

## Finite Automaten als Instrumente für die Analyse von wissensgeleiteten Problemlöseprozessen: Vorstellung eines neuen Untersuchungsparadigmas

Joachim Funke & Axel Buchner

Psychologisches Institut der Universität Bonn

*Zusammenfassung:* Vorgestellt wird ein Untersuchungsparadigma für die Problemlöseforschung, das auf der Theorie finiter Automaten aufbaut. Zunächst wird der formale Rahmen vorgestellt. Danach geht es um kognitionspsychologisch relevante Aspekte dieses Paradigmas. Hierunter fallen die gezielte Konstruierbarkeit von Automaten mit nahezu beliebigen Eigenschaften, Annahmen zur subjektiven Repräsentation von diskreten dynamischen Systemen, diagnostische Zugänge zu diesen Repräsentationen und Aspekte, die mit dem sequentiellen Charakter des Problemtyps zu tun haben. Die abschließende Diskussion hebt darauf ab, daß der vorgeschlagene Problemtyp zwar keineswegs neu ist, jedoch in seinen systematischen Möglichkeiten der Problemkonstruktion bisher nur unzureichend ausgeschöpft wurde.

*Finite automata as instruments for the analysis of knowledge based problem solving: Presentation of a new research paradigm.*

*Summary:* This paper presents a research paradigm for analysing problem solving processes which is based on the theory of finite automata. First we present the formal framework. Then a discussion follows of aspects of the paradigm that are relevant from a cognitive psychology point of view. These aspects include the creation of automata with almost arbitrary features, assumptions about the subjective representation of discrete dynamic systems, the diagnostic assessment of these representations, and aspects concerning the sequential characteristic of the paradigm. The discussion points out that the approach is not entirely new, but that it has not been fully exploited up to now with respect to its potential for systematically constructing task environments.

### 1. Einführung

Für die Untersuchung menschlichen Problemlösens hat es in den letzten zehn Jahren eine Entwicklung gegeben, die durch den verstärkten Einsatz von Computern als Präsentationsmedium und dadurch bedingt zur Hinwendung auf dynamische Entscheidungsprobleme gekennzeichnet ist (zur Übersicht vgl. Brehmer, 1989; Funke, 1991b). Dabei lassen sich drei verschiedene Akzentsetzungen bei der Verwendung sog. computersimulierter Szenarien als «Reizmaterial», «dynamischer Problemstellung» oder allgemeiner: «task environment» unterscheiden:

(1) Studien zum *Wissenserwerb*. Hier werden Rechner-Umgebungen für einen Lernenden geschaffen, in denen dieser gefahrlos experimentieren und so (gezielt oder ungezielt) Wissen über einen Realitätsbereich erwerben kann. Computersimulierte «Mikrowelten» aus dem Gegenstandsbereich der Physik werden etwa von der Freiburger Arbeitsgruppe

verwendet (vgl. Plötzner, Spada, Stumpf & Opwis, 1990). Dabei haben die Probanden (Pbn) auf dem Bildschirm die Möglichkeit zur Durchführung von kontrollierten Experimenten über die Physik elastischer Stoßvorgänge, indem bestimmte Stoßkräfte, Winkel, etc. manipuliert werden können, deren Auswirkungen dann gezeigt werden.

(2) Studien zur *Wissensanwendung*. Pbn werden mit bestimmten Szenarien konfrontiert, mit denen sie sofort nach einem wie auch immer festgelegten Kriterium unter Verwendung ihres Weltwissens handelnd umgehen müssen. Als Beispiel hierfür können Arbeiten aus dem Bereich des «komplexen Problemlösens» angesehen werden, bei denen Pbn in vielfältige Rollen schlüpfen müssen (z. B. in die des Bürgermeisters von «Lohhausen»; Dörner, Kreuzig, Reither & Stäudel, 1983).

(3) Studien mit einer *Kombination von Wissenserwerb und -anwendung*. Studien in diesem Bereich arbeiten zweiphasig: In einer ersten Phase (Exploration und Identifikation) wird

Gelegenheit zu aktivem Wissenserwerb gegeben, in einer darauf folgenden zweiten Phase (Kontrolle) soll das erworbene Wissen zielführend eingesetzt werden. Als Beispiel hierfür kann die Arbeit von Funke (1985) angesehen werden, wo Pbn in vier Durchgängen zunächst Wissen erwerben können, indem sie die Kausalstruktur eines kleinen «Ökosystems» explorieren, ehe sie dann in einem abschließenden fünften Durchgang ihr erworbenes Wissen anwenden sollen, um einen vom Versuchsleiter definierten stabilen Zielzustand herbeizuführen.

Natürlich gibt es daneben Arbeiten, die mit *realen* anstatt simulierten Objekten arbeiten. Als Beispiel hierfür kann etwa die Untersuchung von Klahr und Dunbar (1988) dienen, in denen Pbn die Funktion einer bestimmten Bedienungstaste an einem realen Spielzeugpanzer erkunden sollten. Dies dürfte jedoch nach unserer Ansicht von geringerer Bedeutung sein als etwa der *Realitätsbezug* der verwendeten Systeme (zum Konzept der «simulation fidelity» siehe Hays & Singer, 1989, die physikalische und funktionale Abbildungen unterscheiden). So ist die Bedienung des real existierenden Spielzeugpanzers über eine Taschenrechner-Oberfläche alles andere als realistisch, während die simulierte Mikrowelt «Scheibenbillard» sehr nahe an physikalische Gegebenheiten heranführt.

Ein weiterer, vom Versuchsmaterial unabhängiger Faktor soll der Vollständigkeit halber erwähnt werden, auch wenn wir im folgenden nicht näher darauf eingehen: das Ausmaß an Vorwissen bzw. Expertise, das Pbn über den simulierten Realitätsbereich bereits vor Untersuchungsbeginn besitzen. Dies ist insofern von Bedeutung, als Untersuchungen mit dem Schwerpunkt «Wissensanwendung»<sup>1</sup> häufig dieses vorhandene und zur Lösung/Bearbeitung notwendige Wissen nicht erfaßt haben. Hinsichtlich der Akzentsetzung «Wissenserwerb» ist auffällig, daß dieser vor allem bei Novizen für den jeweiligen Gegenstandsbereich untersucht wurde; wie sich *Wissenserwerb* bei Experten darstellt, ist dagegen

<sup>1</sup> Hierzu zählen im übrigen viele klassische Problemlösungssituationen sowohl von Gestaltpsychologen («Bestrahlungproblem» von Duncker) wie auch von Assoziationalisten («Anagramme»).

selten (z. B. Frensch & Sternberg, 1989) erforscht worden.

Wir werden im folgenden ein Untersuchungsparadigma vorstellen, das u. E. für die Analyse von Problemlösungsprozessen oder etwas allgemeiner von Wissenserwerbs- und Wissensanwendungsprozessen bei diskreten Systemen gut geeignet ist. Der Wert dieses Paradigmas ist – in Analogie zu dem von uns präsentierten DYNAMIS-System für kontinuierliche Variablen (vgl. Funke, 1990) – darin zu sehen, daß nicht ein einzelnes System vorgestellt wird, sondern ein Rahmen für eine ganze *Klasse* von Problemstellungen angeboten wird. Zunächst werden wir daher den formalen Rahmen angeben, in dem wir uns bewegen, dann werden wir kognitionspsychologische Implikationen aufzeigen, eine Bewertung vornehmen sowie weitere Perspektiven aufzeigen.

## 2. Formaler Rahmen

Der formale Bezugsrahmen, den wir hier heranziehen, ist die kybernetische Theorie finiter Automaten (vgl. Albert & Ottmann, 1983; Ashby, 1974; Homuth, 1977; Hopcroft & Ullmann, 1979; Salomaa, 1985; Starke, 1969). Innerhalb dieses Rahmens kann jedes System definiert und beschrieben werden durch eine Transformationsfunktion, die für einen gegebenen Systemzustand die möglichen Zustandsübergänge sowie die entsprechenden Ein- und Ausgabebeispiele angibt. Wir beschränken uns bei der folgenden Darstellung auf den Fall *deterministischer* endlicher Automaten.

Ein deterministischer endlicher Automat ist nach Starke (1969, p. 22) definiert durch fünf Komponenten, nämlich drei Mengen und zwei Funktionen:

- (1) eine endliche Menge  $X$  von *Eingabesignalen* (das Eingabe-Alphabet),
- (2) eine endliche Menge  $Y$  von *Ausgabesignalen* (das Ausgabe-Alphabet),
- (3) eine endliche Menge  $S$  von *Zuständen*,
- (4) eine *Übergangsfunktion*  $\delta$ , die eine Abbildung von  $S \times X$  auf  $S$  darstellt und die den Folgezustand als Konsequenz des eingegebenen Zeichens bestimmt, und
- (5) eine *Ergebnisfunktion*  $\lambda$ , die eine Abbildung von  $S \times X$  auf  $Y$  darstellt und die das Ausga-

bezeichnen des Systems als Konsequenz des eingegebenen Zeichens und des Systemzustands festlegt.

Ein derartiger Automat  $A = [X, Y, S, \delta, \lambda]$  wird deterministischer *Mealy-Automat* genannt. Es wird dabei angenommen, daß dieses System auf einer diskreten Zeitachse arbeitet, die im Normalfall durch positive ganze Zahlen repräsentiert wird. Zu jedem Zeitpunkt befindet sich das System in einem bestimmten Zustand, in dem es genau eines aus einer finiten Menge von Eingabezeichen entgegennimmt und genau eines aus einer ebenfalls finiten Menge von Ausgabezeichen produziert. Die Ausgabe ist hier mit der spezifischen Transition von einem Zustand in einen Folgezustand verknüpft. Dementsprechend ändert sich dann im nächsten «Takt» (falls erforderlich) der Systemzustand.

Wenn dagegen das Ausgabezeichen  $y \in Y$  nur vom neuen Zustand abhängt und keine direkte Funktion des vorangegangenen Zustands  $s \in S$  und des Eingabezeichens  $x \in X$  darstellt, hat man den speziellen Fall eines deterministischen *Moore-Automaten* vor sich. Hier tritt eine Markierfunktion  $\mu$  (eine Abbildung von  $S$  auf  $Y$ ) an die Stelle der Ergebnisfunktion  $\lambda$ . Die Ausgabe ist mit dem neuen Zustand verknüpft. Abbildung 1 macht den Unterschied zwischen Mealy- und Moore-Automat an einem kleinen Beispiel deutlich.

Wie Abbildung 1 veranschaulicht, ist der Mealy-Automat insofern «informativer», als er bei gleichem Zustand zusätzlich zum Moore-Automaten durch sein Ausgabezeichen anzeigen kann, aus welchem vorherigen Zustand man in den jetzigen Zustand kam. Während im gezeigten Beispiel der Zustand S2 beim Moore-Automaten durch das Ausgabezeichen B repräsentiert wird,

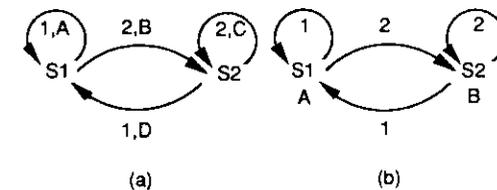


Abbildung 1: Unterschied zwischen (a) einem Mealy- und (b) einem Moore-Automaten. S1 und S2 repräsentieren zwei Zustände, die Ziffern 1 und 2 stehen für die Eingabezeichen, die Buchstaben A bis D sind Ausgabezeichen.

kann der Mealy-Automat für diesen Zustand unterscheiden, ob man vorher in S1 war (Ausgabe B) oder in S2 (Ausgabe C). Die konzeptuelle Unterscheidung zwischen den beiden Typen von Automaten ist hier insofern von Bedeutung, als sie bestimmt, wieviel und welche Art von Information etwa einem explorierenden Pbn in einer entsprechenden dynamischen Lernumgebung («task environment») zur Verfügung steht.

Abbildung 1 verdeutlicht ebenfalls, daß jeder deterministische Automat eindeutig als gerichteter *Graph* dargestellt werden kann, der aus einer Menge von Knoten («Zuständen») und Relationen zwischen diesen Knoten («Zustandsübergängen») besteht. Sofern ein Automat nicht zu viele Eingabe- und Ausgabezeichen oder zu viele Zustände besitzt, ist der gerichtete Graph eine alternative Darstellungsform zur *Matrixdarstellung*. Die Graphentheorie liefert beispielsweise weitere (deskriptive) Konzepte zur Beschreibung von Automaten mit verschiedenen Formen von Konnektivität, Verletzbarkeit von Relationen («arc vulnerability») sowie unterschiedlichen Stabilitätsformen (vgl. Roberts, 1976). Eine andere Variante zur Beschreibung finiter Automaten sind *Bäume* («trees»), d. h. geordnete Graphen mit einem Wurzelknoten, von dem verschiedene Folgeknoten ausgehen. Die «Blätter» eines derartigen Baums repräsentieren die erzeugten Ausgaben des Systems. Die sich verzweigenden Äste stellen die möglichen nächsten Zustände dar und erlauben so auf deskriptiver Ebene eine Abschätzung der Entscheidungsstruktur, mit der ein Pb konfrontiert wird. Neben der rein tabellarischen Darstellung von Automaten sind somit Veranschaulichungsalternativen in Form von gerichteten Graphen oder Bäumen vor allem deswegen interessant, weil sie (für den Konstrukteur) jeweils spezifische formale Eigenschaften der Lernumgebung besonders hervorheben.

Ein einfaches Anwendungsbeispiel soll die Terminologie verdeutlichen. Wir wählen dazu einen stark vereinfachten Fahrkarten-Automaten, der die in Tabelle 1 gezeigten Interventionen und Systemzustände kennt und auf die durch Tabelle 2 spezifizierte Art operiert.

Wie man aus Tabelle 1 entnehmen kann, bestehen mögliche Interventionen des Benutzers im Einwerfen je einer von zwei unterschiedlichen Münzen (I1 und I2), im Anfordern der Fahrkarte (I3) oder im Betätigen einer Geldausgabe-Taste

Tabelle 1: Interventionsmöglichkeiten und Systemzustände des Fahrkarten-Automaten.

Intervention des Benutzers	Systemzustand
I1 = Einwurf einer Münze mit Wert 1	S0 = enthält keine Münze S1 = enthält Münze mit Wert 1
I2 = Einwurf einer Münze mit Wert 2	S2 = enthält Münzen mit Wert 2
I3 = Fahrkartenausgabe	S3 = enthält zuviele Münzen
I4 = Geldausgabe	SE = Kartenausgabe (Erfolg), «Reset» auf S0

Tabelle 2: Transitionsmatrix des Fahrkarten-Automaten.

Systemzustand	Intervention des Benutzers			
	I1	I2	I3	I4†
S0	S1	S2	S0	S0
S1	S2	S3	S1	S0
S2	S3	S3	SE	S0
S3	S3	S3	S3	S0
SE	S0	S0	S0	S0

† Vereinfachend wird angenommen, daß bei eingeworfenen Münzen die Intervention I4 nicht nur zum Ausgangszustand zurückführt, sondern auch gleichzeitig die eingeworfenen Münzen wieder auswirft.

(I4). Die möglichen Systemzustände dieses Automaten unterscheiden verschiedene Mengen eingeworfener Münzen (S0 bis S3) sowie den Erfolgzustand «Fahrkartenausgabe» (SE). Die zustandsabhängigen Effekte der verschiedenen Interventionen enthält Tabelle 2 in Form der objektiven Zustandsübergangsmatrix (Transitionsmatrix). Hieraus ist z. B. abzulesen, daß es genau eine «Erfolgswelle» gibt: nur wer sich im Zustand S2 befindet (d. h. Münzen im Wert 2 eingeworfen hat) und dann mit I3 die Ticket-Ausgabe bestellt, erhält die gewünschte Fahrkarte.

Die in Tabelle 2 gewählte matrixförmige Darstellung des Fahrkarten-Automaten kann natürlich auch graphenförmig vorgenommen werden, wie Abbildung 2 veranschaulicht.

Hieraus kann zum Beispiel auf einfache Weise abgelesen werden, daß der kürzeste Weg vom angenommenen Ausgangszustand S0 zum Zielzustand SE über den Zwischenzustand S2 führt.

Eine wesentliche Erweiterung erfährt das bisher vorgestellte Konzept durch die Einführung zeitabhängiger Transitionen zusätzlich zu den benutzerabhängigen Zustandsübergängen. Hierzu können in der Transitionsmatrix (vgl. Tab. 2) zwei weitere Spalten eingerichtet werden, in denen eine «Wartezeit» sowie ein nach deren

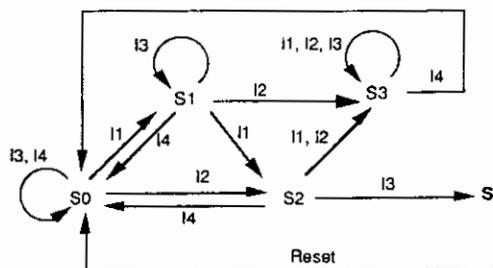


Abbildung 2: Grafische Repräsentation des einfachen Fahrkarten-Automaten aus Tabelle 2. S0 bis SE sind die fünf verschiedenen Systemzustände, I1 bis I4 die vier verschiedenen Interventionen.

Überschreiten einzustellender Folgezustand angegeben werden. Für das Fahrkartenbeispiel könnte dies z. B. bedeuten: wenn innerhalb von fünf Sekunden keine Intervention erfolgt, wird grundsätzlich in den Ausgangszustand zurückgegangen. Mit dieser Erweiterung kann man somit dynamische diskrete Systeme erzeugen und formal präzise beschreiben.

### 3. Kognitionspsychologische Aspekte

Das hier präsentierte Paradigma finiter Automaten hat mehrere kognitionspsychologisch relevante Aspekte, auf die im folgenden genauer eingegangen werden soll:

- (1) Es wird eine formale Beschreibung einer ganzen Klasse von Problemstellungen möglich. Damit ist zugleich die Möglichkeit zu einer gezielten Konstruktion von Problemstellungen mit bekannten Eigenschaften gegeben, ohne daß die Komplexität der Problemstellung gering sein muß.
- (2) Die formale Beschreibbarkeit erlaubt Annahmen über die zur Lösung erforderliche subjektive Repräsentation unter einer gegebenen Problemstellung.
- (3) Aus der formalen Struktur der Problemstellung sind diagnostische Zugänge zum erworbenen Wissen in systematischer Weise ableitbar.
- (4) Hinsichtlich des Prozeß-Aspekts läßt sich dieses Paradigma wegen seines sequentiellen Charakters gut mit klassischen Theorien zum Paarassoziationslernen, mit Hypothesentest-

Modellen bzw. mit neueren Theorien des induktiven Lernens (z. B. Holland, Holyoak, Nisbett & Thagard, 1986) in Verbindung bringen.

- (5) Die Nähe dieses Aufgabentyps zu alltäglichen Situationen (z. B. technische Geräte, Computerprogramme) könnte unter Validitätsaspekten von Interesse sein.

- (1) *Beliebige Konstruktion und formale Beschreibbarkeit.* Dieser Aspekt ist insofern von Bedeutung, als zwar die gezielte Manipulation von Eigenschaften der Problemstellungen zu den primären und damit eigentlich selbstverständlichen Erfordernissen einer experimentell orientierten Denkpsychologie zählt, dies jedoch gerade im Bereich des «Komplexen Problemlösens» häufig genug unterlassen wurde. Statt dessen werden bunte Sammlungen verschiedener Simulationsprogramme nebeneinandergestellt, deren Vergleichbarkeit mangels entsprechender formaler Kriterien nicht möglich ist und deren gezielte Manipulation wegen der unsystematischen Konstruktionsweise ausscheidet. Wir halten dies für einen Mangel bisheriger Forschung. Es gibt allerdings auch Stimmen, die eine Untersuchung von Effekten formaler Problemeigenschaften ablehnen mit dem Hinweis darauf, Pbn würden derartige Feinheiten nicht wahrnehmen (Strohschneider, 1991; dagegen: Funke, 1991a).

Die systematische Variation bzw. Kontrolle von formalen Eigenschaften des «Reizmaterials» schützt u. E. zum einen vor «lokalen» Effekten, die sich aus den Besonderheiten einer ganz spezifischen Problemkonstruktion erklären könnten (z. B. wenn beobachtete Regulationsdefizite in einem komplexen System hauptsächlich von einer zentralen, nichtlinearen Funktion abhängen), zum anderen lassen sich eben diese Eigenschaften in ihrem Stellenwert für den Wissenserwerbsprozeß präziser einschätzen (vgl. die Beschreibung dieses Vorgehens für kontinuierliche dynamische Systeme bei Funke, 1990; Hübner, 1989). Natürlich darf sich eine experimentelle Denkpsychologie nicht mit der Variation formaler Eigenschaften von Problemstellungen erschöpfen. Die formalen Beschreibungsdimensionen liefern aber eine erste Folie, vor deren Hintergrund psychologisch interessante Effekte (z. B. Unterschiede hinsichtlich des Umfangs erworbenen Wissens oder hinsichtlich der Kontrollper-

formanz; Dissoziationen zwischen Wissen und Können) interpretiert werden können.

Um ein konkretes Beispiel zu nennen: Ein von McCabe (1976) vorgeschlagenes Komplexitätsmaß eignet sich u. E. recht gut zur globalen Charakterisierung verschiedener Automaten. Dabei wird die Größe und Vernetzungsstruktur gleichzeitig betrachtet. Bei einem Graphen  $G$  mit  $n$  Zuständen,  $e$  Kanten und  $p$  verbundenen Komponenten bestimmt sich das Maß  $\nu$  (die «cyclomatic number») nach McCabe (1976) wie folgt:

$$\nu(G) = e - n + 2 * p \quad (1)$$

Bezogen auf den Graphen unseres Beispielautomaten aus Abbildung 2 haben wir es mit  $n = 5$  Zuständen (= Knoten) und insgesamt  $e = 13$  Kanten (= Pfeilen) zu tun. Der Wert  $p$  für verbundene Komponenten ist nur dann von eins verschieden, wenn mehrere hierarchisch verschachtelte Automaten vorliegen (wenn z. B. aus einem Automaten in einen anderen Automaten gewechselt werden könnte). Im Fall von Computerprogrammen, deren Komplexität dieses vorgestellte Maß ebenfalls abbilden soll, entspricht dies dem Vorliegen von Subroutinen und führt zu höheren  $p$ -Werten. Damit beschäftigen wir uns hier zunächst nicht, so daß gilt:  $p = 1$ . Für unser Beispiel ist somit  $\nu(G) = 13 - 5 + 2 * 1 = 10$ . Hinsichtlich dieses Maßes lassen sich nun ordinale Vergleiche mit anderen diskreten Lernumgebungen vornehmen.

(2) *Repräsentationsannahmen.* Ausgangspunkt unserer Überlegungen ist eine idealisierte Lernsituation, in der ein Pbn Wissen über einen zuvor unbekanntem Automaten erwirbt. Dabei entwickelt er eine Repräsentation des Automaten, die sich als «subjektive Transitionsmatrix» (STM) darstellen läßt. Diese kann von der «objektiven Transitionsmatrix» (OTM) mehr oder weniger abweichen (Unvollständigkeit bzw. Falschheit). Diese Repräsentation basiert – so unsere Annahme – zunächst auf individuellen Transitionen, die als Paarassoziationen von Systemzuständen, Interventionen und Folgezuständen als den grundlegenden Elementen eines Zustandsübergangs im diskreten Raum konzipiert werden können. Auf diese Assoziationen kann der Untersucher mittels direkter wie indirekter Testverfahren zugreifen, ohne daß damit die Existenz eines separaten expliziten und impliziten Gedächtnissystems unterstellt wird (vgl. Ri-

chardson-Klavehn & Bjork, 1988). Abbildung 3 zeigt die Elemente von Zustandsübergängen, zwischen denen Assoziationen gestiftet werden können. In Anlehnung an klassische Modelle zum Paarassoziationslernen und der damit verbundenen Transferforschung (vgl. Martin, 1965, sowie die Vorläuferarbeit von Osgood, 1949) wird dabei zwischen Vorwärts- und Rückwärtsassoziationen unterschieden.

Vorausgesetzt wird, daß Pbn einen Automaten bearbeiten, bei dem aus einem gegebenen Zustand  $S_i$  mittels einer Intervention  $I_i$  ein neuer Zustand  $S_{i+1}$  erzeugt wird. Derartige Transitionen sind das «Rohmaterial», aus dem die OTM zusammengesetzt ist. Folglich liegt es nahe, ein subjektives Äquivalent dieser elementaren Einheiten zu konzipieren. Die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten zwischen den Elementen sind durch die jeweiligen Assoziationen beschrieben. Generell sollten wegen des sequentiellen Charakters von Automaten die Vorwärtsassoziationen stärker sein als die Rückwärtsassoziationen; aber auch letztere haben ihren Stellenwert in bestimmten Situationen (siehe weiter unten, «retrognostische Fragen»).

Welche Assoziationen wie stark ausfallen, hängt u. a. von den jeweiligen Vorgehensweisen ab: Ein kochbuchartiges Vorgehen etwa baut wesentlich auf verkettete Assoziationen vom Typ  $F_4$ , wobei die resultierenden Zwischenzustände nicht interessieren. Ein explorierendes Vorgehen wird zunächst  $F_2$  ausbilden, wie nämlich eine bestimmte Intervention Folgezustände bewirkt. Aber auch Kombinationen einzelner Assoziationen sind in bestimmten Situationen erforderlich: so z. B. die Kombination von  $F_2$  und  $F_3$ , wenn auf der Basis des gegenwärtigen Zustands und

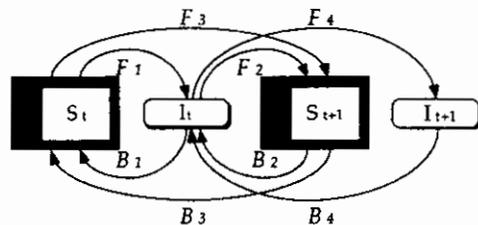


Abbildung 3: Mögliche Vorwärts- (F) und Rückwärts-Assoziationen (B) zwischen den elementaren Bestandteilen finiter Automaten in Form von Zuständen (S) und Interventionen (I).

der festgelegten Intervention eine Zustandsvorhersage gemacht werden soll.

Ähnlich wie beim Paarassoziationslernen können auch beim Umgang mit Automaten spezifische Interferenzen in Transfersituationen entstehen. Betrachtet man beispielsweise die Situation, in der Assoziationen von Typ  $F_2$  und  $F_3$  zwischen einem Zustand  $S_i$  und einer Intervention  $I_i$  einerseits sowie einem Folgezustand  $S_{i+1}$  andererseits gebildet wurden, so wird klar, daß die entsprechenden Assoziationen zu Interferenzen führen sollten, sobald sich der Folgezustand ändert. Diese Situation ist analog zum AB-AD-Paradigma beim Paarassoziationslernen zu sehen (vgl. Martin, 1965) und kann etwa dann eintreten, wenn sich der Automat in einem anderen als dem ursprünglichen Modus befindet und sich in diesem Modus die Transitionen geändert haben. Alternativ kann man sich auch vorstellen, daß entsprechende Interferenzen zwischen Automaten in Erscheinung treten, wenn diese zwar korrespondierende Interventionen zulassen, aber eine veränderte OTM aufweisen.

Alternativ zur «assoziationistischen» Terminologie bietet sich natürlich an, ein oder mehrere vorgegebene Elemente eines Zustandsübergangs als «cue» bzw. als «compound cues» zum Abruf des erfragten Elementes zu betrachten und damit eine Brücke zu modernen Gedächtnis- bzw. Abrufmodellen zu schlagen (z. B. Gillund & Shiffrin, 1984; Ratcliff & McKoon, 1988). An den zugrundeliegenden Mechanismen ändert dies jedoch nichts.

Die Nähe zur modernen Gedächtnispsychologie ergibt sich im übrigen auch daraus, daß der vorgestellte Formalismus mit Produktionssystemen bzw. «classifery systems» gut verträglich ist. Zu jedem finiten Automaten kann direkt ein korrespondierender Satz an Produktionsregeln konstruiert werden (allerdings nicht umgekehrt).

(3) *Diagnostische Aspekte.* Zentrales diagnostisches Anliegen ist die Identifikation der eben beschriebenen STM. Von den vier bei Kluwe (1988) beschriebenen diagnostischen Zugängen zum individuellen Wissen (lautes Denken, Befragen, kategorisieren lassen, reproduzieren lassen - es handelt sich in allen Fällen um direkte Prüfverfahren) beschränken wir uns hier auf die Methode des Befragens. Weitere diagnostische Möglichkeiten auf Verhaltensebene werden im näch-

sten Abschnitt «Prozeß-Aspekte» erörtert. Zur Diagnostik einer STM können prinzipiell folgende Arten von Fragen gestellt werden:

- (1) «Prognostische Fragen», bei denen ein Zustand  $S_i$  und eine Intervention  $I_i$  vorgegeben werden und der resultierende Zustand  $S_{i+1}$  gesucht ist. Hier sind Assoziationen vom Typ  $F_2$  und  $F_3$  verlangt.
- (2) «Interpolationsfragen», bei denen Zustand  $S_i$  und  $S_{i+1}$  gegeben sind und diejenige Intervention  $I_i$  erfragt wird, die den genannten Zustandsübergang erzeugt. Hier sind Assoziationen vom Typ  $F_1$  und  $B_2$  verlangt.
- (3) «Retrognostische Fragen», bei denen aus einer Intervention  $I_i$  und dem resultierenden Zustand  $S_i$  auf den zugrundeliegenden Ausgangszustand  $S_i$  geschlossen werden muß. Hier sind Assoziationen vom Typ  $B_1$  und  $B_3$  verlangt.

Als Beispiel für eine prognostische Frage könnte etwa vorgegeben werden: Der Fahrkarten-Automat enthält keine Münze (=  $S_0$ ); eine Münze mit Wert 1 wurde eingeworfen (=  $I_1$ ) - welcher Folgezustand resultiert?

Während Fragen vom Typ (1) eindeutige Antworten besitzen, ist bei Fragen vom Typ (2) und (3) je nach Automat eine Menge äquivalenter Antworten möglich. Hier kann sowohl nach einer Intervention bzw. einem Zustand aus der Menge der richtigen Lösungen als auch nach der gesamten Klasse möglicher Interventionen bzw. Zustände gefragt werden.

Untersuchungstechnisch können die dargestellten Fragetypen präsentiert werden als «Konstruktionsitems» oder als «Rekognitionsitems». Bei Konstruktionsitems werden dem Pb zwei der jeweils drei Bestimmungsstücke einer Transition vorgelegt mit der Aufforderung, das fehlende Element anzugeben. Dieses Verfahren könnte bei bestimmten Vorgabetechniken auch als geförderte Rekognition («cued recognition») bezeichnet werden, wenn z. B. der Pb die fehlenden Teile der Transition aus einer vorgegebenen Liste auswählen kann. Bei Rekognitionsitems wird ein bestimmtes Tripel aus altem Zustand, Intervention und Folgezustand vorgelegt mit der Bitte, so rasch wie möglich zu beurteilen, ob eine derartige Transition in dem bearbeiteten Automaten vorkommt oder nicht. Neben der Korrektheit der

Antwort läßt sich hierbei natürlich auch die Verifikationszeit erfassen und damit eine in der Gedächtnispsychologie gut bewährte Methode im Kontext des «Komplexen Problemlösens» verwenden.

Während die eben beschriebenen «Items» sich zunächst auf einzelne Wissens-elemente beziehen und damit Bestandteil einer explizit orientierten Wissensdiagnostik sind, richtet sich eine andere Art von Aufgabenstellung eher auf den Handlungsaspekt. Zu diesem Zweck wird Pbn von bestimmten Startzuständen ausgehend die Erreichung bestimmter vorgegebener Zielzustände abverlangt. Die dabei eingeschlagenen Wege und Weglängen bieten qualitative wie quantitative Hinweise auf die Fähigkeit von Pbn, mit dem fraglichen Automaten kontrolliert handelnd umzugehen. Hier erweist es sich als großer Vorteil, daß für diese Problemstellungen stets ein *optimales Performanzkriterium* vorliegt. Für zwei beliebige Zustände eines Automaten kann unmittelbar angegeben werden, ob bzw. in wieviel Schritten minimal von einem zum anderen Zustand gewechselt werden kann.

(4) *Prozeß-Aspekte.* Ein nicht unwichtiger Aspekt dieses Paradigmas ist der sequentielle Bearbeitungsstil, der bei freier Exploration durch einen Pb in gewisser Hinsicht dem Selektionsparadigma beim Begriffsfinden ähnelt. Im Unterschied zu diesem geht es jedoch nicht um eine Regel, sondern um ein Regelsystem. Entsprechend fällt die Rückmeldung differenzierter aus: Es gibt nicht mehr richtige oder falsche Beispiele, sondern unterschiedliche Reaktionen des Automaten auf verschiedenartige Eingaben. Dies schließt die Möglichkeit nicht aus, daß durch Klassenbildung ganze Teilbereiche von Zustandsübergängen komprimiert werden können (im einfachsten Fall z. B. bei einer Interventionsmöglichkeit, die als «An/Aus-Schalter» oder «Reset»-Taste bezeichnet werden kann; vgl. Intervention  $I_4$  in Tab. 2).

Neben einer Systempräsentation in Form des Selektionsparadigmas ist aber auch eine Darbietung im Sinne des *Rezeptionsparadigmas* möglich. Dabei beobachtet der Pb lediglich das Automatenverhalten, das ihm der V1 vorgibt (vgl. die Beobachtungsbedingung im Experiment mit dem kontinuierlichen SINUS-System von Funke & Müller, 1988). Auf diese Weise steht die aufge-

nommene Information stärker unter Kontrolle des VI und ist damit dem klassischen seriellen Lernen direkt vergleichbar. Derartige Lernbedingungen sind keineswegs völlig unrealistisch, wenn man sich etwa Systeme mit gefährlichen Konsequenzen vorstellt, an denen die Möglichkeit zum Lernen durch freie Exploration nicht gegeben ist (z. B. chemische Reaktionen, elektrische Schaltungen).

Bestimmte Arten der Informationsreduktion bei seriellen Lernaufgaben sind z. B. von Restle (1970) beschrieben worden. Für bestimmte Muster – «runs» wie 2-3-4-5 oder «trills» wie 5-4-5-4 – postuliert er die Bildung von Untereinheiten auf der Basis der Elementarereignisse. Operationen wie Transposition, Wiederholung oder Spiegelung dienen dazu, die serielle Struktur einer Ereignisabfolge ökonomisch zu beschreiben. Vorhergesagt werden von Restle je nach strukturellen Eigenschaften der Folge die Fehlerhäufigkeiten an bestimmten Stellen sowie trainingsabhängig unterschiedliche Strukturierungsformen. Gehäufte Fehler an derartigen Unsicherheitsstellen assoziativer Ordnungsbildung konnten empirisch z. B. von Huybrechts (1977) demonstriert werden. Neben Fehlerhäufigkeiten kommen auch Aspekte erhöhten Zeitbedarfs an derartigen Stellen als abhängige Variablen in Betracht.

Analoge Formen der Informationsreduktion sind auch beim lernenden Umgang mit Automaten zu erwarten, bei denen Pbn die Sequenz der Ereignisse selbst beeinflussen können. Beim Bedienen eines Automaten werden Pbn «Routinen» ausbilden, unter deren Einsatz sie das System verlässlich von einem Zustand in einen mehrere Interventionen entfernten Folgezustand bringen können. Dies kann als die Herausbildung von «horizontalen Chunks» von seriellen Transitionen bezeichnet werden. Beispielsweise kann eine Sequenz von häufiger erfahrenen Transitionen  $S_1-I_1-S_{1+1}-I_{1+1}-S_{1+2}-I_{1+2}-S_{1+3}$  zu einem horizontalen Chunk der Form  $S_1-[I_1-I_{1+1}-I_{1+2}]-S_{1+3}$  reduziert werden. Hier bilden alle Interventionen, die zur Transition von  $S_1$  nach  $S_{1+3}$  notwendig sind, eine Einheit, und die dazwischenliegenden Ausgabesignale müssen nicht mehr beachtet werden.

Eine weitere Möglichkeit der Bildung von Chunks besteht darin, Transitionen zu kombinieren, die beispielsweise mit einer spezifischen Intervention oder mit einem spezifischen Zustand

assoziiert sind. Dies kann als Herausbildung von «vertikaler Chunks» von Transitionen bezeichnet werden. Voraussetzung ist, daß ein Zustand oder eine Intervention als eine Quelle von Invarianz derart betrachtet werden kann, daß verbundene Transitionen identifizierbare strukturelle Gemeinsamkeiten aufweisen. Als Alltagsbeispiele hierfür können etwa die mit bestimmten Eingaben verbundenen Funktionen eines Gerätes dienen (im einfachsten Fall: der An/Aus-Schalter) oder die Gruppierung von Systemzuständen zu Notfällen, die bestimmten Anteilen und Konsequenzen gemeinsam haben.

Zum Prozeßaspekt zählt auch die Exploration eines (unbekannten) Automaten. Aus der Art des individuellen Explorationsverhaltens – welche Bereiche der OTM werden wie häufig exploriert und wann erfolgen Bereichswechsel? – lassen sich etwa Hinweise darauf entnehmen, ob ein Pbn eher zur Gruppe der «Theoretiker» oder zu der der «Experimentierer» gerechnet werden kann. Dieser Unterschied wird von Klahr und Dunbar (1988) im Kontext ihrer Untersuchungen zum instruktionslosen Lernen getroffen und beschreibt zwei Gruppen von Pbn, die ihre Strategie der Exploration ändern, entweder aufgrund einer Suche in ihrem Hypothesenraum – «Theoretiker» – oder im Fall der «Experimentierer» als Konsequenz eines bestimmten «Versuchsergebnisses».

(5) *Alltagsnähe.* Viele technische Einrichtungen, die wir im Alltag benutzen, weisen Eigenschaften diskreter Automaten auf: der Texteditor (als Beispiel für fast jede Art von Computerprogramm), der Zigaretten- oder Fahrscheinautomat, der Bankautomat oder der programmierbare Videorecorder – diese Liste ist beliebig verlängerbar und weist darauf hin, daß neben Systemen mit kontinuierlichen Variablen auch solche mit diskreten Größen existieren (und natürlich viele hybride Systeme)<sup>2</sup>. Neben technischen Beispielen ist auch an bestimmte soziale Situationen zu denken, die beschränkte Ein- und Ausgabezei-

<sup>2</sup> Hinsichtlich der Unterscheidung von diskreten und kontinuierlichen Systemen bleibt anzumerken, daß kontinuierliche Systeme häufig diskretisiert in Erscheinung treten (z. B. über Anzeigegeräte mit begrenztem Auflösungsvermögen) bzw. leicht diskretisiert werden können. Kontinuierliche Systeme entziehen sich somit nicht prinzipiell dem hier vorgestellten Ansatz.

chen kennen und daher einer entsprechenden Modellierung zugänglich sein sollten (z. B. Benardes, 1978). Voraussetzung ist, daß ein Zustand oder eine Intervention als eine Quelle von Invarianz derart betrachtet werden kann, daß verbundene Transitionen identifizierbare strukturelle Gemeinsamkeiten aufweisen. Als Alltagsbeispiele hierfür können etwa die mit bestimmten Eingaben verbundenen Funktionen eines Gerätes dienen (im einfachsten Fall: der An/Aus-Schalter) oder die Gruppierung von Systemzuständen zu Notfällen, die bestimmten Anteilen und Konsequenzen gemeinsam haben.

#### 4. Perspektiven

Das Paradigma finiter Automaten läßt sich zwanglos in den Forschungsbereich des «Komplexen Problemlösens» integrieren, da die dort charakteristischen Merkmale wie Komplexität, Konnektivität, Transparenz oder Polytelie vorliegen bzw. versuchsstechnisch verändert werden können. Mit der oben skizzierten Einführung zeitabhängiger, autonomer Zustandsübergänge kann auch die kritische Eigenschaft der Eigendynamik eines Systems in diesem diskreten Rahmen realisiert werden. Schließlich kann der Ansatz durch die Verwendung nicht-deterministischer Automaten ausgebaut werden.

In bislang drei noch unveröffentlichten Experimenten (Buchner, Funke, Nickelowski & Schmitt, 1990, Exp. 1 & 2; Buchner & Funke, 1991) hat sich gezeigt, daß der geschilderte Ansatz – Verwendung finiter Automaten zur Untersuchung von Wissenserwerbs- und Wissensanwendungsprozessen – in mehrerer Hinsicht erfolgreich eingesetzt werden konnte. So lassen sich etwa genügend komplexe dynamische Problemstellungen erzeugen, für deren Bearbeitung sowohl geeignete Performanz- als auch Wissensmaße angebar sind. Diese diagnostischen Zugänge, die auf klassische kognitionspsychologisch erprobte Methoden wie Reaktionszeitmessung (vgl. Posner, 1978) oder Rekognitionsverfahren zurückgreifen, lassen sich je nach theoretischer Fragestellung noch weiterentwickeln und einsetzen. Unter Ausnutzung eines von uns wiederholt gefundenen Sequenzeffekts könnten z. B. in der Rekognitionsaufgabe anstelle einzelner Items ganze Itemsequenzen vorgespielt werden. Weiterhin kann man in einer abschließenden Kontrollphase nicht nur die Aufgabe stellen, einen einzelnen Zielzustand herbeizuführen, sondern auch das Herbeiführen ganz bestimmter Zwischenzustände verlangen.

Wichtig scheint uns auch ein Hinweis auf die Parallelen zwischen finiten Automaten und fini-

ten Grammatiken, wie sie etwa von Reber (1989) und anderen (z. B. Brooks, 1978; Dulaney, Carlson & Dewey, 1984) zur Generierung von Lernmaterial verwendet werden: Finite Automaten reagieren auf die Sprache, die durch entsprechende Grammatiken vorgeschrieben ist: Etwas salopp ausgedrückt führt z. B. nur ein korrekter «Satz» von Eingabezeichen bei einem gegebenen Automaten zum Zielzustand. Während die Automaten die *Spracherkennung* sind, sind die Grammatiken die *Spracherzeuger*.

Die Heranziehung von klassischen Theorien des Paarassoziationslernens als Fundament eines Modells über ablaufender Lernprozesse sehen wir ebenfalls als Stärke unseres Vorgehens an. Derartige Traditionen fruchtbar zu machen muß Ziel einer Forschung sein, die auf den Sockeln ihrer Vorgänger aufbauen möchte. So wird auch mit einem Schlag wieder die Literatur zum seriellen Lernen interessant (vgl. Restle, 1970; Huybrechts, 1977), wenn man die Problemstellung vom Selektions- zum Rezeptionsparadigma hin verändert. Das in diesen alten, gut bewährten Theorien verborgene Potential auf den vorliegenden Gegenstandsbereich anzuwenden scheint uns angesichts eines wiederholt konstatierten Theorienmangels sinnvoll.

Natürlich ist die Idee der Nutzbarmachung des hier vorgestellten formalen Rahmens keineswegs völlig neuartig für die Kognitionspsychologie. So hat etwa Reither (1979) im Rahmen seiner Dissertation einen Problemapparat konstruiert (vgl. auch Dörner, 1976, pp. 133–135), der sich – wie übrigens viele andere denkpsychologische Problemstellungen auch – genau mit diesem Ansatz beschreiben läßt (ebenfalls ideal geeignet: die grünen Schildkröten nach Dörner, 1989). Allerdings sind zum einen die seinerzeit verwendeten diagnostischen Methoden unbefriedigend gewesen, zum anderen wurde ein Potential dieses Ansatzes, die systematische Konstruktion von Problemstellungen sowie die Möglichkeit der Ableitung von Repräsentationsannahmen, noch nicht erkannt. Suppes (1969) hat die Verwendung der Automatentheorie im Sinne eines Rahmenmodells für menschliches Verhalten vorgeschlagen (vgl. auch Ashby, 1954). Diesen Verwendungszweck halten wir zwar für prinzipiell möglich, glauben aber, daß angesichts der Komplexität und Vielbestimmtheit menschlichen Verhaltens dieser formale Rahmen schnell zu Darstellungsproblemen führt.

Bösser und Melchior (im Druck) haben finite Automaten zur Beschreibung von Aufgaben bzw. Geräten herangezogen. Damit soll geprüft werden können, ob und wie eine definierte Aufgabe an einem bestimmten Gerät ausgeführt werden kann. Mittels finiter Automaten können funktionale Prototypen bereitgestellt werden. Dies bietet interessante Möglichkeiten zur Vereinfachung des Designprozesses. Eine andere Anwendung, der wir selbst derzeit nachgehen, besteht im Vergleich der durch ein Manual vermittelten Beschreibung eines Gerätes und seinem tatsächlichen Funktionieren. Ausgehend von der Automatenstruktur sollten sich Hinweise auf die Adäquatheit eines Handbuchs geben lassen. In Verbindung mit den oben geschilderten Repräsentationsannahmen ergeben sich auch Hinweise darauf, wie Interferenzen in der Bedienung minimiert werden können.

Nicht unterschlagen werden sollen Schwachpunkte dieses Paradigmas. In erster Linie zählt hierzu die praktisch gegebene Beschränkung der Größe von Zustandsübergangsmatrizen, die in einem Rechner realisiert werden kann. Auch wenn es mit diesem Ansatz theoretisch möglich ist, beliebig komplexe Automaten zu generieren, stößt man in der Praxis bald an (kernspeicherabhängige) Obergrenzen. Natürlich ist auch die Konstruktion entsprechend umfangreicher Matrizen ein aufwendiges Unterfangen, für das man geeignete Hilfen anbieten muß (z. B. Tabellenkalkulationsprogramme)<sup>3</sup>.

Trotz aller Einschränkungen bleibt festzuhalten, daß die Möglichkeit zur rationalen Konstruktion unterschiedlich komplexer dynamischer Systeme, die nachvollziehbare Herleitung von einfachen wie differenzierten Leistungs- und Wissensmaßen, die Möglichkeit zur Verwendung klassischer gedächtnispsychologischer Meßmethoden, der Einbezug klassischer Theorien zum Paarassoziations- und seriellen Lernen, das Vorliegen optimaler Performanzkriterien und die gegebene Nähe zu realen Problemstellungen Grund genug für eine positive Bewertung dieses Ansatzes liefern. Wir sind davon überzeugt, daß sich

der skizzierte Ansatz in der einschlägigen Forschung fruchtbar und stimulierend auswirkt.

### Literatur

- Albert, J. & Ottmann, T. (1983). *Automaten, Sprachen und Maschinen für Anwender*. Mannheim: B.I.-Verlag.
- Ashby, W. R. (1954). *Design for a brain* (2nd ed.). London: Chapman & Hall.
- Ashby, W. R. (1974). *Einführung in die Kybernetik*. Frankfurt: Suhrkamp.
- Brehmer, B. (1989). Dynamic decision making. In: A. P. Sage (Ed.), *Concise encyclopedia of information processing in systems and organizations* (pp. 144-149). New York: Pergamon Press.
- Brooks, L. (1978). Non-analytic concept formation and memory for instances. In: E. Rosch & B. B. Lloyd (Eds.), *Cognition and categorization* (pp. 169-211). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Bösser, T. & Melchior, E.-M. (in press). The SANE toolkit for cognitive modeling and user centered design. In: M. Galer (Ed.), *Human factors in information technology: From conception to use*. Heidelberg: Springer.
- Buchner, A., Funke, J., Nikelowski, B. & Schmitt, L. (1990). External support systems for a dynamic task environment: Results from two experiments on memory and evaluation aids. *Berichte aus dem Psychologischen Institut der Universität Bonn, Band 16, Heft 5*.
- Buchner, A. & Funke, J. (1991). Transfer of associations in finite state automata. *Berichte aus dem Psychologischen Institut der Universität Bonn, Band 17, Heft 2*.
- Dörner, D. (1976). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Dörner, D. (1989). Die kleinen grünen Schildkröten und die Methoden der experimentellen Psychologie. *Sprache & Kognition, 8, 86-97*.
- Dörner, D., Kreuzig, H. W., Reither, F. & Stäudel, T. (1983). *Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität*. Bern: Huber.
- Dulany, D. E., Carlson, R. A. & Dewey, G. I. (1984). A case of syntactical learning and judgement: How conscious and how abstract? *Journal of Experimental Psychology: General, 113, 541-555*.
- Frensch, P. A. & Sternberg, R. J. (1989). Expertise and intelligent thinking: When is it worse to know better? In: R. J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (pp. 157-188). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Funke, J. (1985). Steuerung dynamischer Systeme durch Aufbau und Anwendung subjektiver Kausalmodelle. *Zeitschrift für Psychologie, 193, 443-465*.
- Funke, J. (1990). Systemmerkmale als Determinanten des Umgangs mit dynamischen Systemen. *Sprache & Kognition, 9, 143-153*.
- Funke, J. (1991a). Keine Struktur im (selbstverursachten) Chaos? Erwiderung zum Kommentar von Stefan Strohschneider. *Sprache & Kognition, 10, 114-118*.
- Funke, J. (1991b). Solving complex problems: Human identification and control of complex systems. In: R. J. Sternberg & P. A. Frensch (Eds.), *Complex problem solving: Principles and mechanisms* (pp. 185-222). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Funke, J. & Müller, H. (1988). Eingreifen und Prognostizieren als Determinanten von Systemidentifikation und Systemsteuerung. *Sprache & Kognition, 7, 176-186*.
- Gillund, G. & Shiffrin, R. (1984). A retrieval model of both recognition and recall. *Psychological Review, 19, 1-65*.

- Hays, R. T. & Singer, M. J. (1989). *Simulation fidelity in training system design. Bridging the gap between reality and training*. New York: Springer.
- Holland, J. H., Holyoak, K. J., Nisbett, R. E. & Thagard, P. R. (1986). *Induction. Processes of inference, learning, and discovery*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Homuth, H. H. (1977). *Einführung in die Automatentheorie für Studenten der Mathematik, Informatik, Natur- und Ingenieurwissenschaften*. Braunschweig: Vieweg.
- Hopcroft, J. E. & Ullmann, S. D. (1979). *Introduction to automata theory, languages, and computation*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Hübner, R. (1989). Methoden zur Analyse und Konstruktion von Aufgaben zur kognitiven Steuerung dynamischer Systeme. *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie, 36, 221-238*.
- Huybrechts, R. (1977). Sequentielles Lernen und gedächtnismäßige Strukturbildungen. Teil I und II. *Zeitschrift für Psychologie, 185, 177-213 und 375-396*.
- Klahr, D. & Dunbar, K. (1988). Dual space search during scientific reasoning. *Cognitive Science, 12, 1-48*.
- Kluwe, R. H. (1988). Methoden der Psychologie zur Gewinnung von Daten über menschliches Wissen. In: H. Mandl & H. Spada (Eds.), *Wissenspsychologie* (pp. 359-385). München: Psychologie Verlags Union.
- Martin, E. (1965). Transfer of verbal paired associates. *Psychological Review, 72, 327-343*.
- McCabe, T. J. (1976). A complexity measure. *IEEE Transactions on Software Engineering, SE-2, 308-320*.
- Osgood, L. E. (1949). The similarity paradox in human learning: A resolution. *Psychological Review, 56, 132-143*.
- Posner, M. I. (1978). *Chronometric explorations of mind*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- Plötzner, R., Spada, H., Stumpf, M. & Opwis, K. (1990). *Learning qualitative and quantitative reasoning in a microworld for elastic impacts*. Freiburg: Psychologisches Institut der Universität, Forschungsbericht Nr. 59.
- Ratcliff, R. & McKoon, G. (1988). A retrieval theory of priming in memory. *Psychological Review, 95, 385-408*.
- Reber, A. S. (1989). Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of Experimental Psychology: General, 118, 219-235*.
- Reither, F. (1979). *Über die Selbstreflexion beim Problemlösen*. Gießen: Fachbereich Psychologie der Justus-Liebig-Universität (Unveröffentlichte Dissertation).
- Restle, F. (1970). Theory of serial pattern learning. *Psychological Review, 77, 481-495*.
- Richardson-Klavehn, A. & Bjork, R. A. (1988). Measures of memory. *Annual Review of Psychology, 39, 475-543*.
- Roberts, F. S. (1976). *Discrete mathematical models. With applications to social, biological, and environmental problems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Salomaa, A. (1985). *Computation and automata*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Starke, P. H. (1969). *Abstrakte Automaten*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Strohschneider, S. (1991). Kein System von Systemen! Kommentar zu dem Aufsatz «Systemmerkmale als Determinanten des Umgangs mit dynamischen Systemen» von Joachim Funke. *Sprache & Kognition, 10, 109-113*.
- Suppes, P. (1969). Stimulus-response theory of finite automata. *Journal of Mathematical Psychology, 6, 327-355*.

J. Funke & A. Ouchner, Psychologisches Institut der Universität Bonn, Römerstr. 164, D-5300 Bonn 1

3 Im Rahmen unserer Arbeiten haben wir ein universelles Konstruktions- und Ablaufsteuerprogramm MacFAUST («Finite automata simulation tool») mit integrierten Diagnostik-Komponenten hergestellt, das den Forscher bzw. Anwender hierbei unterstützt.

Sonderdruck aus

**Sprache**  
*Zeitschrift für Sprach- und Kognitions-  
psychologie und ihre Grenzgebiete*  
**&**  
**Kognition**

Verlag Hans Huber Bern Stuttgart Toronto