VORWORT ZUR DEUTSCHEN AUSGABE (1974)

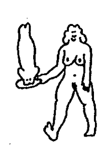
Studien zur Theorie der Automaten (Automata Studies): C. E. Shannon und J. McCarthy, Franz Kaltenbeck (Hsg.), München S. X–XXVII

Wie für die gesamte Kommunikationsforschung ist es für die Computerwissenschaft eine notwendige Bedingung, Theorie und Technologie ineinander überzuführen. Denn soferne ein Problem nur technisch gelöst oder empirisch verstanden werden kann, werden Technik oder Empirie selbst zur Nachricht, die ihrerseits eine Hierarchie von Interpretationen notwendig macht. Die Grundlage einer Konvergenz von Theorie und Empirie, von Philosophie und Technik, besteht darin, daß die mentalistischen Beschreibungen von Denkprozessen in Entwürfe und Programme von Maschinen überführt werden können und daß sich aus der Tatsache, daß die adäquate Beschreibung wesentlicher kognitiver Tätigkeiten Maschinen darstellen (1), Aufschlüsse über fundamentale Mechanismen des Denkens gewinnen lassen.

Die Notwendigkeit, eine allgemeine Theorie der Automaten und der Berechnung zu entwickeln, versteht sich aus der Unangemessenheit der gegenwärtigen Empirie für das Verständnis der wesentlichen computertechnologischen Probleme (2) und ihrer erkenntnistheoretischen Implikationen. Das Fehlen einer solchen adäquaten Theorie der Computer gilt als eine *technische* Beschränkung der Kapazität und Komplexität der Maschinen, die heute gebaut werden können. Eine allgemeine, für die Analyse der Berechnungsvorgänge in komplizierten, wirklichen Automaten adäquate Theorie hat die Untersuchung der abstrakten Automaten, dh der logisch und mathematisch möglichen Organisation und Struktur von Maschinen ohne Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften ihrer Bauelemente zur Voraussetzung. Gegenwärtig ist die Automatentheorie mit der Theorie der abstrakten Automaten noch synonym.

Von den Textbüchern, die zu Quellenwerken dieses Zweigs der systemtheoretischen Grundlagenforschung avancierten (3), sind die ***Studien zur Theorie der Automaten*** das Forschungsmemorandum, mit welchem die Automatentheorie, resultierend aus Metamathematik, Neurokybernetik und der Theorie der Schaltnetzwerke, zu ihrer Bewußtwerdung als selbständige wissenschaftliche Disziplin gelangte. Eine solche Politik der Kommunikation zu manifestieren, konnte nur aufgrund des Belangs der wesentlichen Theoreme dieses Werks gelingen, von denen sich in der Tat die rezenten Ergebnisse der Automatentheorie ableiten, zu deren Denkweisen diese Theoreme einen universellen Zugang öffnen.

So hat S. C. KLEENEs Abhandlung die Disziplin der regulären Ausdrücke begründet, welche in der Theorie der Programmierung (4) und für



frist:

den "linguistischen" Ansatz (5) in der Automatentheorie große Bedeutung gewonnen hat. KLEENE stellte und beantwortete in dieser schon 1951 geschriebenen Arbeit die Frage, welche Ereignisse, dh welche Mengen von Inputfolgen, endliche Automaten charakterisieren können. KLEENE zeigte, daß endliche Maschinen nur reguläre Mengen von Folgen 'erkennen' können und daß es einerseits einen Algorithmus gibt, um den regulären Ausdruck der von einer gegebenen Maschine akzeptierten Menge zu bestimmen und andererseits einen Algorithmus für die Konstruktion eines endlichen Automaten zu einem gegebenen regulären Ausdruck.

Reguläre Ausdrücke stehen für reguläre Ereignisse, dh reguläre Mengen von Folgen, also gewisse Mengen von Wörtern. KLEENE definierte die regulären Mengen als die engste Klasse der Mengen von Folgen, welche die Einermenge und die leere Menge beinhalten und die unter den Operationen der Vereinigung, der Verkettung und der Iteration (Sternoperation) abgeschlossen sind. Die Ausdrücke, welche für die unter diesen drei Operationen abgeschlossenen Mengen stehen, bilden die *eingeschränkte Sprache der regulären Ausdrücke*. Die *erweiterte Sprache der regulären Ausdrücke* weist zusätzlich noch die Operationen des Durchschnitts und der Komplementbildung auf. KLEENE betrachtete nur die eingeschränkte Sprache der regulären Ausdrücke und zeigte in Abschnitt 7.4 seiner Arbeit einige inzwischen gelöste Probleme dieser Sprache auf.

Da in der Sprache der regulären Ausdrücke das Verhalten endlicher Automaten mittels ihrer Reaktion auf Klassen von Eingabefolgen beschrieben, dh ein gewünschtes äußeres Verhalten einer Maschine auf ihr Zustandsverhalten bezogen und weiters von einem gegebenen Zustand auf die vergangene Information, welche durch ihn repräsentiert wird, zurückgeschlossen werden kann, stellt die Korrespondenz zwischen regulären Ausdrücken und sequentiellen Maschinen ein wichtiges Instrument zur Analyse künstlicher Sprachen dar (6). Hat man zB zwei reguläre Ausdrücke, so ist es oft sehr schwierig festzustellen, ob sie dieselbe Menge von Folgen darstellen. Die rezente Erforschung der regulären Ausdrücke beschäftigt sich daher mit folgenden zwei Hauptproblemen: 1. dem Beweis gültiger Gleichungen und 2. der Aufstellung ergiebiger neuer Gleichungen regulärer Ausdrücke und ihren Beweisen. Die systematische Untersuchung des Problems, Gleichungen für reguläre Ausdrücke zu beweisen, dient dem Ziel, einen Kalkül für reguläre Ausdrücke zu finden.

In Abschnitt 7.2 seiner Arbeit hat KLEENE eine Reihe von gültigen Gleichungen für reguläre Ausdrücke aufgestellt. In (4) gibt Robert MCNAUGHTON vier Methoden für den Beweis der Gleichheit regulärer Ausdrücke an. Die erste Methode besteht darin, jeden regulären Ausdruck in einen Zustandsgraphen umzuwandeln, diese Zustandsgraphen dann zu reduzieren und zu prüfen, ob die resultierenden Zustandsgraphen isomorph sind. Diese Technik wurde von MCNAUGHTON und YAMADA (7) entwikkelt. Die zweite Methode besteht darin, daß man die Gleichheit regulärer Ausdrücke durch Neuzerlegung beweist. Diese Methode ist kompliziert, wenn man für jede Gleichung einen neuen Beweis braucht. Bei der dritten Methode bedient man sich eines logischen Systems mit Ableitungsregeln, um Gleichungen in der Art zu beweisen, wie man formale Beweise führt. Unabhängig voneinander haben SALOMAA (8) und AANDERAA (9) bewiesen, daß ein Axiomensystem mit drei Ableitungsregeln vollständig ist, dh, daß alle gültigen regulären Ausdrücke in diesem System abgeleitet werden können. In der vierten Methode für den Beweis der Gleichheit regulärer Ausdrücke verwendet man Graphen. CHOMSKY und MILLER (10) haben als erste Graphen (im Gegensatz zum beschränkteren Begriff eines Zustandsgraphen) für die Definition des Begriffs einer "finite-state language" als einer durch einen Graphen mit einer endlichen Menge von Knotenpunkten erzeugten Sprache verwendet. Jeder reguläre Ausdruck kann in einen Graphen umgewandelt werden (dafür gibt es einen Algorithmus), jedoch nicht jeder Graph in einen regulären Ausdruck. Mit dem zweiten Hauptproblem der Untersuchung der regulären Ausdrücke, welches darin besteht, zu einem gegebenen regulären Ausdruck einen interessanten, zB einfacheren ihm gleichen regulären Ausdruck zu finden, stellt sich auch die Frage, ob es eine kanonische Form für reguläre Ausdrücke gibt.

John Von NEUMANN hat der Automatentheorie, und damit über die Theorie der abstrakten Automaten hinaus, zwei Forschungsrichtungen gewiesen: die Theorie der selbstreproduzierenden Automaten (1) und die Theorie des Aufbaus zuverlässiger Systeme aus unzuverlässigen Bestandteilen. Diese beiden Theorien bilden die Hauptkomponenten in seiner Konzeption einer umfassenden logisch-mathematischen Theorie der Automaten in Hinblick auf komplizierte Systeme, wie das menschliche Nervensystem und Großrechenanlagen. Aus der Untersuchung der beiden eng miteinander verwandten Probleme der Selbstreproduktion und der Selbstreparatur ging für Von NEUMANN hervor, daß Systeme großer Komplexität qualitativ neue Organisationsprinzipien involvieren, deren Verständnis wiederum neue erkenntnistheoretische und mathematische Ansätze notwendig macht.

Von NEUMANNs Theorie der Zuverlässigkeit brachte das Resultat, daß man Maschinen zum Preis der Einführung von Redundanz, dh der passenden Vervielfachung ihrer Teile, zuverlässig gegenüber einer großen Klasse von Störungen konstruieren kann. Allerdings war Von NEUMANN mit seinem Ergebnis nicht zufrieden, da die Höhe der Redundanz, die er in

Frist!

seiner Arbeit vorsah, eine unrealistisch große Anzahl von Bestandteilen notwendig machte. Von NEUMANN war überzeugt, daß der Fehler "mit thermodynamischen Methoden behandelt und ebenso zu einem Gegenstand der thermodynamischen Theorie gemacht werden sollte, wie das mit der Information durch L.SZILARD und C. E. SHANNON ... geschehen ist". Die Forschung nach ihm hat diesen Gedanken tatsächlich aufgegriffen und damit befriedigendere Lösungen des Zuverlässigkeitsproblems erzielt. Die Schwäche seiner Behandlung des Fehlers zeigte sich für Von NEUMANN besonders deutlich am Vergleich mit dem Zentralnervensystem, dessen zuverlässige Informationsverarbeitung schon aus den genannten quantitativen Gründen auf Organisationsprinzipien beruhen muß, für die Von NEUMANNs Modell keine Erklärung geben konnte. Diese Organisationsprinzipien beruhen auf der Komplexität des Nervensystems. Es sollte sich zeigen, daß die spätere und zufriedenstellendere Lösung des Zuverlässigkeitsproblems das Gegenteil zur Lösung Von NEUMANNs darstellt. Während nämlich Von NEUMANN Komplexität zum Preis von Redundanz minimalisierte, wird in dieser Lösung Redundanz zum Preis von Komplexität verringert (11). Von NEUMANN untersuchte den Begriff der Komplexität eher im Zusammenhang mit dem Problem der Selbstreproduktion. Ein erkenntnistheoretischer Aspekt der Komplexität bestand für Von NEUMANN darin, daß Komplexität unter einem bestimmten Niveau degenerativ ist, über ihm jedoch die Fähigkeit zur Selbstreproduktion und zur Selbstreparatur ermöglicht. Aufgrund dieser Überlegung kam Von NEUMANN zu der Ansicht, daß die symbolische Verhaltensbeschreibung eines Automaten nur dann einfacher ist als der Automat selbst, wenn es sich dabei um einen einfachen Automaten handelt. Im Falle eines extrem komplizierten Automaten ist es jedoch umgekehrt: der Automat ist einfacher als seine symbolische Beschreibung. Von NEUMANN wies dabei darauf hin, daß diese Tatsache eng mit einem Theorem von GÖDEL (12) verwandt ist, welches besagt, daß die vollständige epistemologische Beschreibung einer Sprache A nicht in derselben Sprache A gegeben werden kann, weil der Wahrheitsbegriff der Sätze von A nicht in A definiert werden kann (13).

Von NEUMANN vermutete, daß es analog zur Maschinen- und Programmiersprache in einem Computer auch eine "primäre" und eine "sekundäre" Sprache des menschlichen Nervensystems gibt, und daß sich die primäre Sprache des Nervensystems von der sekundären Sprache, in der zB die uns bekannte Mathematik abgefaßt ist, grundsätzlich unterscheidet. Nach Von NEUMANN ist die primäre Sprache des Zentralnervensystems durch eine geringere logische und arithmetische Tiefe als die von uns verwendete sekundäre Sprache gekennzeichnet (14). Auch C. E. SHANNON war der

Ansicht, daß zwei Arten von Mathematik für die Beschreibung komplizierter Nervennetzwerke notwendig sind. Eine, die sich mit psychologischen Begriffen beschäftigt und eine andere, welche die Nervennetze behandelt. Die erste Art der Mathematik wäre dann mit der Thermodynamik zu vergleichen, die sich mit der Temperatur eines Systems beschäftigt, die zweite Art mit der statistischen Mechanik, die sich mit dem Verhalten der einzelnen Moleküle befaßt (15).

Die allgemeinste Schlußfolgerung, die Von NEUMANN aus seinen vergleichenden Studien zwischen künstlichen und natürlichen Automaten zog, bestand darin, daß natürliche Organismen, insbesondere das Nervensystem, sowohl analoge als auch digitale Vorgänge involvieren. Aufgrund dieser Erkenntnis schlug Von NEUMANN in seiner vorliegenden Arbeit ein kombiniertes analog-digitales Rechenschema vor.

Von NEUMANNs Arbeit inspirierte E. F. MOORE und C. E. SHANNON, eine ähnliche Analyse des Zuverlässigkeitsproblems für Relaisschaltkreise durchzuführen (16). Für fehlerkorrigierende Schaltkreise sind Relais besser geeignet als die neuronenähnlichen Bestandteile Von NEUMANNs. MOORE und SHANNON untersuchten Relaiskontaktnetzwerke, in denen Fehler nur bei den Inputs auftraten, während NEUMANN Schaltnetzwerke behandelte, in denen Fehler beim Output auftraten. Daher differierten ihre Ergebnisse. Für Von NEUMANNs Modelle war eine bereits einigermaßen gute Zuverlässigkeit in den Bestandteilen Voraussetzung. Die Methode von MOORE und SHANNON hingegen ist auf beliebig unzuverlässige Relais anwendbar. Doch auch die Ergebnisse von MOORE und SHANNON erfordern sehr redundante Netzwerke, um eine hohe Zuverlässigkeit der Netzwerktätigkeit zu garantieren.

ALLANSON (17), LÖFGREN (18), MUROGA (19), VERBEEK (20), BLUM (21), MCCULLOCH (22) entwickelten in der Folge verschiedene Variationen und Verbesserungen von J.v.NEUMANNs Modell.

In seiner Würdigung von J.v.NEUMANNs Beitrag zur Automatentheorie (23) hatte SHANNON auf die Analogie zwischen dem Problem des Fehlers in der Automatentheorie und dem Problem des Rauschens in der Informationstheorie hingewiesen. Doch Peter ELIAS (24) war der erste, der (1958) bemerkte, daß die Ergebnisse von J.v.NEUMANN und von MOORE und SHANNON mit dem fundamentalen Theorem der Informationstheorie bzgl der zuverlässigen Übertragung von Information durch einen rauschgestörten Kanal nicht konsistent zu sein scheinen. Dieses Theorem - C. E. SHANNONs Noisy Channel Coding Theorem (25) - gibt eine Grenze für die erforderliche Redundanz an, mit der jede gewünschte Stufe zuverlässiger Kommunikation durch einen rauschgestörten Kanal erreicht werden kann, vorausgesetzt, daß eine hinreichend komplexe Kodierungs- und Dekodierungsausrüstung vorhanden ist. Dieses Theorem beweist also die Existenz eines fehlerkorrigierenden Kodes mit einer Redundanz nahe an dieser Grenze, der die gewünschte Zuverlässigkeit besitzt.

Versuche wurden unternommen (26, 27, 28), die Informationstheorie auf den allgemeineren Fall der gestörten Berechnung auszudehnen. Dies gelang COWAN und WINOGRAD (29). Analog zur Kapazität eines rauschgestörten Kommunikationskanals definierten sie eine Berechnungskapazität für fehlerhafte Moduln (formale Neuronen), die logische Funktionen berechnen. Diese Kapazität bestimmt die niederste Schranke für jene Redundanz, die erforderlich ist, um zuverlässige Berechnungen in Gegenwart von Rauschen ausführen zu können. COWAN und WINOGRAD zeigten, wie SHANNONs Kodierungstheorem für rauschgestörte Kanäle auch auf die Berechnung mit rauschgestörten Moduln angewendet werden kann. In einem zweiten Resultat zeigten sie, wie man trotz Fehler im modularen Verknüpfungsdiagramm hohe Zuverlässigkeit erreichen kann. Damit wurde bewiesen, daß definite Ereignisse (dh Ereignisse endlicher Dauer) mit beliebig kleinen Fehlerfrequenzen durch Netzwerke realisiert werden können, die aus Moduln und Verbindungen mit geringer Zuverlässigkeit aufgebaut sind.

Beide Theoreme legen fest, wie Redundanz durch Komplexität ausgetauscht werden kann, vorausgesetzt, daß der Komplexität keine Schranken gesetzt sind und daß modulare Fehler nicht zu schnell mit der Komplexität anwachsen. Dieses Ergebnis ist für weitere Untersuchungen zB der selbstreparierenden, selbstadaptierenden und selbstreproduzierenden Automaten wichtig. COWAN/WINOGRAD-Automaten gelingt es zB, ihre Zuverlässigkeit bzw Lebensdauer durch modulare Komplexität zu erhöhen.

J. T. CULBERTSON hat eigens für diese Ausgabe eine Neufassung seiner Untersuchung geschrieben, in welche von der Originalarbeit nur ca 10 Seiten eingegangen sind. Diese neue Darstellung beruht auf jüngsten Ergebnissen und teilweise auf der Darstellung in seinem Buch ***The Mind of Robots*** (30). CULBERTSON untersucht, welche Art von Nervennetzen dem Verhalten lebender Organismen, das durch ein System unbedingter Reflexe bestimmt wird, zugrunde liegt, und welche Möglichkeiten Automaten haben, die durch Reflexe gesteuert werden. Seine Modelle sind zur Modellierung von Systemen bedingter bzw unbedingter Reflexe geeignet.

In seinem auf eigenen Wunsch in dieser Ausgabe weggelassenen Beitrag ***Some universal elements for finite automata*** zeigte M.MINSKY, daß eine gewisse Kategorie von Mengen von Elementen in dem Sinn universell ist, daß man mit solchen Elementen Maschinen aufbauen kann, die innerhalb vernünftiger Grenzen beliebige Funktionen realisieren können. Daher kann man bei der Konstruktion komplizierter Maschinen von einer kleinen Anzahl von Grundelementen ausgehen. Anstatt dieser Arbeit hat uns Prof. MINSKY die im Anhang abgedruckten Arbeiten vorgeschlagen.

E. F. MOORE hat in seiner Abhandlung gegenüber dem Formalismus der Nervennetze von McCULLOCH und PITTS, den auch KLEENE verwendete (wobei KLEENE die Äquivalenz dieses Formalismus mit dem allgemeinen Begriff eines endlichen Automaten bewies), den Begriff einer sequentiellen Maschine mit endlich vielen Zuständen definiert. Ein MOORE-Automat ist eine endliche Maschine, deren gegenwärtiger Zustand nur von ihrem früheren Input und früheren Zustand und deren gegenwärtiger Output nur vom gegenwärtigen Zustand abhängen. Darüber hinaus beinhaltet MOOREs Abhandlung einige kommunikationstheoretisch bedeutende 'Unbestimmtheitsbeziehungen' für deterministische sequentielle Maschinen als Ergebnis der Gedankenexperimente, die MOORE mit diesen Maschinen anstellte. MOORE stellt die Frage, welche Schlußfolgerungen über die inneren Bedingungen einer endlichen Maschine aufgrund von an ihnen angestellten äußeren Experimenten gezogen werden können, dh Experimenten, bei denen nur Input und Output der Maschinen verwendet werden. Dabei kam er unter anderem zu dem Ergebnis, daß der äußere Beobachter einer sequentiellen Maschine aufgrund dieser Experimente, die er an ihr quasi nur als black box anstellen kann, zwar den Zustand der Maschine am Ende des Experiments erfahren kann, daß er jedoch durch kein (einfaches) Experiment ihren Zustand zu Beginn des Experiments erfahren kann. Denn ein Experiment, das den Zustand der Maschine zu seinem Beginn angeben soll, verändert den Zustand des Systems in der Weise, daß nur mehr eine teilweise Information über die frühere Geschichte des Systems zu erhalten ist. In dieser Tatsache sieht MOORE für diese diskreten, deterministischen Systeme ein Analogon zum Heisenbergschen Unbestimmtheitsprinzip. Bevor MOORE zu diesen Ergebnissen kam, war es notwendig, mit seinen Experimenten die Unterscheidbarkeit oder Ununterscheidbarkeit von Zuständen bzw. Maschinen zu definieren. Das Konzept der Äquivalenz von sequentiellen Maschinen bzw. Schaltkreisen, das für die Reduktion und die Synthese von realen Maschinen bzw. Schaltkreisen so zentral ist, wurde von D.A. HUFFMANN (31) und E.F. MOORE unabhängig voneinander gefunden.

G.H. MEALY (32) verallgemeinerte die Ergebnisse von HUFFMANN und MOORE. Ein MEALY-Automat ist ein vollständiges deterministisches sequentielles System, bei dem der gegenwärtige Output vom gegenwärtigen Zustand und vom früheren Input abhängt. MEALY- und MOORE-Automaten unterscheiden sich also nur in ihrer Outputfunktion voneinander, ihr Zustandsverhalten ist gleich. Demnach ist ein MOORE-Automat ein Spezialfall des MEALY-Systems. MOOREs Automatendefinition hat M. O. RABIN und D. SCOTT (33) beeinflußt, die jedoch in ihrer Arbeit, welche in dem 1964 von MOORE selbst herausgegebenen Standardwerk über die Theorie der sequentiellen Maschinen erschien (34), einen vereinfachteren Automatenbegriff definierten. Schon MOORE hat in seiner Arbeit Probleme aufgezeigt, welche die rezente Forschung gelöst hat. Das berühmteste davon ist die Lösung der Kaskadenzerlegung von Automaten mit Hilfe der Halbgruppentheorie durch KROHN und RHODES (35, 36). Bisher wurden nur die Eigenschaften einzelner Maschinen diskutiert. A. GILL (37) und andere haben Netzwerke von endlichen Maschinen untersucht, wobei Kaskadennetzwerke im Mittelpunkt stehen, wo der Output einer Maschine einer anderen als Input dient.

In der Theorie der Turingmaschinen hat C.E. SHANNONs Beweis der Adäquatheit binärer Turingmaschinen nicht nur zur Konstruktion von Turingmaschinen mit einem möglichst niedrigen Zustand-Zeichen-Produkt geführt: MINSKY verwendet die von SHANNON erhaltene Maschine mit zwei Symbolen für die Konstruktion einer "eingeschränkten" Turingmaschine, mit der er Turingmaschinen als programmierte Computer interpretiert (38). Das Produkt von Symbolen und Zuständen dient der Qualifikation bei der Klassifizierung von Maschinen, wenn auch nicht als deren Komplexitätsmaß (39). SHANNONs Beweis, daß eine universelle Turingmaschine mit nur 2 inneren Zuständen bzw. mit nur 2 Bandsymbolen konstruiert werden kann, ist ein verblüffendes Ergebnis, wenn man bedenkt, daß eine universelle Turingmaschine, die ja jede spezielle, einen Algorithmus ausführende Turingmaschine simulieren kann, einer so einfachen Vorrichtung, wie sie SHANNON konstruiert hat, äquivalent ist.

M. DAVIS liefert eine strenge Definition des Begriffs einer universellen Turingmaschine. Gegen diese Definition wurde eingewendet, daß sie auch eine Turingmaschine als universell klassifiziert, die viele Berechnungen für eine einzige Antwort braucht. DAVIS hat daher seine Definition in einer weiteren, nicht in der Originalausgabe erschienen Arbeit verschärft, die im Anhang abgedruckt ist.

J. McCARTHYS Arbeit liegt der Gedanke zugrunde, daß eine Maschine problemlösendes Verhalten dadurch erlernen kann, daß sie beliebige Verhaltensweisen simuliert und dann ausprobiert. Solche Verhaltensweisen können durch Turingmaschinen repräsentiert werden, wenn man Turingmaschinen als Definition einer Funktion betrachtet, und wohldefinierte gedankliche Probleme als die Inversion der durch Turingmaschinen definierten rekursiven und partiell rekursiven Funktionen ansieht. Die Schwierigkeit besteht dabei darin, daß die "Dichtheit" interessanter und so repräsentierter Verhaltensweisen sehr niedrig ist (40). Damit ist das Problem gegeben, durch induktive Ableitung zu relevanten "Verhaltensfunktionen" zu kommen, und dieses Problem analysiert McCARTHYS Arbeit, deren philosophische Bedeutung nicht allgemein erkannt worden ist (41).

Das Hauptergebnis von ***Berechenbarkeit durch Wahrscheinlichkeitsmaschinen*** von De LEEUW, MOORE, SHANNON und SHAPIRO besteht in folgendem: die von einer Wahrscheinlichkeitsmaschine aufgezählte Menge kann auch von einer deterministischen Maschine aufgezählt werden, wenn die Zufallsvorrichtung der Wahrscheinlichkeitsmaschine mit einer Wahrscheinlichkeit p Einsen aufzählt, wobei p eine berechenbare reelle Zahl ist.

Der dritte Teil des Buches enthält Aufsätze, die man heute eher der Theorie der künstlichen Intelligenz, der Bionik und der Konstruktion von Programmen zurechnen würde, wo sie auch tatsächlich sehr anregend gewirkt haben.

In ***Entwurf für einen Intelligenzverstärker*** zeigt W.R. ASHBY zwei Bedingungen für die Entstehung von Intelligenz auf: die Produktion von Information, zB mit Hilfe eines Zufallsgenerators, und ihre Interpretation durch graduell verstärkte Selektion. Diese Selektionsverstärkung führt zu einer Hierarchie von Selektion, zB Selektion der Daten, Selektion der Mittel der Selektion etc. Eine Methode der Selektionsverstärkung, die äqulibrierte Selektion, hat ASHBY in seinem berühmten Homeostaten modelliert (42). Diese und seine weiteren Methoden zur Verstärkung von Selektion stellen eine gerühmte Analyse des "Suchprozesses" dar, des elementarsten Ansatzes einer Problemlösungsmethode für Maschinen (43).

D.M. MACKAY analysiert das Problem der Begriffsbildung durch Automaten und gibt zwei Methoden an, die zu einer Lösung dieses Problems führen können. Einerseits kann man sich einen Begriff, worunter MACKAY die symbolische Beschreibung einer Klasse von Zuständen der Umwelt versteht, als eine Art Filtrat der Eingangssignale denken. Andererseits kann man sich vorstellen, daß der Automat ein inneres Modell der Umwelt bildet, das sich ändert, um mit den eingehenden Signalen verträglich zu bleiben. Dieses innere Modell symbolisiert jene die Veränderung hervorrufenden Eigenschaften der empfangenen Information. Jedenfalls schreibt

MACKAY Automaten die mögliche Fähigkeit zu, selbständig Begriffe zu entwickeln. Er verwendete sein Modell der Angleichungsreaktion, also die innere Repräsentation des Enviroments durch den Organismus auch für eine Theorie der Perzeption, welche er als nach außen gerichtete Angleichungsreaktion auffaßt, wobei eingehende Filtrate statistisch signifikanter Eigenschaften in den Rezeptorsignalen den Bereich der möglichen Angleichungsreaktionen einengen (44).

In (45) erörterte er die Prinzipien, nach denen die äußere Welt in natürlichen und künstlichen Systemen repräsentiert werden kann. Dabei ist es eine wesentliche Entscheidung, ob die äußere Welt explizit (zB wie in einer Karte) oder implizit in Form einer statistischen organisierenden Struktur, entwickelt, um die Aktivität den starren und vorhersagbaren Eigenschaften der Welt anzugleichen, repräsentiert werden soll. Die implizite Repräsentation ist für gewisse Zwecke angemessener, denn lebende Systeme zerlegen den sensorischen Input eher in abstrakte Eigenschaften, die für das Verhalten wichtig sind, anstatt ein einzelnes detailliertes inneres Bild aufzubewahren. Wenn Information von mehreren Modalitäten kombiniert werden soll, ist es besonders vorteilhaft, die Welt implizit zu repräsentieren. In (46) wies er nach, daß es ein Trugschluß ist, zu glauben, alle menschliche Aktivität könne durch diskrete logische Operationen repräsentiert werden, und daß höchst charakteristische Eigenschaften der menschlichen Informationsverarbeitung analoger Natur sind. Bekanntlich erweitern künstliche Mechanismen analoger Natur das Repertoire der künstlichen Intelligenz.

A.M. UTTLEYs Arbeiten sind für die Methode relevant, mit der der Suchprozeß in Automaten effizienter gestaltet werden kann, für Pattern Recognition. Dabei geht UTTLEY von der mengentheoretischen Inklusionsrelation und der Relation der bedingten Wahrscheinlichkeit aus, um die Ähnlichkeit von Repräsentationen für Maschinen zu definieren. Temporale Aspekte der Zeichenerkennung (zB das Erkennen einer Signalfolge, die Vorhersage für Zeichen aufgrund einer bedingten Wahrscheinlichkeit ...) werden wahrscheinlichkeitstheoretisch behandelt. UTTLEY hat seine Arbeiten zum Problem der Zeichenerkennung mit der Annahme begonnen, daß zwei bestimmte mathematische Prinzipien der Organisation des Nervensystems zugrundeliegen können, das der Klassifikation und das der bedingten Wahrscheinlichkeit. Er hat für beide Arbeitsmodelle konstruiert (Klassifikationscomputer und Bedingte-Wahrscheinlichkeits-Computer).

In (47) erweiterte er speziell das Klassifikationssystem um ein

Prinzip, das es ermöglicht, auch ein Verhalten, das durch vergangene Erfahrung modifiziert wird, modellieren zu können. Er stellte also eine Lerntheorie auf (da das Klassifikationssystem ja der Speicherung vergangener Ereignisse nicht bedarf).

In (48) hat er präzise Bedingungen angegeben, unter welchen die zwei Prinzipien (Klassifikation und bedingte Wahrscheinlichkeit) in Nervensystemen tätig sind. Er gab dazu 8 Bedingungen an.

In (49) beschrieb er ein System zur Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten, das alle Eigenschaften eines Klassifikationssystems hat, und zwei praktische Computer (einen hydraulischen und einen elektronischen), die alle geforderten Effekte liefern.

In den Arbeiten (50, 51) hat er diese Probleme der Mustererkennung weiter untersucht, wobei er versuchte, bestehende mathematische Schwierigkeiten und unrealistische Neuronen-Anzahlen zu eliminieren.

Anhang

Endliche Automaten und ihre Entscheidungsprobleme von M.O. RABIN und D. SCOTT untersucht die Struktur der Mengen, die von Automaten definiert werden, welche über einem bzw mehreren Bändern operieren, und einige algorithmisch lösbare sowie unlösbare Entscheidungsprobleme für solche Automaten. RABIN und SCOTT vereinfachten die Outputfunktion des MOORE-Automaten und definierten damit die "Akzeptoren", die auf Eingabemengen nur die Antwort "ja" oder "nein" ausgeben.

Die Definition der universellen Turingmaschine von M. DAVIS stellt eine Verschärfung des Ergebnisses seiner im Hauptteil enthaltenen Arbeit dar.

SHANNON bewies, daß es unmöglich ist, eine universelle Turingmaschine zu konstruieren, die nur einen inneren Zustand verwendet. P.C. FISCHER zeigte, daß der SHANNONsche Beweis nicht anwendbar ist, wenn wir eine schwächere Definition der Universalität, nämlich die von DAVIS (52) verwenden. Da jedoch alle Definitionen der Universalität darin übereinstimmen, daß universelle Turingmaschinen ein unlösbares Halteproblem haben müssen, genügt es, zu beweisen, daß alle Turingmaschinen mit einem Zustand ein lösbares Halteproblem haben, um die Unmöglichkeit einer universellen Turingmaschine mit einem Zustand zu zeigen. R. ABBOTT und R. BOYD haben das, laut FISCHER, geleistet, und unabhängig davon HERMAN (53). FISCHER untersucht, welche andere Definitionsmöglichkeiten außer der Turingmaschine und der Postmaschine für abstrakte Rechenmaschinen noch offen sind (S-Maschinen usw), und wie sie interdependieren. Dabei präzisiert er auch den Begriff der

Dieter ROT, der sich bereit erklärte, die Vignetten zu diesem Band zu zeichnen.

Franz Kaltenbeck

Peter Weibel

Anmerkungen

(1) John Von NEUMANN, *Theory of Self-Reproducing Automata,* herausgegeben und vervollständigt von Arthur W. BURKS, University of Illinois Press, Urbana und London 1966, S. 47 ff; erscheint 1974 in deutscher Übersetzung als Band 3 der R & B Studien.

(2) Marvin MINSKY und Seymour PAPERT, *Perceptrons,* The M.I.T. Press, Cambridge Mass., 1969, S. 2.

(3) Vgl. Edward F. MOORE, Hrsg., *Sequential Machines, Selected Papers,* Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusets, 1964 und Michael A. ARBIB Hrsg., *Algebraic Theory of Machines, Languages and Semigroups,* Academic Press, New York, 1968.

(4) R. MCNAUGHTON, *An Introduction to Regular Expressions* in Julius T. TOU, Hrsg., *Applied Automata Theory,* Academic Press, New York, 1968, S. 38 f.

(5) R. MCNAUGHTON und S. PAPERT, *Counter-Free Automata,* Research Monograph No. 65, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass, 1971, S. xiv.

(6) Taylor L. BOOTH, *Sequential Machines and Automata Theory,* John Wiley and Sons, New York, 1968, S. 240.

(7) R. MCNAUGHTON und H. YAMADA, *Regular expressions and state graphs for automata,* IRE Trans. EC - 9, S. 39 - 47, 1960.

(8) A. SALOMAA, *Two complete axiom systems for the algebra of regular events,* J. Assoc. Comput. Mach. 13, 158 - 169, 1966.

(9) Vgl. (4), S. 41.

(10) N. CHOMSKY und G. A. MILLER, *Finite state languages,* Inform. Control 1, S. 91 - 112, 1958.

(11) J.D. COWAN, *Reliable Computation with Unreliable Elements,* in A.R. MEETHAM und R.A. HUDSON, Hrsg., *Encyclopaedia of Linguistics, Information and Control,* Pergamon Press, Oxford, S. 489 - 495, 1969.

(12) Kurt GÖDEL, *Remarks Before the Princeton Bicentennial Conference on Problems in Mathematics*, in Martin DAVIS, Hrsg., *The Undecidable*, Raven Press, Hewlett, New York, S. 84 - 88, 1965.

(13) Siehe (1), S. 55 f.

(14) John Von NEUMANN, *Die Rechenmaschine und das Gehirn*, R. Oldenbourg, München 1965, S. 77.

(15) Francis O. SCHMITT und Theodore MELNECHUK, Hrsg., *Neurosciences Research Symposium Summaries*, Vol. 1, The M.I.T. Press, Cambridge Mass., 1966, S. 142 f.

(16) E.F. MOORE und C.E. SHANNON, *Reliable circuits using less reliable relays*, J. Franklin Inst., Vol. 262, S. 191 - 208 und 281 - 297, 1956.

(17) J.T. ALLANSON, *Proc. 1st Int. Cong. Cybernetics*, Gauthier-Villars, Paris, S. 687 - 694, 1959.

(18) Lars LÖFGREN, *Automata of High Complexity and Methods of Increasing Their Reliability by Redundancy*, Information and Control 1, S. 127 - 147, 1958.

(19) S. MUROGA, Rome Air Development Center, New York, Technical Note, S 60 - 146, 1960.

(20) L.A.M. VERBEEK, *Principles of Self-Organization*, H. von FOERSTER and G. ZOPF, Jr., Eds., Pergamon Press, New York, S. 121 - 133, 1962.

(21) M. BLUM, 1960, *Principles of Self-Organization*, H. von Foerster and G. Zopf, Jr., Eds., Pergamon Press, New York, S. 95 - 119, 1962.

(22) McCULLOCH, W.S., 1960, *Principles of Self-Organization*, H. von Foerster and G. Zopf, Jr., Eds., Pergamon Press, New York, S. 91 - 94, 1962.

(23) C.E. SHANNON, *Von Neumann's Contributions to Automata Theory*, Bulletin of the Am. Math. Soc., Vol. 64, Nr. 3, Teil 2, Mai 1958.

(24) P. ELIAS, IBM J. Res. Develop., 3, S. 346 - 353, 1958.

(25) C.E. SHANNON, *The Mathematical Theory of Communication*, Bell System Techn. J., Juli und Oktober 1948.

(26) W.W. PETERSON, *Error-Correcting Codes*, The M.I.T. Press, Cambridge, 1961.

(27) M. EDEN, *J. Information and Control,* Vol. 2, S. 310-313, 1959.

(28) J.D. COWAN, 1960a, *Principles of Self-Organization,* H. von Foerster and G. Zopf, Jr., Eds., Pergamon Press, S. 135-179, 1962.

(29) J.D. COWAN und S. WINOGRAD, *Reliable Computation in the Presence of Noise,* The M.I.T. Press, Research Monograph, 1963.

(30) J.T. CULBERTSON, *The Mind of Robots,* Urbana University of Illinois Press, 1963.

(31) D.A. HUFFMAN, *The synthesis of sequential switching circuits,* J. Franklin Inst., Vol. 257, S. 161 - 190, 275 - 303, 1954.

(32) G.H. MEALY, *Method for synthesizing sequential circuits,* Bell Sys. Tech. J., Vol. 34, S. 1054 - 1079, Sept. 1955.

(33) M.O. RABIN und D. SCOTT, siehe S. 327 - 361 in diesem Band.

(34) E.F. MOORE, Hrsg., *Sequential Machines: Selected Papers,* Addison - Wesley Publishing Company, Inc., 1964.

(35) K. KROHN und J. RHODES, *Algebraic Theory of Machines..I. Prime decomposition theorem for finite semigroups and machines.* Trans. Amer. Math. Soc., Vol. 116, S. 450 - 464 (1965).

(36) K. KROHN und J. RHODES, *Algebraic Theory of Machines,* Proc. Symposium on Automata Theory, S. 341 - 384, Polytechnic Institute of Brooklyn, 1962., Polytechnic Press (1963).

(37) A. GILL, *Cascaded Finite-State Machines,* IRE Transactions on Electronic Computers, Vol. EC-10, Nr. 3, S. 366 - 370, 1961.

(38) Siehe S. 383 - 404 in diesem Band.

(39) M. MINSKY, *Form and Content in Computer Science,* ACM Turing Lecture, Journal of the ACM, Vol. 17, Nr. 2, April 1970, S. 198.

(40) John McCARTHY, *Programs with Common Sense,* in M. Minsky, Hrsg., *Semantic Information Processing,* The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1968, S. 403 - 417.

(41) M. MINSKY, *Computation,* Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1967, S. 66.

(42) W.R. ASHBY, *Design for a Brain,* Chapman & Hall Ltd. etc., London, 1952, 1970, S. 100 f.

(43) M. MINSKY, *Steps toward artificial Intelligence* in E.A. FEIGEN-BAUM und J. FELDMAN, Hrsg., *Computers and Thought,* Mc Graw-Hill, New York, 1963, S. 409.

(44) D.M. MACKAY, *Theoretical Models of Space Perception* in Aspects of the Theory of Artificial Intelligence, Hrsg. C.A. Muses, Plenum Press, 1962.

(45) D.M. MACKAY, *Internal Representation of the External World,* Avionics Panel Symposium on Natural and Artificial Logic Processors, Athen, 15. - 19. Juli, 1963.

(46) D.M. MACKAY, *Digits and Analogues.*

(47) A.M. UTTLEY, *A Theory of the Mechanism of Learning Based on the Computation of Conditional Probabilities.(Conditional probability as a principle of learning).* Proceedings of the 1st International Congress on Cybernetics, Namur, 1956. Publisher Gauthier-Villars, Paris.

(48) A.M. UTTLEY, *Conditional Probability Computing in a Nervous System,* Procs. NPL Symp. No. 10, Mechanisation of Thought Processes, HMSO, 1959.

(49) A.M. UTTLEY, *The design of conditional probability computers,* Infn. and Control, 2, 1, 1959.

(50) A.M. UTTLEY, *The transmission of information and the effect of local feedback in theoretical and neural networks,* Brain Research 2, S. 21 - 50, 1966.

(51) A.M. UTTLEY, *The Informon: A network for adaptive pattern recognition,* J. Theor. Biol., 27, S. 31 - 67, 1970.

(52) M. DAVIS, siehe S. 195 - 203 in diesem Band.

(53) G.T. HERMAN, *On the impossibility of one state universal Turing machines,* Research Report, Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley, 1966.

(54) Siehe (41), S. 267 f.