianten* zur Analyse von Petrinetzen (vgl. [Reisig 2010]).

Nach Petris Vorstellung soll jegliche Informationsverarbeitung reversibel organisiert werden (nur so kann man sie bilanzieren (vgl. 1.1)). Er zeigt in [Petri65], wie jede  $n$ -stellige binäre Funktion als Ausschnitt einer reversiblen  $n + 1$ -stelligen binären Funktion darstellbar ist. Wenn man Rechner nach diesem Prinzip aufbaut, sind Fehlverhalten und Missbrauch viel leichter fassbar.

- Lokalität. Im elementaren Modell (vgl. 2.1) ist die Bedeutung einer Transition gegeben durch die Plätze deren Marken sie ändert. Umgekehrt ist die Bedeutung eines Platzes gegeben durch die Transitionen, deren Marken sie ändern. Der Wirkungsbereich eines Platzes oder einer Transition ist auf die unmittelbare, durch die angrenzenden Pfeile festgelegte Umgebung bestimmt. Um die Bedeutung einer Pfeilinschrift eines Automaten wie Abb. 9 zu verstehen, muss man das ganze Modell nach Pfeilen mit der gleichen Anschrift absuchen.

## 4 Was Petri hinterlassen hat

### 4.1 Eine anerkannte Modellierungstechnik

Seit Beginn der 1980er Jahre wuchs die Zahl der theoretischen und praktischen Arbeiten zu Petri-Netzen sprunghaft an. Als ganz neues Konzept wurde die Markierung von Plätzen mit „schwarzen“ Marken auf individuelle, „bunte“ Marken verallgemeinert - ein Schritt, der die Ausdruckskraft der Modellierungstechnik massiv erhöht und die entscheidenden Analysetechniken zweckmäßig verallgemeinert. Petri hat schon Mitte der 1970er Jahre in [Petri 1977] solche Marken verwendet (Abb. 10).

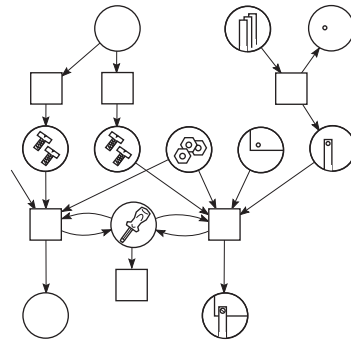


Abbildung 10: Individuelle Objekte als Marken

Konzepte zur Verfeinerung und Vergrößerung, zur Ergänzung von Zeitaspekten, Wahrscheinlichkeiten, Priorität usw. wurden theoretisch untersucht, in Softwarewerkzeuge eingebaut und in der Praxis genutzt.

Mit dem aufkommenden modellbasierten Entwurf Anfang der 1990er Jahre hatten Petri-Netze endgültig ihren Platz als Modellierungstechnik gefunden. Viele dort verwendete Methoden haben Komponenten, die Konzepte von Petri-Netzen nachbilden. Dazu gehören insbesondere auch die Aktivitätsdiagramme der UML. Als Technik zur Modellierung rechnerintegrierter Systeme haben sich Petri-Netze fest etabliert. Daneben wird auch in ganz anderen Bereichen mit Petri-Netzen modelliert. Ein Beispiel ist die Systembiologie, wo komplexe Stoffwechselprozesse zunehmend mit Petri-Netzen modelliert und analysiert werden. Ein weiteres Beispiel sind Modelle betrieblicher Geschäftsprozesse. Ihre rechnergestützte Verwaltung beruht häufig auf Petri-Netzbasierter Software [van der Aalst, van Hee].

Wenig bekannt in der Informatik ist die hohe Wertschätzung der Petri-Netze in der Technik, bei Ingenieuren. Bei der Verleihung des Werner-von-Siemens-Ringes an C.A. Petri (als 30. „hochverdienter Naturforscher und Gestalter der Technik“ und zweiter Informatiker nach Konrad Zuse hat Prof. Gottzein hervorgehoben: „Bei den Ingenieuren führten Petri-Netze zu einem Durchbruch in der Behandlung diskreter gesteuerter Systeme. Petri-Netze kommen bei der Lösung des Entwurfsprozesses eine Schlüsselrolle zu, weil diese erstmals eine eindeutige

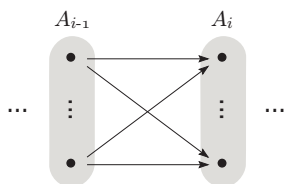
Beschreibung und auch eine aussagekräftige Analyse diskret gesteuerter Systeme zulassen. Auf der Basis von Petrinetzen können nun auch für diskrete Steuerungssystem Systeminvarianten angegeben werden.“

## 4.2 Eine lebendige Wissenschaftsgemeinde

Seit über 30 Jahren gibt eine eine lebhaftige Wissenschaftsgemeinde zu Petrinetzen, vielfach verästelt und zusammengehalten über das "Petri Nets World"-Portal der Universität Hamburg<sup>1</sup>. Periodisch werden Konferenzreihen organisiert, insbesondere seit 1980 die jährliche „International Conference on Applications and Theory of Petri Nets“ mit speziellen Workshops und regelmäßig mehr als 100 Teilnehmern. In den Springer Lecture Notes gibt es die Subreihe „Transactions on Petri Nets and other models of concurrency“. Die GI-Fachgruppe "Petrinetze und verwandte Systemmodelle" gibt seit 1979 einen umfangreichen Newsletter mit inzwischen über 60 Ausgaben heraus. In anderen Ländern gibt es vergleichbare Gruppen. Petrinetze werden heutzutage an fast allen Hochschulen mit Informatik-Bezug gelehrt. Google nennt über 460.000 Einträge.

## 4.3 Offene Fragen

In seinem eingeladenen Vortrag auf der 26. *International Conference on Application and Theory of Petri Nets* in Miami im Juni 2005 hat Petri die Vielfalt und Qualität der theoretischen Weiterentwicklungen und praktischen Anwendungen seiner theoretischen Vorstellungen gelobt. Er hat dennoch angemahnt, die Theorie prinzipiell und substantiell auszubauen. Einige der großen, langfristigen Ziele seiner Dissertation werden immer noch nicht bearbeitet. Im ging es niemals nur darum eine Modellierungstechnik vorzuschlagen. Vielmehr wollte er naturgesetzliche Zusammenhänge entdecken. Er selbst hat seit seiner Pensionierung 1991 einiges dazu aufgeschrieben und in [Petri 1996] zusammengestellt. Einer seiner Gedanken dazu sei hier skizziert. Er betrifft das Messen und den Begriff des „ungefähr gleichen“, der ihn immer sehr beschäftigt hat (dazu mehr in Abschnitt 5). Norbert Wiener diskutierte schon 1921 in seiner Arbeit [Wiener 1921] zur Axiomatik des Messens eine Ähnlichkeitsrelation,  $\sim$ . Indem Wiener die Ähnlichkeit  $\sim$  als Äquivalenzrelation annimmt, zerfällt eine Menge  $A$  beim Messen der Größe ihrer Elemente in Äquivalenzklassen  $A_0, A_1$ , wobei jedes Element in  $A_{i-1}$  kleiner ist als jedes Element in  $A_i$ :



(jeder Pfeil beschreibt die Ordnung zweier Elemente. Petri hält das für viel zu restriktiv. Er kann sich auch Ordnungen der Form

<sup>1</sup><http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/index.html>



vorstellen. Dabei ist  $\sim$  offensichtlich nicht transitiv. Eine Analogie dafür findet er in guten Kopiergeräten: Eine Kopie ist nicht durch Augenschein vom Original unterscheidbar, Original und Kopie sind ähnlich. Wenn man aber oft genug die jeweils letzte Kopie wiederum kopiert, wird man irgendwann einen Unterschied zum 1. Original erkennen. Ein schlagendes Beispiel ist die kausale Ordnung, mit ihrem Komplement, der kausalen Unabhängigkeit. Im Beispiel von Abb.9 sieht man, dass  $\text{prod}_2$  unabhängig von  $\text{cons}_1$  und  $\text{cons}_1$  unabhängig von  $\text{prod}_3$  eintritt, aber  $\text{cons}_1$  sehr wohl kausal vor  $\text{prod}_3$ . Interpretiert man die Ordnung in Abb. 9 zeitlich, so steht die Nicht-Ordnung für „während“. Petri stellt nun Bezüge zur Quantenmechanik her und konstruiert kombinatorische Modell kontinuierlicher dynamischer Systeme [Petri 1996].

## 5 Carl Adam Petri

Verteiltheit und Nebenläufigkeit als Grundlage der Informatik, Theoriebildung im Einklang mit der Physik, Invarianten in Analogie zu den Naturwissenschaften, formale Modellierung der Pragmatik des Umgangs mit Rechensystemen – das waren Themen, die der beginnenden Wissenschaft der Informatik zu Beginn der 1960er Jahre gänzlich fremd waren und die kaum jemand in einer Dissertation jener Zeit erwartet hätte.

Was ist das für ein Mensch, der so unabhängig von aktuellen Strömungen und Moden wie selten jemand seine wissenschaftliche Vorstellungswelt aufbaut? Petris biographische Eckdaten sind typisch für seinen Jahrgang; zugleich aber erkennt man darin eine Kontinuität für ihn typischer Ereignisse seiner Kindheit und Jugend, hin zu seiner späteren wissenschaftlichen Arbeit.

Geboren 1926 in Leipzig, 1944 mit einem „Not-Abitur“ der berühmten Thomas-Schule zum Militär gezwungen, geriet er in britische Gefangenschaft, blieb danach bis 1949 in England und studierte anschließend in Hannover Mathematik. Sein Lehrer Heinz Unger nahm ihn 1956 als Assistent mit nach Bonn. Nach seiner Promotion 1962 hat er das Rechenzentrum der Universität Bonn eingerichtet und geleitet. Bei der Gründung der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) hat er das Institut für Informationssystemforschung aufgebaut und bis 1991 geführt. Mit einer Gruppe von Mitarbeitern und zahlreichen Gästen hat er dort die Ideen seiner Dissertation ausgearbeitet und weiterentwickelt. Einen Ruf an die Universität Dortmund hat er 1973 abgelehnt. Nach seiner Pensionierung 1991 hat Petri seine Ideen weiter ausgebaut und publiziert.

Es gibt vielerlei Berichte und Anekdoten, die erklären helfen, warum Petri ganz bestimmte Fragestellungen und methodische Ansätze so zielstrebig betont hat. Drei davon seien hier berichtet: Petri Vater war promovierter Mathematiker, der noch Minkowsky und Hilbert gekannt hat und seinem Sohn vieles

erklären konnte. Als Kind und Jugendlicher war Carl Adam Petri an naturwissenschaftlichen Fragestellungen interessiert. Zum 12. Geburtstag bekam er aus der Konkursmasse einer Buchhandlung zwei dicke Lehrbücher der Chemie, die er durcharbeitete. Bei dieser Gelegenheit hat er vielleicht schon Skizzen wie die in Abb. 11 gezeichnet. Sein Vater konnte ihm eine Ausnahmegenehmigung be-

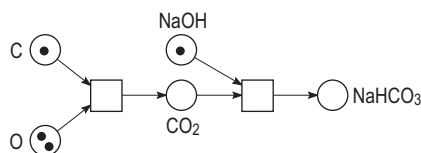


Abbildung 11: Chemischer Prozess als Petrinetz

sorgen, als Jugendlicher unbeschränkt die Leipziger Zentralbibliothek zu nutzen. Dort hat er sich an Arbeiten von Einstein und Heisenberg versucht. Als Flackhelfer der Luftwaffe sah er Offiziere, die mit einfachen Mitteln, einschließlich Gehör und Augenmaß, die Höhe, Entfernung und Geschwindigkeit anfliegender Flugzeuge an die Kanoniere weitergaben. Die Kombination aus Messen und Abschätzen und vor allem die Frage nach der Verantwortung für (zwangsläufig) auftretende Fehler hat ihn sehr beschäftigt.

In seinen Jahren in England hat Petri vermessungstechnische Probleme gelöst, beispielsweise die Anlage konzentrischer Ellipsen auf hügeligem Gelände.

Alle drei genannten Fragestellung, die Methoden der Naturwissenschaften, die pragmatischen Aspekte des fehlerbehafteten Messens und die Argumentation über geometrische Objekte findet sich in späteren Arbeiten wieder (vgl. Abschnitt 4.3).

Es ist bemerkenswert, wie wenig die zunächst ausbleibende Anerkennung Petri irritiert hat. Unermüdlich und geduldig hat er für seine Einsichten geworben, immer in sorgfältig abgewogenen Formulierungen. Wenn einem Zuhörer etwas kompliziert erschien, lag das zumeist am für ihn überraschenden, unerwarteten Inhalt. Petris sprachliche Klarheit und stilistische Treffsicherheit waren ein Vorbild für uns alle.

Die Informatik hat sich stürmisch und ungeplant entwickelt, getrieben von ihrem technischen und ökonomischen Potential. Dies hat Auswirkungen auf die Wissenschaft, die Erfolge fast nur noch an kurzfristig angelegten Projekten misst. In dieser Welt hätte Petri kaum eine Chance gehabt. Nur wenige fragen so wie er über den Tag hinaus, wie denn eine systematische Wissenschaft der Informatik aussehen könnte.

## 5.1 Die Ehrungen

Nachdem Petrinetze in den 1980er Jahren als wertvolle Modellierungstechnik anerkannt waren, ist Carl Adam Petri vielfach geehrt worden. Zu den herausragenden Auszeichnungen gehören

- 1988 Verdienstkreuz 1. Klasse des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschlands
- 1988 Honorarprofessor der Universität Hamburg
- 1989 Mitglied der Academia Europaea, London
- 1993 Konrad-Zuse-Medaille der Gesellschaft für Informatik für besondere Verdienste um die Informatik
- 1997 Werner-von-Siemens-Ring für herausragende Verdienste um die Technik in Verbindung mit der Wissenschaft
- 1997 Mitglied der New York Academy of Sciences
- 1999 Ehrendoktor der Universität Zaragossa
- 2003 Commandeur in de Orde van de Nederlandse Leeuw
- 2007 Gold Medal of Honor der Academy of Transdisciplinary Learning and Advanced Studies
- 2009 IEEE Computer Pioneer Award
- 2010 Gold Medal der Software Engineering Society (SES) for Transformative Achievement

## Literatur

- Broy, M. & Denert, E. (2005). *Software Pioneers*. Springer.
- Mayr, E. W. (1984). An algorithm for the general Petri net reachability Problem. *SIAM Journal on Computing* 13, 3, 441–460.
- Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. PhD thesis, TU Darmstadt.
- Petri, C. A. (1965). *Grundsätzliches zur Beschreibung diskreter Prozesse*. Birkhäuser-Verlag.
- Petri, C. A. (1977). *Kommunikationsdisziplinen*. Seminarbericht 26/02, Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen.
- Petri, C. A. (1996). Nets, Time and Space. *TCS*, 153, 3–48.
- Reisig, W. (2010). *Petrinetze - Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien*. Vieweg + Teubner Verlag.
- Wiener, N. (1921). A new theory of measurement: A study in the logic of mathematics. *Proc. London Math. Soc.*, 19.