

- Wachs, T. D. (1992). *The nature of nurture*. Newbury Park, CA: Sage.
- Wachs, T. D. (1996). Known and potential process underlying developmental trajectories in childhood and adolescence. *Developmental Psychology*, 32, 796–801.
- Weinberg, R. A. (1997). If the nature-nurture war is over, why do we continue to battle? In D. K. DeFries (Ed.), *Current topics in human intelligence: Vol. 5. The environment* (pp. 191–194). Norwood, NJ: Ablex.
- Weingart, P., Kroll, J. & Bayertz, K. (1992). *Race, Brain and Gene. Geschichte der Eugenik und Rassenhygiene in Deutschland*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- Wilson, R. S. (1986). Continuity and change in cognitive ability profile [Special Issue: Multivariate behavioral genetics and development]. *Behavior Genetics*, 16, 45–60.



Neue Verfahren zur Erfassung intelligenten Umgangs mit komplexen und dynamischen Anforderungen*

Joachim Funke

1. Einleitung

Mit den Mitte 1970 aufgekommenen Arbeiten zum so genannten „Komplexen Problemlösen“ ist die Intelligenzdiagnostik einer starken Kritik unterzogen worden. Aufbauend auf den Nullkorrelationen zwischen herkömmlichen Intelligenztests und Leistungsparametern beim Umgang mit computersimulierten Szenarien, wie sie damals etwa Dörner und Kreuzig (1983) oder Putz-Osterloh (1981; vgl. auch Putz-Osterloh & Lüer, 1981) berichteten, wurde erstmals die Behauptung vertreten, bislang nicht gestellte, aber für die Diagnostik der „operativen Intelligenz“ (Dörner, 1986) wichtige Anforderungen realisiert zu haben (zum Begriff der „operativen Intelligenz“ siehe den Beitrag von Weber & Westmeyer, in diesem Band). Zu diesen neuen Anforderungen gehören insbesondere die aktive Informationsbeschaffung über Zustand und Struktur des dynamischen Systems, mit dem man als Versuchsperson (Vp) konfrontiert wird (Aspekt des Wissenserwerbs, *Identifikation* eines Systems), wie auch die Tatsache, dass nicht *einzelne* Urteile oder Entscheidungen zu fällen sind, sondern im Rahmen einer Steuerungsanforderung eine mehrstufige, über einen größeren Zeitraum sich erstreckende Anzahl von zielführenden Entscheidungen zu treffen ist (Aspekt der Wissensanwendung, *Kontrolle* eines Systems).

Auch wenn sich die Anfang der 1980er Jahre aufgestellte Hypothese einer Nullkorrelation zwischen Maßen des Komplexen Problemlösens und Testintelligenz empirisch nicht halten lässt (für einen aktuellen Überblick siehe Süß, 1999 sowie seinen Beitrag in diesem Band), bleibt natürlich auf sachlogischer Ebene zu konstatieren, dass mit der Verwendung computersimulierter Szenarien tatsächlich neue Anforderungen an eine Vp gestellt werden können, die erheblich über das in Intelligenztests Geforderte hinausgehen. Diese sollen nachfolgend genauer beleuchtet werden. Im Anschluss an diese Analyse wird gezeigt, wie mittels zweier

* Ich bedanke mich bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Heidelberger Seminars „Intelligenz und Komplexes Problemlösen“ im Sommersemester 1999 für die konstruktive Diskussion sowie bei den studentischen Reviewern Stefan Fleischer (Berlin), Salah (Berlin) und Carsten Schulz (Heidelberg) für ihre hilfreichen Korrekturhinweise. Jürgen Guthke (Leipzig) und Katrin Dreher (Heidelberg) haben zu einer späteren Manuskriptversion konstruktive Verbesserungsvorschläge gemacht, für die ich danke.

universeller Formalismen Aufgabenstellungen mit diesen Anforderungen konstruiert und wie innerhalb dieser Paradigmen leistungs- wie prozessbezogene Kennwerte bestimmt werden können.

2. Über Merkmale komplexer Probleme

Einer der Hauptgründe für die Beschränktheit der bisherigen Intelligenztests liegt in der Ignoranz der Testautoren gegenüber zwei wichtigen Merkmalen unserer natürlichen Umwelt: Vernetztheit und Dynamik. Beide Eigenschaften sind charakteristisch für beinahe alle lebensweltlich relevanten Strukturen und Prozesse. Es verwundert daher kaum, wenn die in diesem Beitrag als Ergänzung zu klassischen Intelligenzmessverfahren vorgeschlagenen neuen Instrumente genau auf diese beiden Eigenschaften abheben. Da in der Literatur zum Umgang mit komplexen Systemen in der Regel wesentlich mehr Merkmale zur Charakterisierung derartiger Systeme aufgeführt werden (vgl. Dörner u.a., 1983; Frensch & Funke, 1995), ist zunächst einmal die Konzentration auf die zwei genannten Eigenschaften zu begründen.

Bereits in der Frühzeit der Forschung mit komplexen computersimulierten Szenarien wurden folgende fünf Eigenschaften als charakteristisch bezeichnet: (a) Komplexität, (b) Vernetztheit, (c) Dynamik, (d) Intransparenz und (e) Polytelie. Diese Liste ist mehr oder minder unverändert in nachfolgenden Arbeiten übernommen worden, ohne je einer genaueren Prüfung unterzogen worden zu sein. Allenfalls die seinerzeit ausgetragene Kontroverse über eine Taxonomie von Systemen und Anforderungen (vgl. Funke, 1990, 1991; Hussy, 1984, S. 122 f.; Strohschneider, 1991) hat sich mit dieser Frage etwas näher beschäftigt¹.

Bei genauerer Betrachtung dieser Merkmalsliste muss man allerdings zu folgenden drei Schlüssen kommen:

(1) Die Merkmale (a) Komplexität und (b) Vernetztheit sind konzeptuell kaum voneinander zu unterscheiden. Angesichts der unklaren Definition des Komplexitätsbegriffs² schlage ich vor, den operational besser fassbaren Begriff der Vernetztheit zu verwenden. Vernetztheit ist ein charakteristisches Attribut komplexer Systeme. Vernetztheit bedeutet, dass zwei oder mehr Variablen unter-

¹ Zu dieser Kontroverse ist aus heutiger Sicht nachzutragen, dass zumindest die Unterscheidung von Person- und Situationsmerkmalen Konsens findet (vgl. Kersting, 1999, S. 10 f.; Strauß, 1993, S. 29 f.).

² Vielfach – und völlig unzureichend – ist die reine Anzahl beteiligter Variablen als Komplexitätsmaß angeführt worden; zur Kritik dieses Operationalisierungsvorschlags siehe Funke (1984), Kockamp (1999, S. 27), Strauß (1993, S. 38 f.) und Wallach (1998, S. 130).

einander Abhängigkeiten aufweisen. Aus diesem Merkmal resultiert für die Vp die Anforderung, sich über die Struktur des Systems ein Bild zu machen.

- (2) Bei Merkmal (c) Dynamik handelt es sich um das zweite wichtige Bestimmungsstück eines komplexen Systems neben seiner Vernetztheit. Während die Vernetztheit vor allem *strukturelle* Aspekte des Systems charakterisiert, kommt mit Dynamik der *prozessuale* Aspekt eines Systems in Form seiner zeitlichen Charakteristik ins Spiel. Hieraus resultiert die Anforderung an die Vp, sich Gedanken über die zeitliche Entwicklung des Systems zu machen, neben den kurzzeitigen also etwa auch längerfristige Auswirkungen bestimmter Eingriffe zu bedenken.
- (3) Bei den Merkmalen (d) Intransparenz und (e) Polytelie handelt es sich nicht um Merkmale, die einem System inhärent sind, sondern um die Frage, wie das System versuchsleiterseitig einer Vp zugänglich gemacht wird bzw. mit welcher Zielsetzung er oder sie an die Steuerung und Kontrolle des Systems herangesetzt wird. In einer intransparenten Situation werden Struktur und Zustand des Systems nicht völlig offen gelegt, in einer polytelischen Situation wird die Kontrolle des Systems nicht auf eine isolierte Zielvariable beschränkt, sondern auf mehrere gleichzeitig zu steuernde Größen. Ich schlage daher vor, diese beiden Merkmale als unabhängig von dem jeweiligen System zu betrachten, da sie unabhängig von dem gewählten System manipuliert werden können, im Unterschied zu den Merkmalen (b) Vernetztheit und (c) Dynamik, die als zwei zentrale Bestimmungsstücke eines komplexen Systems betrachtet werden dürfen, da sie die systemseitig gegebenen Anforderungen repräsentieren.

Festzuhalten bleibt: Von den fünf als charakteristisch für komplexe Szenarien erachteten Merkmalen bleiben im Wesentlichen zwei Aspekte übrig, die als zentrale systemseitige Merkmale herangezogen werden und die nicht mit „Papier-und-Bleistift“-Techniken realisiert werden können, sondern zu ihrer Realisierung geradezu einen Computereinsatz verlangen: Vernetztheit und Dynamik. Die beiden anderen charakteristischen Anforderungen (Polytelie und Intransparenz), die im Kontext komplexer Mikrowelten besondere Aufmerksamkeit verdienen, können auch unabhängig von computersimulierten Szenarien realisiert werden und sollen hier nicht weiter verfolgt werden, da sie keine prinzipiell neuen Verfahren darstellen.

2.1 Konsequenzen der Beschränkung auf Vernetztheit und Dynamik

Wie müssen Instrumente aussehen, die die beiden Eigenschaften der Vernetztheit und Dynamik abbilden? Die Antwort darauf fällt simpel aus: Diese neuen Instrumente sollten in der Lage sein, unterschiedliche Grade von Vernetztheit und Dy-

namik in einer Aufgabenstellung darzubieten und beide zum Gegenstand der (kognitiven) Aktivität einer Testperson werden zu lassen.

Um genügend Spielraum für die Konstruktion von Testmaterial (im Sinne von Items) zu haben, bietet sich der Rückgriff auf allgemeine formale Prinzipien an. Der Vorteil dieser Abstraktion liegt darin, dass vor dem einheitlichen Hintergrund eines derartigen Formalismus zum einen sich beliebige Schwierigkeitsgrade herstellen lassen, zum anderen auch große Freiheit in der Wahl der Semantik der zu konstruierenden Systeme besteht und zudem eine direkte Vergleichbarkeit verschiedener Systeme, die aus derselben Klasse stammen, gegeben ist. In einem übertragenen Sinn kann hier vom „Ebbinghaus-Ansatz des Komplexen Problemlösens“ gesprochen werden, da der sauberen Konstruktion des Testmaterials besondere Beachtung geschenkt wird, im Unterschied zum „Bartlett-Ansatz“ (z.B. Dörner u.a., 1983), der seinen Schwerpunkt auf die Realitätsnähe der simulierten Szenarien legt.

Die beiden Formalismen, die den eben genannten Erfordernissen genügen und zugleich bezüglich Vernetztheit wie Dynamik die gestellten Ansprüche erfüllen, sind zum einen der *Ansatz linearer Strukturgleichungen* (vgl. Funke, 1985, 1993), zum anderen die *Theorie finiter Automaten* (vgl. Buchner & Funke, 1993; Funke & Buchner, 1992). Beide Ansätze werden zunächst abstrakt vorgestellt, bevor dann die konkreten Anforderungen an die Testperson geschildert werden.

3. Paradigmen

Die beiden Paradigmen „lineare Strukturgleichungen“ und „finite Automaten“ sind generell (nicht nur in diesem Kontext) hilfreich bei der Modellierung von Zusammenhängen zwischen mehreren Variablen und deren Auswirkungen über die Zeit. Während man es bei den linearen Strukturgleichungen mit Variablen zu tun hat, die Intervallskalenniveau aufweisen müssen, sind die finiten Automaten insofern weniger voraussetzungsreich, als sie bei den beteiligten Variablen lediglich Nominalskalenniveau fordern und somit qualitative Aspekte abbilden können, die in diskreten Abstufungen vorkommen (auch Ordinaldaten lassen sich darin abbilden). Ich beginne zunächst mit der Darstellung finiter Automaten und gehe dann auf Strukturgleichungssysteme ein.

3.1 Was ist ein finiter Automat?

Viele alltäglich genutzte technische Systeme wie Fahrkartenautomaten, Video- und Faxgeräte, Fotokameras, Getränkeautomaten oder Parkautomaten, aber auch

Computerbetriebssysteme, Anwendungsprogramme und viele weitere auf den ersten Blick sehr unterschiedlich erscheinende Systeme (z.B. soziale Interaktionen) auf ganz verschiedenen Komplexitätsstufen sind auf einer abstrakteren Ebene durch eine Reihe gemeinsamer Eigenschaften charakterisiert (vgl. Buchner, 1999): Sie nehmen nur eine begrenzte (finite) Anzahl von Zuständen an. Aus einem gegebenen Zustand können sie in einen darauf folgenden Zustand entweder durch eine Benutzereingabe (bei einer Anwendungssoftware etwa durch das Drücken einer Taste) oder durch einen autonomen Prozess gelangen (bei einem Fahrkartenautomaten etwa durch das selbstständige Zurücksetzen in den Ausgangszustand nach einer festgelegten Zeit ohne Münzeinwurf). In Abhängigkeit von Eingabe und erreichtem Zustand wird anschließend normalerweise ein *Ausgabesignal* produziert (z.B. standardisierte Antwort des Finanzamts auf eine Bürgeranfrage während der Bearbeitung von Steuerunterlagen). Solche Systeme lassen sich auf formaler Ebene als finite Automaten darstellen.

Ein deterministischer finiter Automat ist definiert durch eine endliche Menge X von *Eingabesignalen*, eine endliche Menge Z von *Zuständen*, eine endliche Menge Y von *Ausgabesignalen* und durch zwei Funktionen (z.B. Hopcroft & Ullman, 1988, S. 15 f.). Die *Übergangsfunktion* stellt eine Abbildung von $Z \times X$ auf Z dar; sie bestimmt, welchen Zustand der Automat als Konsequenz des in einem bestimmten Zustand eingegebenen Zeichens annimmt. Die *Ergebnisfunktion* stellt eine Abbildung von $Z \times X$ auf Y dar; sie bestimmt, welches Zeichen der Automat als Konsequenz des in einem bestimmten Zustand eingegebenen Zeichens ausgibt. Ein Spezialfall liegt vor, wenn das Ausgabezeichen nur von dem erreichten Zustand, nicht aber von der vorangegangenen Eingabe abhängt. Hier wird die Ergebnisfunktion durch eine *Markierfunktion* ersetzt, die den Zustand mit einem Ausgabesignal verknüpft.

Finite Automaten werden häufig als Zustandsübergangsmatrizen oder als gerichtete Graphen dargestellt. Jede Darstellungsform veranschaulicht bestimmte

Tabelle 1: Zustandsübergangsmatrix eines (fiktiven) finiten Automaten mit drei Zuständen (z_0, z_1 und z_2) und zwei Eingabemöglichkeiten (x_1, x_2). Jedem Zustand ist ein Ausgabezeichen (y_1, y_2, y_3) zugeordnet. Die Matrixzellen geben an, in welchen Zustand der Automat bei Wahl einer Eingabe als Nächstes wechseln wird.

Zustände/Ausgaben	Eingaben	
	x_1	x_2
z_0/y_1	z_1	z_0
z_1/y_2	z_2	z_2
z_2/y_3	z_0	z_2

Eigenschaften des Systems besonders gut (vgl. Buchner & Funke, 1993; Funke & Buchner, 1992). Tabelle 1 enthält zum Beispiel die Zustandsübergangsmatrix eines fiktiven Systems, dessen graphische Repräsentation in Abbildung 1 dargestellt ist.

Es kann sehr nützlich sein, dynamische Systeme als finite Automaten aufzufassen, weil dadurch wichtige Eigenschaften des zu bearbeitenden Problems offenkundig und leicht zugänglich werden. So konnten etwa Funke und Gerdes (1993) durch die Rekonstruktion der in einem Manual erläuterten Zustandsübergänge eines Videorekorders als Übergänge eines finiten Automaten und durch deren Abgleich mit den tatsächlich implementierten Übergängen nicht nur Fehler in der Handanweisung aufdecken, sondern auch eine verbesserte Darstellung der Bedienungslogik darauf gründen. Buchner, Funke und Berry (1995) konnten das dynamische System „sugar factory“ als finiten Automaten rekonstruieren und gelangten dadurch zu einem neuen Verständnis häufig berichteter Dissoziationsphänomene bei diesem System. Berichtet wurde nämlich von Untersuchungen mit der Zuckerfabrik, in denen ein überraschendes Auseinanderklaffen der Leistungen beim Steuern der simulierten Fabrik (= Können, implizit) und bei der nachträglichen Beantwortung von Fragen über deren Funktionsweise (= Wissen, explizit) konstatiert wurde (vgl. Berry & Broadbent, 1984, 1987, 1988): Gute Steuerung ging paradoxerweise mit geringem Wissen über das System einher, hohes Wissen dagegen mit schlechter Steuerung. Diese Dissoziation, die als Beleg für die Existenz zweier verschiedener Lernprozesse und zweier Gedächtnissysteme herangezogen wurde und dadurch theoretisch weit reichende Schlussfolgerungen be-

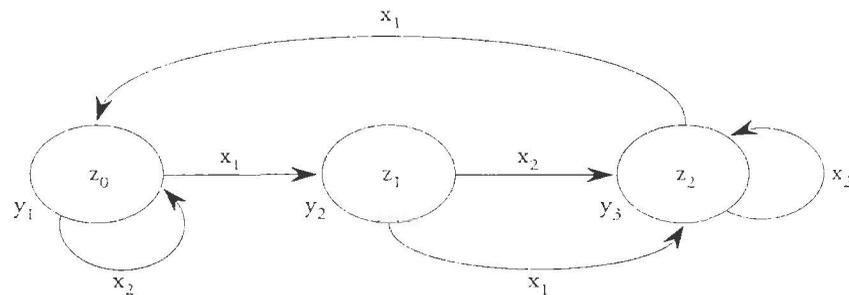


Abbildung 1: Graphische Repräsentation des finiten Automaten aus Tabelle 1 mit drei Zuständen (z_0 , z_1 und z_2) und zwei Eingabemöglichkeiten (x_1 , x_2). Die Ausgabebezeichnungen (y_1 , y_2 , y_3) sind links neben die zugehörigen Zustandsknoten gesetzt.

wirkte, erfuhr durch die Brille der finiten Automaten eine neue, wesentlich einfachere Interpretation: Danach scheint es geradezu zwangsläufig, dass Personen, die das Zuckersystem gut steuern (d.h. sich oft im Zielzustand befinden), dadurch weniger Wissen über andere Zustandsübergänge dieses Automaten erwerben und dann in der anschließenden Befragung schlecht abschneiden (umgekehrt bei denjenigen, die nur selten den Zielzustand erreichen).

Eine Reihe weiterer nützlicher Aspekte dieses Werkzeugs für die Problemlöseforschung (Annahmen über Lernprozesse und die mentale Repräsentation, Methoden der Wissenserfassung, systematische Konstruktion und Beschreibung ganzer Klassen von Systemen) müssen hier nicht ausgebreitet werden, da sie bei Buchner (1999) näher beschrieben sind.

3.2 Dynamische Systeme vor dem Hintergrund linearer Gleichungssysteme

Eine Reihe alltäglicher Aktivitäten (z.B. Radfahren, Autofahren) wie auch Aktivitäten der Arbeitswelt (Anlagensteuerung bei Kraftwerken, Steuern von CAD-Maschinen, Lenken von Fahrzeugen) enthalten Steuer- und Regelungsprozesse, bei denen es vor allem auf die quantitative Abstufung bestimmter Eingriffe ankommt. Nicht nur technische, sondern auch ökologische Systeme machen es erforderlich, zunächst die Funktionsweise des fraglichen Systems oder Systemausschnitts kennen zu lernen, bevor dann zielführend eingegriffen werden kann. Einer der in vielen Wissenschaften erfolgreichen Wege zur Abbildung von Systemen mit quantitativen Variablen und zur Untersuchung von deren Eigenschaften stellt das allgemeine lineare Modell dar (siehe z.B. Werner, 1997).

Wie sieht ein solches lineares Gleichungssystem für einen Problemlöser konkret aus? Typischerweise wird den Vpn als Einführung in die Problemstellung erklärt, dass sie in einem noch unbekanntem System einzelne Variablen (so genannte exogene Variablen) verändern können, die dann andere Variablen (so genannte endogene Variablen) beeinflussen. Die Grundstruktur für ein derartiges einfaches lineares System ist in Abbildung 2 exemplarisch an einem Vier-Variablen-System dargestellt (vgl. Vollmeyer & Funke, 1999).

In Abbildung 2 sind A und B die exogenen Variablen, die auf die endogenen Variablen Y und Z wirken. Die Zahlen an den Pfeilen geben Gewichte an, mit denen die jeweilige exogene auf die endogene Variable wirkt. Formal ist das System durch zwei Gleichungen beschreibbar (für jede endogene Variable wird genau eine Gleichung benötigt), nämlich:

$$Y_{t+1} = 2 \cdot A_t \tag{1}$$

$$Z_{t+1} = 3 \cdot A_t - 2 \cdot B_t + 0,5 \cdot Y_t + 0,9 \cdot Z_t \quad (2)$$

Dabei gibt der tiefer gestellte Index jeder Variablen den jeweiligen Zeitpunkt (t bzw. $t + 1$) des Systems an, der in diskreten Stufen getaktet wird. Aus Gleichung (1) ergibt sich also, dass sich der Wert der Variable Y zum Zeitpunkt $t + 1$ errechnet aus dem Wert der Variable A zum Zeitpunkt t , multipliziert mit 2. Gleichung (2) verdeutlicht, dass die endogene Variable Z zum einen von den beiden exogenen Variablen A und B mit Gewicht 3 bzw. -2 beeinflusst wird, zum anderen zusätzlich von der anderen endogenen Variable Y (Gewicht 0,5) sowie von ihrem eigenen vorangegangenen Zustand abhängt (Gewicht 0,9).

Meistens wird so ein System am Computer dargeboten, wobei durch die Darstellung erkennbar ist, welche Variablen manipuliert werden können. Nicht erkennbar ist, ob und welche exogene Variable welche endogene Variable beeinflusst. In manchen Systemen wirken endogene Variablen auf andere endogene Variablen (so genannte Nebenwirkungen; im Beispielsystem als Wirkung von Y auf Z implementiert, vgl. Abb. 2) oder eine endogene Variable verändert sich konstant, auch wenn das System nicht manipuliert wird (so genannte Eigendynamik; im Beispielsystem als Wirkung von Z auf sich selbst implementiert, vgl. Abb. 2). Durch gezielte Verwendung und Manipulation solcher Systemmerkmale können beliebig komplexe lineare Gleichungssysteme konstruiert werden.

Der Ansatz, menschlichen Umgang mit dynamischen Systemen aus der Perspektive linearer Strukturgleichungssysteme zu betrachten, ist aus denselben

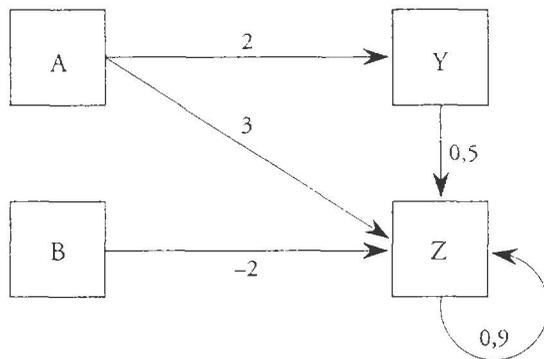


Abbildung 2: Struktur eines einfachen linearen Systems mit zwei Eingangsvariablen A und B sowie zwei Ausgangsvariablen Y und Z , die gemäß der angegebenen gerichteten Kanten (= kausalen Verbindungen zwischen den Variablen) und deren Gewichte untereinander verknüpft sind.

Gründen nützlich, die auch bei der Betrachtung von Systemen als finite Automaten genannt wurden: Erstens legt auch dieser Ansatz bestimmte Annahmen über Lernprozesse und die mentale Repräsentation des erworbenen Systemwissens nahe, zweitens lassen sich daraus Methoden der Wissensdiagnostik ableiten und drittens schließlich erlaubt der formale Ansatz erneut die systematische Konstruktion und Beschreibung ganzer Klassen von Systemen und damit von experimentellen Aufgaben.

4. Anforderungen

Die bisherigen Ausführungen haben uns zunächst einmal mit den beiden Werkzeugen vertraut gemacht. Dabei ist allerdings zunächst noch offen geblieben, inwiefern mit diesen Werkzeugen brauchbare Aufgaben für diagnostische Zwecke konstruiert werden können. Diesem Aspekt werden wir uns nun widmen und zunächst zwei generelle Anforderungen beschreiben, die beim Umgang mit vernetzten und dynamischen Systemen zu bewältigen sind.

Stellen wir uns vor, wir seien in einer fremden Stadt auf dem Bahnhof angekommen und müssten nun mit der Straßenbahn weiterfahren, um unser Ziel zu erreichen. In unserer technologiegetränkten Welt finden wir also einen Fahrkartensystem, den wir in dieser Form noch nie gesehen haben. Was ist zu tun? Im Wesentlichen sind zwei Dinge zu leisten: (1) Man muss herausfinden, wie dieser Automat funktioniert, also zum Beispiel, welche Eingabezeichen (Tasten, Öffnungen für Kreditkarten usw.) er besitzt, welche Ausgabezeichen er für uns bereitstellt (Display, Kartenausgeber usw.); (2) man muss Art und Preis des gewünschten Tickets eruieren (Zielfindung); und (3) muss man (vor dem Hintergrund dieser allgemeinen Informationen) das gewählte Ziel realisieren, das heißt, durch entsprechende zielführende Aktivitäten an diesem Automaten einen gültigen Fahrschein erwerben (zur Bedeutung von Zielen in komplexen Szenarien siehe Vollmeyer, Burns & Holyoak, 1996).

Diese durch Ziele gesteuerten Tätigkeiten lassen sich abstrakt beschreiben als (1) Wissenserwerb und (2) Wissensanwendung. *Wissenserwerb* bezieht sich dabei auf die Identifikation des Systems, mit dem man es zu tun hat, *Wissensanwendung* dagegen auf die Kontrolle dieses Systems im Hinblick auf ein durch den Versuchsleiter gesetztes Ziel. Beide Aspekte sind beim alltäglichen Umgang mit einem System miteinander verwoben, da meist schon die ersten Schritte des Wissenserwerbs unter der Vorgabe bestimmter Ziele stehen. So will man etwa im Regelfall *nicht* herausfinden, wie der Fahrkartensystem insgesamt programmiert wurde, sondern es geht primär um den raschen Erwerb der Fahrkarte. Da es sich aber um zwei klar unterscheidbare Tätigkeiten handelt, ist es für die diagnostische Situation

wichtig, die beiden Aspekte voneinander zu trennen. Wie dies geschehen kann, wird in den nächsten Abschnitten geschildert.

Da in vielen alltäglichen Situationen auf Vorwissen zurückgegriffen werden kann, ist bereits der Wissenserwerb von der Nutzung dieses Wissens geleitet. Besonders in Fällen, wo nur *ein* Bearbeitungsdurchgang möglich ist (solche Situationen wurden in vielen Untersuchungen zum „Komplexen Problemlösen“ realisiert, z.B. „Lohhausen“ von Dörner u.a., 1983), spielt die Anwendung von Vorwissen natürlich eine entscheidende Rolle bei den ersten Schritten des Wissenserwerbs (vgl. Süß, 1999).

4.1 Wissenserwerb

Die Wissenserwerbssituation ist eine komplexe Lernsituation, in der die Vernetztheit und die Dynamik des jeweiligen Systems festzustellen ist. Die Erfassung der strukturellen Aspekte eines Systems (Vernetztheit) kann allerdings nicht losgelöst von der Erfassung der prozessualen Aspekte dieses Systems (Dynamik) erfolgen, da sich die Variablen des Systems nur im zeitlichen Verlauf analysieren lassen. Bezogen auf lineare Strukturgleichungen bedeutet Identifikation des Systems: Finde heraus, wie die exogenen Variablen auf die endogenen wirken und wie die endogenen Variablen sich untereinander beeinflussen. Hierfür ist eine entsprechende Identifikationsstrategie zu entwerfen, da bei komplexeren Systemen eine einzelne Intervention und das Muster der daraus resultierenden Änderungen nicht aussagekräftig ist. Erst aufeinander abgestimmte Muster von Eingriffen (z.B. isolierende Bedingungsvariationen) erlauben kausale Interpretationen der Datenvektoren.

Bei linearen Strukturgleichungssystemen kann das Identifikationsproblem in mehrere Teilziele zerlegt werden: Festzustellen sind (a) die Existenz einer Relation zwischen zwei Variablen, (b) deren Richtung (positives oder negatives Vorzeichen) sowie (c) deren genaue Spezifikation in Form des Gewichtungsfaktors, mit dem die erste Variable auf die zweite oder auch auf weitere Variablen einwirkt. Mit diesen Annahmen verbunden sind Vorstellungen darüber, wie die genannten Merkmale repräsentiert sein könnten (vgl. Funke, 1992, Kap. 3) und wie entsprechend diesen Repräsentationsannahmen eine theoriegeleitete Wissensdiagnostik aussehen könnte (z.B. als Kausaldiagramm-Diagnostik zur Erfassung expliziten Systemwissens; vgl. Funke, 1985). Die formulierten Repräsentationsannahmen sehen qualitativ verschiedene Stufen des erworbenen Wissens vor, zu denen Relations-, Vorzeichen- und Wirkstärkenwissen gehören. Diese Wissensarten beziehen sich auf verschiedene Differenzierungsgrade des erworbenen Systemwissens, die im Rahmen der Wissensdiagnostik unterschieden werden können. Hinsichtlich der dafür verwendeten Kausaldiagramm-Diagnostik, die von Kluwe (1988, S. 371)

wegen ihres hohen Aufforderungsgehalts³ kritisiert wurde, liegen inzwischen sowohl überzeugende Reliabilitätsstudien vor (vgl. Müller, 1993) als auch Studien, in denen dieser Wissenserwerb erfolgreich multinomial modelliert wurde (Beckmann, 1994).

Bei finiten Automaten ist das Identifikationsproblem weniger einfach zu zerlegen: Dort ist – zumindest prinzipiell – die gesamte Zustandsübergangsmatrix zu identifizieren. Allerdings kann die Existenz wiederkehrender Muster in der Matrix (strukturelle Redundanz) deren Identifikation erheblich erleichtern, sofern diese erkannt werden. Auch hier ergibt sich aus diesen Vorstellungen nahtlos die Annahme, dass die Zustandsübergangsmatrix subjektiv repräsentiert sein muss. Daraus folgen natürlich zwangsläufig bestimmte Verfahren zur Wissensdiagnostik (z.B. Erfassung von Ausschnitten der „subjektiven“ Zustandsübergangsmatrix; vgl. Funke & Buchner, 1992).

4.2 Wissensanwendung

Wissensanwendung stellt das vorhandene bzw. erworbene Wissen in einen instrumentellen Zusammenhang: Das Wissen soll genutzt werden, um einen bestimmten Systemzustand zunächst herzustellen und dann gegebenenfalls längerfristig aufrechtzuerhalten. Dieser zuletzt genannte Aspekt spielt vor allem bei solchen Systemen eine wichtige Rolle, bei denen durch die Eigendynamik des Systems ein stabiler Zustand nur durch ständiges Eingreifen sichergestellt werden kann.

Bezogen auf lineare Strukturgleichungssysteme bedeutet Kontrolle des Systems, den oder die Eingriffsvektoren zu spezifizieren, die einen gegebenen Ausgangszustand in den gewünschten Zielzustand überführen, und sodann den oder die Eingriffsvektoren zu bestimmen, die den Zielzustand aufrechterhalten. Die Messung erfolgt hier durch die Bestimmung des Abstands zwischen dem gewünschten und dem erreichten Zustand.

Bezogen auf finite Automaten bedeutet Kontrolle des Systems die Realisierung einer Sequenz von Eingabezeichen, mittels derer der gegebene Ausgangszustand in den gewünschten Zielzustand überführt werden kann. Anders als bei Strukturgleichungssystemen ist hier in der Regel das Verbleiben im Zielzustand keine besondere Anforderung, da das System im einmal erreichten Zielzustand verharrt. Die Messung erfolgt durch Bestimmung der Schrittzahl vom Start- zum Zielzustand und dem Vergleich dieses Kennwerts mit der optimalen Schrittzahl bei vollständiger Kenntnis der Zustandsübergangsmatrix.

³ Gemeint ist damit, dass die Vorlage von Kausaldiagrammen eine kausale Interpretation geradezu induziert, die unter natürlichen Bedingungen vielleicht nicht erfolgt.

4.3 Zum Verhältnis von Wissenserwerb und Wissensanwendung

Natürlich stellt sich rasch die Frage, in welchem Verhältnis Wissenserwerb und Wissensanwendung stehen. Die naive Annahme, vorangehender Wissenserwerb sei notwendige und hinreichende Bedingung für erfolgreiche Wissensanwendung, ist zumindest durch einige Studien infrage gestellt worden. Wie bereits weiter oben dargestellt, fanden etwa Berry und Broadbent (1984, 1987, 1988) wiederholte Dissoziationen zwischen der durch Steuerungsleistungen manifestierten Wissensanwendung und dem durch die Vpn verbalisierbaren Wissen. Diese Befunde werden – wie weiter oben geschildert – zwischenzeitlich jedoch anders interpretiert (vgl. Buchner, Funke & Berry, 1995; Haider, 1992, 1993). Weiterhin machen eine Reihe neuerer Arbeiten (Beckmann, 1994; Funke, 1992; Kersting, 1999; Müller, 1993; Preußler, 1996, 1998; Sanderson, 1989; Süß, 1999) zudem klar, dass durchaus substantielle positive Korrelationen zwischen Wissenserwerb und Steuerleistung zu finden sind und vor allem dann auftreten, wenn die Lernenden zum Wissenserwerb angeregt wurden, entsprechende Erfahrungen sammeln konnten und wenn die Erfassung des erworbenen Wissens hinreichend spezifisch erfolgt.

4.4 Die Erfassung von Prozessaspekten der Aufgabenbearbeitung

Wie eingangs angedeutet wurde, besteht einer der Hauptvorwürfe gegenüber konventionellen Intelligenztests in deren Vernachlässigung von prozessorientierten gegenüber resultatorientierten Maßen. Gemeint ist damit die Konzentration der Messbemühungen auf die Parameter „Lösungszeit“ und „Lösungsgüte“ (vgl. Nährer, 1986) bei gleichzeitiger Vernachlässigung von Kennwerten, die den Bearbeitungsprozess charakterisieren. Letztere sind mit besonderer Vehemenz bereits von Dörner (1986) gefordert, aber bis zum heutigen Tage nicht befriedigend realisiert worden. Selbst die in Dörner'scher Tradition entstandenen Arbeiten zum Komplexen Problemlösen sind in letzter Instanz resultatorientierten Indikatoren verhaftet geblieben. Dabei dürfte genau in diesem Bereich der Mehrwert computersimulierter Systeme gegenüber traditionellen Intelligenztests zu finden sein, also ihre über die Korrelation zu IQ-Verfahren hinausgehende, inkrementelle Validität.

Aufgaben, die vor dem Hintergrund der beiden hier vorgestellten Formalismen konstruiert und Testpersonen zur Bearbeitung (Identifikation wie auch Kontrolle des jeweiligen Systems) vorgelegt werden, erlauben nun in besonderer Weise die Ermittlung solcher Prozessaspekte. Diese sollen in den nachfolgenden Abschnitten skizziert werden. Dabei wird hauptsächlich auf Datenquellen in Form einer „Log-Datei“ zurückgegriffen; diese Datenquelle „umfasst die mit einem Zeit-

stempel versehenen fortlaufenden Einträge in eine Datei, in der alle Eingriffe der entsprechenden Vp in das System festgehalten und protokolliert werden. Aus den Log-Dateien lässt sich die Handhabung des entsprechenden Systems auch später noch sekundengenau rekonstruieren⁴.

4.4.1 Prozessaspekte bei Aufgaben vom Typ „lineares Gleichungssystem“

Prozessaspekte bei Aufgaben vom Typ „lineares Gleichungssystem“ fallen in den beiden Teilbereichen der Identifikation und der Kontrolle des Systems an. Zu beiden Bereichen werden nachfolgend nähere Erläuterungen gegeben.

Für den Prozess der *Identifikation eines unbekanntes Strukturgleichungssystems* ist die Gestaltung der Eingriffe von zentraler Bedeutung. Hierfür ist eine Art „Versuchsplanung“ angebracht, die im Idealfall das (wissenschaftliche) Prinzip der systematischen Bedingungsvariation realisiert. Hierbei wird der Reihe nach auf jede der einzelnen exogenen Variablen ein Testinput gelegt (die restlichen exogenen Variablen bleiben unberührt) und beobachtet, wie die Auswirkungen dieser Testsignale auf die endogenen Variablen ausfallen. Dadurch lassen sich Hypothesen über den Effekt der exogenen auf die endogenen Variablen bilden. Da es zusätzliche Effekte der endogenen Variablen untereinander geben kann, sind so genannte „Null-Eingriffe“ von Bedeutung, also Zeittakte, in denen *nicht* in das System eingegriffen wird, um die eigenständigen Veränderungen, die eventuell auftreten, feststellen und interpretieren zu können.

Neben der Gestaltung der Eingriffe ist auch deren Dosierung von großer Bedeutung. Für die Identifikation einer Kausalwirkung ist ein starkes Testsignal sinnvoll, da in linearen Systemen starke Eingriffe auch starke Effekte nach sich ziehen und damit die Entdeckung einer bestehenden Kausalbeziehung erleichtern.

Wird flankierend zur Erfassung von Eingriffen auch das subjektive Kausalmodell einer Vp erhoben (wie z.B. bei Funke, 1985), lassen sich prinzipiell Aussagen darüber machen, welche Veränderungen an diesem Modell durch einen einzelnen Eingriff bewirkt werden. Auf dieser Auflösungsebene kann der Identifikationsprozess als Hypothesentest konzipiert (vgl. Klayman & Ha, 1987) und mit dem Zwei-Räume-Modell von Simon und Lea (1974) beschrieben werden, das den Problemraum in einen *Regelraum* und einen *Instanzenraum* unterteilt. Im Regelraum sind alle möglichen Regeln einer Aufgabe enthalten, im Instanzenraum die möglichen Zustände. Am Beispiel linearer Systeme sind die Regeln alle möglichen Verbindungen und Gewichte zwischen den Eingangs- und Ausgangsvariablen. Die Zustände sind alle möglichen Werte, die die Ausgangsvariablen einneh-

⁴ Die Konzentration auf derartige Verhaltensmaße schließt natürlich nicht aus, dass auch Befragungsrechniken zum Einsatz kommen können, die zum Beispiel nach den Gründen für bestimmte Eingriffe in ein System fragen.

men können. Die Operatoren sind die Werte, die man den Eingangsvariablen zuweisen kann, wodurch der Instanzenraum verändert wird.

Klahr und Dunbar (1988) griffen den Ansatz des Zwei-Räume-Modells auf und entwickelten daraus das SDDS-Modell („Scientific Discovery as Dual Search“), um den Prozess wissenschaftlicher Entdeckungen zu erklären. In diesem Modell ist der Instanzenraum ähnlich dem *Experimenterraum* und der Regelraum ist ähnlich dem *Hypothesenraum*. Im Hypothesenraum werden Hypothesen über zum Beispiel Verbindungen zwischen Eingangs- und Ausgangsvariablen generiert, modifiziert und verworfen. Im Experimenterraum werden dagegen Experimente geplant, wie die generierten Hypothesen überprüft werden können oder wie die Operatoren anzuwenden sind. Dazu müssen beide Problemräume (wie schon bei Simon & Lea, 1974) interagieren: Aktivitäten im Hypothesenraum lösen Operationen im Experimenterraum aus. Es gibt aber auch die umgekehrte Einflussrichtung: Wenn keine Hypothese über Beobachtungen zu dem System aufgestellt wird (Suche im Hypothesenraum), ist es nämlich möglich, Operatoren anzuwenden (Suche im Experimenterraum). Aus den Ergebnissen dieser Experimente können dann Hypothesen abgeleitet werden.

Mit dem Zwei-Räume-Modell lässt sich also das Prozessgeschehen beim Identifizieren von Systemen gut beschreiben und die Ableitung von entsprechenden Prozessmaßen begründen.

Für den Prozess der *Steuerung eines identifizierten Strukturgleichungssystems* sind zwei Aspekte diagnostisch relevant: (a) Wie gelingt es der Vp, von einem gegebenen Ausgangszustand in den gewünschten Systemzustand zu kommen, und (b) wie gelingt es ihr, den womöglich einmal erreichten Zustand aufrechtzuerhalten (was nur bei Systemen mit Eigendynamik, also mit Wirkungen der endogenen Variablen aufeinander, von Bedeutung ist). Je nach Systemstruktur kann der erste Schritt (Zielerreichung) sequentiell in mehrere Teilschritte zerlegt werden oder muss – wegen der enthaltenen Eigendynamik oder wegen Nebenwirkungen exogener Variablen – simultan in einem einzigen, gut geplanten Schritt vollzogen werden.

Sowohl für die Phase der Identifikation als auch für die der Steuerung lassen sich aus den hier skizzierten „Bausteinen“ für Prozessmaße komplexere Strategien zusammensetzen wie etwa: „Mache zunächst Null-Eingriffe und gehe dann zu systematischen Einzel-Eingriffen über.“

4.4.2 Prozessaspekte bei Aufgaben vom Typ „finiter Automat“

Anders als bei den Strukturgleichungssystemen, wo die Vpn zu jedem Zeitpunkt eine Entscheidung darüber zu fällen haben, bei welcher exogenen Variablen sie mit welcher Intensität eingreifen wollen (Festlegung von Ort und Dosierung der In-

tervention), beschränkt sich die Entscheidung der Vpn bei finiten Automaten auf die Frage, welches der insgesamt möglichen Eingabezeichen im nächsten Zeitpunkt realisiert werden soll. Die Gestaltung des Eingriffprozesses ist in diesem Fall die Entscheidung über eine sequentielle Abfolge von Tastendrücken. Strategien manifestieren sich hierbei durch eine entsprechend systematische Abfolge von Eingriffen.

Der Prozess der *Exploration einer unbekanntem Zustandsübergangsmatrix* kann unterschiedlich systematisch erfolgen. Bei der Beurteilung der Systematik solcher Eingriffe muss der erreichte Systemzustand allerdings mit in die Überlegungen einbezogen werden, da etwa das wiederholte Drücken ein und derselben Taste entweder Zeichen einer unsystematischen Vorgehensweise (wenn nämlich jedes Mal der gleiche Folgezustand resultiert) oder Bestandteil einer systematischen Strategie sein kann (wenn nämlich mit jedem wiederholten Druck derselben Taste ein neuer Folgezustand ausgelöst wird). In der prozessorientierten Bewertung von Eingriffolgen muss also jeweils das Tripel aus Ist-Zustand, Intervention und Folgezustand herangezogen werden.

Strategisches Vorgehen bei der Exploration kann sich darin äußern, dass man erkannte Funktionsprinzipien einer Intervention (etwa einer Modus-Taste, die einen bestimmten Zustand auswählt und durch wiederholte Betätigung zwischen verschiedenen Zuständen wechselt, im Unterschied zu einer Select-Taste, die den eingestellten Modus aktiviert) auf andere Bereiche des Automaten überträgt (Transfer von Funktionsprinzipien). Dies ist allerdings nicht einfach zu diagnostizieren.

Prozessinformation fällt auch bei der *Steuerung eines Automaten* an, dessen Struktur identifiziert wurde. Hier können zum Beispiel Optimalität (Nutzung des optimalen Pfads vom Start- zum Zielzustand) und Effektivität (Anteil wirksamer Eingriffe an der Gesamtzahl von Steuerungseingriffen) der Zielannäherung bestimmt werden.

Sowohl Eingriffs- als auch Steuerungsdaten im Kontext finiter Automaten sind im Rahmen der nationalen Erhebung des „Programme for International Student Assessment“ (PISA; vgl. Baumert, Klieme & Stanat, 1999; Klieme u.a., in Druck) dadurch positiv aufgefallen, dass sie einen eigenständigen, nicht durch andere Messinstrumente abgedeckten Faktor im Rahmen der Kausalmodelle bilden (Funke, 1999). Für beide Bereiche sind von Dreher (2000) auf der Basis erster Erprobungsdaten innerhalb von PISA zahlreiche interessante Operationalisierungsvorschläge gemacht worden. Deren Tauglichkeit wird in den bevorstehenden Datenanalysen der PISA-Hauptuntersuchung geprüft werden.

5. Schlussbemerkungen

Ziel dieses Beitrags ist es, neue Verfahren zur Erfassung des intelligenten Umgangs mit komplexen dynamischen Anforderungen darzustellen. Hierzu wurden in einem ersten Schritt die Merkmale der Vernetztheit und Dynamik als zwei zentrale Bestimmungsstücke von Systemen dargestellt, um deren Realisierung man sich Gedanken machen muss. In einem zweiten Schritt wurden zwei Formalismen, der Ansatz linearer Strukturgleichungsmodelle und der Ansatz finiter Automaten, vorgestellt, mit denen beide Merkmale systematisch und in unterschiedlicher Ausprägung hergestellt werden können⁵. In einem dritten Schritt ging es um die Anforderungen, die in derartigen Umgebungen an Probanden gestellt werden können. Im Wesentlichen sind dies die Leistungen der Identifikation und Kontrolle solcher Systeme, die in kognitionspsychologischer Terminologie als Wissens-erwerb und Wissensanwendung bezeichnet werden.

Die Ableitung prozessbezogener Kennwerte aus der Bearbeitung solcher Systeme steckt noch in den Kinderschuhen. Allerdings ist bereits jetzt erkennbar, dass mit diesen Paradigmen eine große Vielfalt von „Prozessgestalten“ identifiziert werden kann. Welche sich davon als brauchbar erweisen, wird erst die empirische Erprobung (etwa im Rahmen von Validitätsstudien) zeigen. Generell jedoch steht fest, dass durch die sequentielle Bearbeitung derartiger Szenarien eine gute Chance besteht, die *Mikrogenese von Wissen* (sowohl in der Erwerbs- wie in der Anwendungssituation) untersuchbar zu machen (vgl. Siegler & Chen, 1998) – ein Aspekt, den klassische Verfahren zur Erfassung intelligenten Verhaltens strukturell wie messtechnisch bedingt nicht leisten können. Hierbei scheint mit von besonderer Bedeutung, dass gerade auf dieser Ebene der Aktualgenese die Rolle motivationaler und emotionaler Prozesse für die Lenkung wie Aufrechterhaltung von Explorations- und Steuerungsprozessen besonders hervortritt: Gerade aufgrund der detaillierten Prozessbetrachtung tritt die enge Verzahnung kognitiver und motivationaler Abläufe in einer Deutlichkeit hervor, die kondensierte Resultatmaße kaum abbilden können. Die Heranziehung eines handlungstheoretischen Bezugsrahmens erscheint angemessen, um diese Feinprozesse der Kognition, Volition, Aktion und Emotion in nötiger Detailauflösung hervortreten zu lassen, die in der klassischen Intelligenzdiagnostik zu einem einzigen Konglomerat verschmelzen. Methodologisch kann dies zunächst nur durch Einzelfallanalysen geleistet werden (vgl. Gobet & Ritter, 2000).

⁵ Selbstverständlich kann mit beiden Formalismen auch in theoriebildender Absicht gearbeitet werden. So verwendet etwa Hawighorst (1998) erfolgreich einen automatentheoretischen Ansatz zur Rekonstruktion des Eingreifens in Strukturgleichungssysteme. Zur Theoriebildung bei komplexen Problemen mittels Strukturgleichungsmodellen siehe zum Beispiel Kröner (1999) sowie Süß (1999).

Dass die systematische Konstruktion von Anforderungen unterschiedlicher Schwierigkeit vor dem Hintergrund eines einheitlichen Bezugsrahmens eine Reihe von Vorteilen bietet (z.B. Vergleichbarkeit verschiedener Systeme, Bestimmung optimaler Vorgehensweisen, Nutzung des formalen Apparats), wird den psychometrisch vorgebildeten Leserinnen und Lesern sofort einleuchten. Allerdings soll nicht verschwiegen werden, dass mit dieser Systematik auch ein gewisses Maß an Künstlichkeit eingeführt wird, was in den Augen mancher Kritiker einen Verlust an Alltagsnähe bedeutet. Auf welche Seite man sich hier schlägt, hängt von den jeweiligen Untersuchungszielen ab.

Literatur

- Baumert, J., Klieme, E. & Stanat, P. (1999). Programme for International Student Assessment (PISA) – Zielsetzung, wissenschaftliche Konzeption und Design. In D. Leutner (Hrsg.), *Abstracts zur 57. Tagung der Arbeitsgruppe für Empirische Pädagogische Forschung (AEPF)*. Erfurt: Pädagogische Hochschule.
- Beckmann, J. F. (1994). *Lernen und komplexes Problemlösen. Ein Beitrag zur Konstruktvalidierung von Lerntests*. Bonn: Holos.
- Berry, D. C. & Broadbent, D. E. (1984). On the relationship between task performance and associated verbalizable knowledge. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 36A, 209–231.
- Berry, D. C. & Broadbent, D. E. (1987). The combination of explicit and implicit learning processes in task control. *Psychological Research*, 49, 7–15.
- Berry, D. C. & Broadbent, D. E. (1988). Interactive tasks and the implicit-explicit distinction. *British Journal of Psychology*, 79, 251–272.
- Buchner, A. (1999). Komplexes Problemlösen vor dem Hintergrund der Theorie finiter Automaten. *Psychologische Rundschau*, 50, 206–212.
- Buchner, A. & Funke, J. (1993). Finite state automata: Dynamic task environments in problem solving research. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 46A, 83–118.
- Buchner, A., Funke, J. & Berry, D. C. (1995). Negative correlations between control performance and verbalizable knowledge: Indicators for implicit learning in process control tasks? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48A, 166–187.
- Dörner, D. (1986). Diagnostik der operativen Intelligenz. *Diagnostica*, 32, 290–308.
- Dörner, D. & Kreuzig, H. W. (1983). Problemlösefähigkeit und Intelligenz. *Psychologische Rundschau*, 34, 185–192.
- Dörner, D., Kreuzig, H. W., Reither, F. & Stäudel, T. (Hrsg.). (1983). *Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität*. Bern: Huber.
- Dreher, K. (2000). *Prozessindikatoren bei finiten Automaten*. Unveröff. Diplomarbeit, Psychologisches Institut der Universität Heidelberg.
- Frensch, P. A. & Funke, J. (1995). Definitions, traditions, and a general framework for understanding complex problem solving. In P. A. Frensch & J. Funke (Eds.), *Complex problem solving: The European perspective* (pp. 3–25). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Funke, J. (1984). Diagnose der westdeutschen Problemlöseforschung in Form einiger Thesen. *Sprache & Kognition*, 3, 159–172.
- Funke, J. (1985). Steuerung dynamischer Systeme durch Aufbau und Anwendung subjektiver Kausalmodelle. *Zeitschrift für Psychologie*, 193, 435–457.
- Funke, J. (1990). Systemmerkmale als Determinanten des Umgangs mit dynamischen Systemen. *Sprache & Kognition*, 9, 143–153.

- Funke, J. (1991). Keine Struktur im (selbstverursachten) Chaos? Erwiderung zum Kommentar von Stefan Strohschneider. *Sprache & Kognition*, 10, 114–118.
- Funke, J. (1992). *Wissen über dynamische Systeme: Erwerb, Repräsentation und Anwendung*. Berlin: Springer.
- Funke, J. (1993). Microworlds based on linear equation systems: A new approach to complex problem solving and experimental results. In G. Strube & K.-T. Wender (Eds.), *The cognitive psychology of knowledge* (pp. 313–330). Amsterdam: Elsevier.
- Funke, J. (1999, August). *Using finite state automata for assessing problem solving competencies*. Paper presented at the EARLI-8, Göteborg.
- Funke, J. & Buchner, A. (1992). Finite Automaten als Instrumente für die Analyse von wissensgeleiteten Problemlöseprozessen: Vorstellung eines neuen Untersuchungsparadigmas. *Sprache & Kognition*, 11, 27–37.
- Funke, J. & Gerdes, H. (1993). Manuale für Videorekorder: Auswahl von Textinhalten unter Verwendung der Theorie endlichter Automaten. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 47, 44–49.
- Gobet, F. & Ritter, F. E. (2000). Individual data analysis and unified theories of cognition: A methodological proposal. In N. Taargen & J. Aasman (Eds.), *Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Modelling* (pp. 150–157). Veenendaal, The Netherlands: Universal Press.
- Haider, H. (1992). Implizites Wissen und Lernen. Ein Artefakt? *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie*, 39, 68–100.
- Haider, H. (1993). Was ist implizit am impliziten Wissen und Lernen? *Sprache & Kognition*, 12, 44–52.
- Hawighorst, P. (1998). *Rough-Set-Theory und abg-Automaten. Eine Formalisierung qualitativer Aspekte des Lernens und Handelns bei der Regelung komplexer Systeme*. Aachen: Shaker.
- Hopcroft, J. E. & Ullman, J. D. (1988). *Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie*. New York: Addison-Wesley.
- Hussy, W. (1984). *Denkpsychologie. Ein Lehrbuch: Bd 1. Geschichte, Begriffs- und Problemlöseforschung, Intelligenz*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Kersting, M. (1999). *Diagnostik und Personalauswahl mit computergestützten Problemlösevarianten? Zur Kriteriumsvalidität von Problemlösevarianten und Intelligenztests*. Göttingen: Hogrefe.
- Klahr, D. & Dunbar, K. (1988). Dual space search during scientific reasoning. *Cognitive Science*, 12, 1–48.
- Klayman, J. & Ha, Y.-W. (1987). Confirmation, disconfirmation, and information in hypothesis testing. *Psychological Review*, 94, 211–228.
- Klieme, E., Funke, J., Leutner, D., Reimann, P. & Wirth, J. (in Druck). Problemlösen als fächerübergreifende Kompetenz. Konzeption und erste Ergebnisse aus einer Schulleistungsstudie. *Zeitschrift für Pädagogik*.
- Kluwe, R. H. (1988). Methoden der Psychologie zur Gewinnung von Daten über menschliches Wissen. In H. Mandl & H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie* (S. 359–385). München: Psychologie Verlags Union.
- Kotkamp, U. (1999). *Elementares und komplexes Problemlösen: Über Invarianzeigenschaften von Denkprozessen*. Lengerich: Pabst.
- Kröner, S. (1999). *MultiFlux – Entwicklung und Validierung eines simulationsbasierten Intelligenzdiagnostikums*. Unveröff. Dissertation, Erziehungswissenschaftliche Fakultät der Pädagogische Hochschule Erfurt.
- Müller, H. (1993). *Komplexes Problemlösen: Reliabilität und Wissen*. Bonn: Holos.
- Nährer, W. (1986). *Schnelligkeit und Güte als Dimensionen kognitiver Leistung*. Heidelberg: Springer.
- Preußler, W. (1996). Zur Rolle expliziten und impliziten Wissens bei der Steuerung dynamischer Systeme. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie*, 43, 399–434.
- Preußler, W. (1998). Strukturwissen als Voraussetzung für die Steuerung komplexer dynamischer Systeme. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie*, 45, 218–240.
- Putz-Osterloh, W. (1981). Über die Beziehung zwischen Testintelligenz und Problemlöseerfolg. *Zeitschrift für Psychologie*, 189, 79–100.

- Putz-Osterloh, W. & Lüer, G. (1981). Über die Vorhersagbarkeit komplexer Problemlöseleistungen durch Ergebnisse in einem Intelligenztest. *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie*, 28, 309–334.
- Sanderson, P. M. (1989). Verbalizable knowledge and skilled task performance: Association, dissociation, and mental models. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15, 729–747.
- Siegler, R. S. & Chen, Z. (1998). Developmental differences in rule learning: A microgenetic analysis. *Cognitive Psychology*, 36, 273–310.
- Simon, H. A. & Lea, G. (1974). Problem solving and rule induction: A unified view. In L. W. Gregg (Ed.), *Knowledge and cognition* (pp. 105–127). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Strauß, B. (1993). *Konfundierungen beim Komplexen Problemlösen. Zum Einfluß des Anteils der richtigen Lösungen (ArL) auf das Problemlöseverhalten in komplexen Situationen*. Bonn: Holos.
- 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.
- Süß, H.-M. (1999). Intelligenz und komplexes Problemlösen. *Psychologische Rundschau*, 50, 220–228.
- Vollmeyer, R., Burns, B. D. & Holyoak, K. J. (1996). The impact of goal specificity on strategy use and the acquisition of problem structure. *Cognitive Science*, 20, 75–100.
- Vollmeyer, R. & Funke, J. (1999). Personen- und Aufgabenmerkmale beim komplexen Problemlösen. *Psychologische Rundschau*, 50, 213–219.
- Wallach, D. (1998). *Komplexe Regelungsprozesse. Eine kognitionswissenschaftliche Analyse*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- Werner, J. (1997). *Lineare Statistik. Das Allgemeine Lineare Modell*. Weinheim: Psychologie Verlags Union.