Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *108(2010), 37–55*

Werner Krause

Einfachheit und menschliche Informationsverarbeitung?

Wir fragen nach der Wirkung eines Einfachheitsprinzips in der menschlichen Informationsverarbeitung und lassen – mit Bezug zum Beitrag von Herbert Hörz (Hörz, in diesem Band) – die Einfachheit als Erkenntnis- und Gestaltungsprinzips vorerst außer Acht.

Um zu prüfen, ob im menschliches Verhalten ein Einfachheitsprinzip wirkt, muss eine Definition des Einfachheitskriteriums erfolgen, die für uns vorerst vorzugsweise auf

- *minimale Zeit* und
- *minimale Anzahl*

abzielt. Dies kann erweitert werden auf

- *Einfachste Struktur.* Etwa: minimale Komplexität von Strukturen (oder Netzwerken) für die Informationsübertragung, wie sie z.B. von Hassenstein und Reichhardt (1956) zur Vorausberechnung des Verhaltens eines Rüsselkäfers eingeführt wurden.
- *Einfachste Sequenz.* Etwa: Verhalten ist in Sequenzen von externen Handlungsschritten oder Sequenzen von internen Mikrozuständen abbildbar. Einfachste Sequenzen könnten solche mit größtmöglicher Ordnung,also z.B. mit größtmöglicher Wiederkehr gleicher Teilsequenzen sein, messbar vermittels Entropie oder Entropiereduktion. Sie erlauben eine bestmögliche Prädiktion. Seidel (2004) findet solche einfachsten Sequenzen bei Hochbegabten.
- *Einfachste Regel.* Etwa: die Menge der Variablen in einer Entscheidungsregel wird auf eine geringste Anzahl reduziert, selbst dann, wenn dadurch die Zielerreichung im komplexen Problemlösen gefährdet ist (Dörner, 1989) (vgl. auch den Beitrag von Sabine Müller (Müller, in diesem Band)).
- *Einfachste Codierung.* Etwa: gesucht ist eine solche Codierung bei der Informationsübertragung, die eine geringstmögliche Fehlerwahrscheinlichkeit aufweist (z.B. Pulscodemodulation). Die Diskretisierung oder Quantifizierung der Zeit (Geißler, 1991) ist dazu eine entscheidende Voraussetzung.

- *Minimale Informationsmenge im Bildbereich.* Etwa: wie wenige Zeichen darf eine Information tragen, um bei minimalem Übertragungsaufwand trotzdem mit hoher Sicherheit erkannt zu werden. Etwa: Wie viele Striche musste Picasso wenigstens auf das Papier bringen, damit die Zeichnung als Picasso-typischer Stier erkannt wurde?
- *Minimale Informationsmenge im Textbereich* so dass eine Handlungsentscheidung mit großer Sicherheit möglich ist (eine zentrale Frage der Arbeitspsychologie bei der Entwicklung von Kommandosprachen, Rothe (1992)). Oder etwa beim Sprachverstehen: Wie einfach oder kompliziert muss ein semantischer Parser (Klix, 1992) sein, damit die Spracherkennung eindeutig erfolgt? Oder etwa im Gruppenkommunikationsprozess: Wie einfach oder kompliziert muss ein den Kommunikationsprozess abbildender Kommunikationsgraph sein, damit eine sich anschließende Handlung optimal ausgeführt wird (Gundlach und Schulz, 1987, 1990).
- *Vereinfachung von Text durch Bild:* Etwa: Darstellung von Regeln (Abstraktionsleistungen) durch ein Bild. So ist z.B. auf der 3700 Jahre alten Himmelsscheibe von Nebra der Zeitpunkt für Aussaat dargestellt. Der Astronom Rahlf Hansen vom Planetarium Hamburg entschlüsselte auf der Himmelsscheibe eine Schaltregel, die es ermöglicht, das Sonnenjahr (365 Tage) und das Mondjahr (354 Tage) in Einklang zu bringen (Claus, 2006) und den Zeitpunkt zu bestimmen, wann ein Schaltmonat eingefügt werden muss. Eine erste schriftliche Niederlegung dieser Regel findet sich erst über tausend Jahre später in Keilschrifttexten aus Babylon.
- Minimales Risiko: Wie viel Information muss ein Mensch mindestens aufsuchen, um ein Urteil mit minimalem Risiko für ein Fehlurteil abgeben zu können (Petzold, 1992). Dies könnte zum Ausbau der Informationsintegrationstheorie führen und die Signalerkennungstheorie mit der Bezugssystemtheorie vereinen.

Berücksichtigen wir, dass sich eine Definition nicht nur auf eine Größe sondern auch auf eine Funktion oder ein Funktional beziehen kann und unterstellen wir Unabhängigkeit, dann erhalten wir 3 mal 10 gleich 30 mögliche Problembereiche, die bezüglich der Wirkung des Einfachheitsprinzips untersucht werden müssten.

Wir beschränken uns hier auf die ersten zwei Fälle: minimale Zeit und minimale Anzahl als Größen und haben dabei – wegen der exakten mathematischen Definition −Extremalprinzipien im Blick, wohl wissend, dass wir auf diese Weise einen großen Teil der Fälle erst einmal ausschließen.

Unsere Vorgehensweise ist folgende:

1. Liegt eine Quantifizierung des Informationsverarbeitungsprozesses vor – wie bei elementaren Anforderungen -, dann kann mittels eines Einfachheitskriteriums ein so ausgezeichnetes Verhalten vorausberechnet und mit einem experimentellen Resultat auf Übereinstimmung geprüft werden.
2. Ist eine Quantifizierung des Informationsverarbeitungsprozesses nicht möglich – und das ist der Normalfall besonders bei komplexen Anforderungen –, dann kann nur eine phänomenologische Trendabschätzung erfolgen.

Zum Schluss möchte ich auf den Informationsverarbeitungsprozess selbst eingehen. Es wird zu zeigen sein, dass ein Einfachheitsprinzip in der menschlichen Informationsverarbeitung wirkt, jedoch bedingungsabhängig und personenspezifisch.

1. Die Wirkung des Einfachheitsprinzips bei elementaren Anforderungen

Minimale Zeit: Wir betrachten eine Trackingsituation. Eine Versuchsperson soll einen sich bewegenden Punkt mit einem zweiten Punkt so verfolgen, dass die Abweichungen minimal werden. Solche sensomotorischen Koordinationsleistungen treten in jeder Steuersituation auf, also z.B. auch beim Steuern eines Fahrzeuges. Über- oder Untersteuerung, Verzögerung beim Ausgleich kann zu Gefahren führen. Eine zeitminimale Korrektur bei der Steuerung ist erwünscht.

In der Laborsituation muss eine Versuchsperson eine Sprungfunktion nachfahren und erzeugt dabei eine Sprungantwortfunktion (Abb. 1). Von den drei Sprungantwortfunktionen in

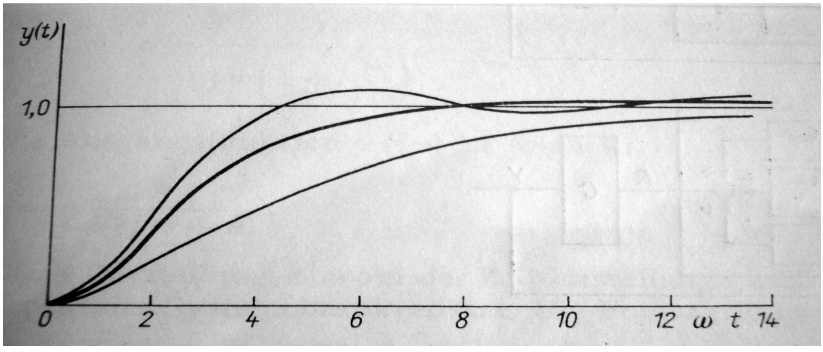


Abb. 1: Folgeverhalten bei einer Sprungfunktion als Eingangsbedingung (Klix, 1971).

Abbildung 1 regelt die mittlere den Amplitudenunterschied in minimaler Zeit aus. Für die Definition eines Einfachheitskriteriums gilt vor dem Hintergrund der Zeitminimalität, dass die Differenzfläche zwischen der gegebenen und der nachgefahrenen Kurve ein Minimum wird (Gleichung 5). Erzeugt eine Versuchsperson eine so ausgezeichnete Sprungantwortfunktion, dann sagen wir, dass ein Einfachheitsprinzip bei dieser Versuchsperson bei der sensomotorischen Koordinationsleistung wirkt, weil die Ausregelung in minimaler Zeit erfolgt.

Im einzelnen: In der linearen Systemtheorie gilt bekanntlich:

$$x_a(p) = F(p) \times x_e(p) \tag{1}$$

mit $x_a(p)$ = Ausgangssignal,
$x_e(p)$ = Eingangssignal,
$F(p)$ = Übertragungsfunktion,
p = Laplaceoperator.

Die sensomotorische Koordination, d.h., das Trackingverhalten des Menschen lässt sich in eingeschränkten Frequenzgrenzen mit einem DT^2 – Verhalten recht gut beschreiben:

$$F(p) = K \times \frac{pT}{(1+pT)^2} \tag{2}$$

Soll eine Einheitssprungfunktion

$$x_e(p) = \frac{1}{p} \tag{3}$$

nachgefahren werden, dann gilt für die Sprungantwortfunktion im Zeitbereich:

$$\mathcal{L}_{-1}\{x_a(p)\} = \mathcal{L}_{-1}\left\{K \times \frac{pT}{(1+pT)^2} \times \frac{1}{p}\right\} \tag{4}$$

Für eine zeitoptimale Sprungantwortfunktion muss die Differenzfläche zwischen dem Eingangs – und dem Ausgangssignal ein Minimum sein:

$$min\left[\int_0^\infty \mathcal{L}_{-1}\{x_e(p)\}dt - \int_0^\infty \mathcal{L}_{-1}\{x_a(p)\}\,dt\right]. \tag{5}$$

Die Abbildung 1 (mittlere Kurve) zeigt eine so ausgezeichnete Sprungantwortfunktion.

Wie Timpe (1969) zeigen konnte, sind Versuchspersonen in der Lage, nach hinreichendem Training eine zeitminimale Antwortfunktion zu erzeugen. Timpe hat das Trackingverhalten auch als Ortskurve im Phasenraum mit x‘ über x (x = Weg) dargestellt. Die Abbildung 2 zeigt die Ortskurve einer ungeübten (oben) Versuchsperson und einer hochtrainierten (unten) Versuchsperson. Die hochtrainierte Versuchsperson realisiert den Übergang von Null auf Eins in minimaler Zeit bei maximaler Beschleunigung und maximaler Bremsung. Ein so definiertes Einfachheitskriterium: Regelung in minimaler Zeit ist nach ausreichendem Training bei einzelnen Versuchspersonen in der menschlichen Informationsverarbeitung wirksam.

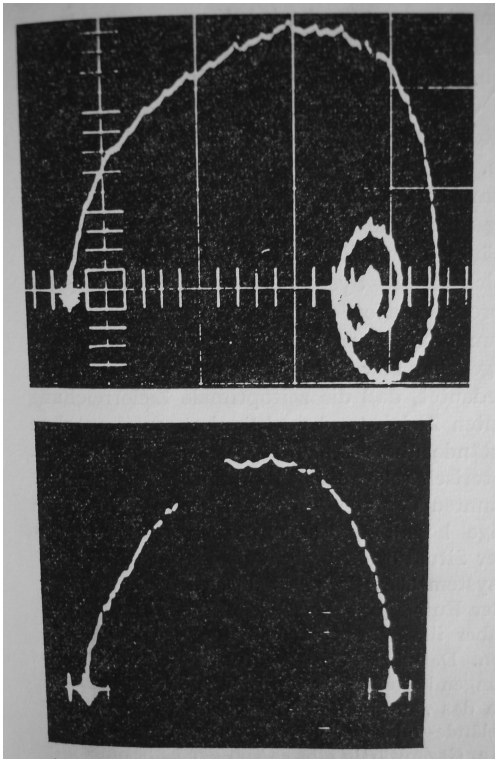
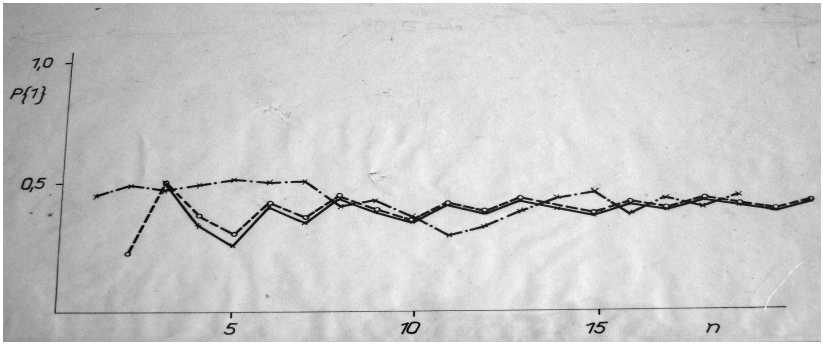


Abb. 2: Sprungantwortverhalten als Ortskurve im Phasenraum. Oben: untrainierte Versuchsperson. Unten: trainierte Versuchsperson (Timpe, 1969).

Minimale Anzahl:
Minimale Anzahl von Fehlern / maximale Wahrscheinlichkeit: Betrachtet wird ein sequentieller Entscheidungsprozess bei Binärprädiktion (Krause, 1970). Die Abbildung 3 zeigt die Prädiktionswahrscheinlichkeit p{1} für das Auftreten einer „1“ in Abhängigkeit von der Schrittzahl n.



Gezeigt: 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0…….

Abb. 3: Prädiktionswahrscheinlichkeit P(1) des Symbols 1 bei einer periodischen Binärfolge als Funktion der Schrittzahl n. Folge: 010010100101001……. .
Strichpunktierte Linie: experimentelle Werte.
Ausgezogene Linie: Maximum der a-posteriori Verteilung mit einer Gleichverteilung als a-priori Verteilung.
Gestrichelte Linie: Maximum der a-posteriori Verteilung mit einer Betaverteilung als a-priori Verteilung.

Schrittweise wird eine periodische Binärfolge {0,1} gezeigt (in der Abbildung unten dargestellt) und eine Versuchsperson muss in jedem Schritt vorhersagen, ob eine „0“ oder eine „1“ folgt. Eine minimale Fehleranzahl ist erwünscht. Die strichpunktierte Linie ist die Prädiktionswahrscheinlichkeit der Versuchspersonen, die ausgezogene und die gestrichelte Linie stellen die Prädiktionswahrscheinlichkeit jeweils nach einem Einfachheitskriterium dar. Offensichtlich wird ca. nach dem 15. Schritt das Entscheidungsverhalten durch ein Einfachheitskriterium (Gleichung (9)) hinreichend beschrieben.

Wir beschreiben den Prozess mit Hilfe des Satzes von Bayes. Aus einer a-priori Verteilung $g_0(p)$ und der zugeführten Information b(x/p) bestimmen wir eine a-posteriori Verteilung $g_n(p/x)$ im n-ten Schritt und errechnen daraus die maximale Wahrscheinlichkeit für die Vorhersage in jedem Schritt n: p_{nmax} als Einfachheitskriterium.

Im einzelnen: Es sei p die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Symbols „1“, entsprechend 1-p die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Symbols „0“. Als a-priori Verteilung unterstellen wir eine Gleichverteilung mit der Dichtefunktion $g_0(p) = 1$. Ist bis zum n-ten Schritt das Symbol „1“ x-mal aufgetreten, dann gilt für die Eingangsinformation die Bernoulli-Verteilung b(x/p):

$$b(x/p) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \tag{6}$$

Als a-posteriori Verteilung erhalten wir dann mit Hilfe des Satzes von Bayes:

$$g_n(p/x) = \frac{b(x/p) \times g_0(p)}{\int_0^1 b(x/p) \times g_0(p) dp} \tag{7}$$

Die a-posteriori Verteilung entsteht also durch multiplikative Verknüpfung der a-priori Verteilung mit der Eingangsinformation und einer anschließenden Normierung. Der Anfangszustand soll im vorliegenden Fall die Eigenschaft haben, dass die Wahrscheinlichkeit p für das Auftreten einer „1“ gleichverteilt ist. Dieser Anfangszustand wird durch die Eingangsinformation b(x/p) schrittweise verändert. Die Abweichungen von der Gleichverteilung bilden sich in der a-posteriori Verteilung ab.

$$g_n(p/x) = \frac{1}{B(x+1, n-x+1)} \times p^x \times (1-p)^{n-x} \tag{8}$$

mit $B(x+1, n-x+1) = \int_0^1 b(x/p) \times g_0(p) dp$

Für das Maximum dieser Betaverteilung erhalten wir im n-ten Schritt als Einfachheitskriteriumdie relative Häufigkeit:

$$p_{n\,max}(1) = \frac{x}{n} \tag{9}$$

Die aus der a-posteriori Verteilung bestimmbaren Momente sind komplizierter.

Auch für diesen einfachen Fall lässt sich festhalten: ein Einfachheitskriterium ist nach hinreichendem Training wirksam.

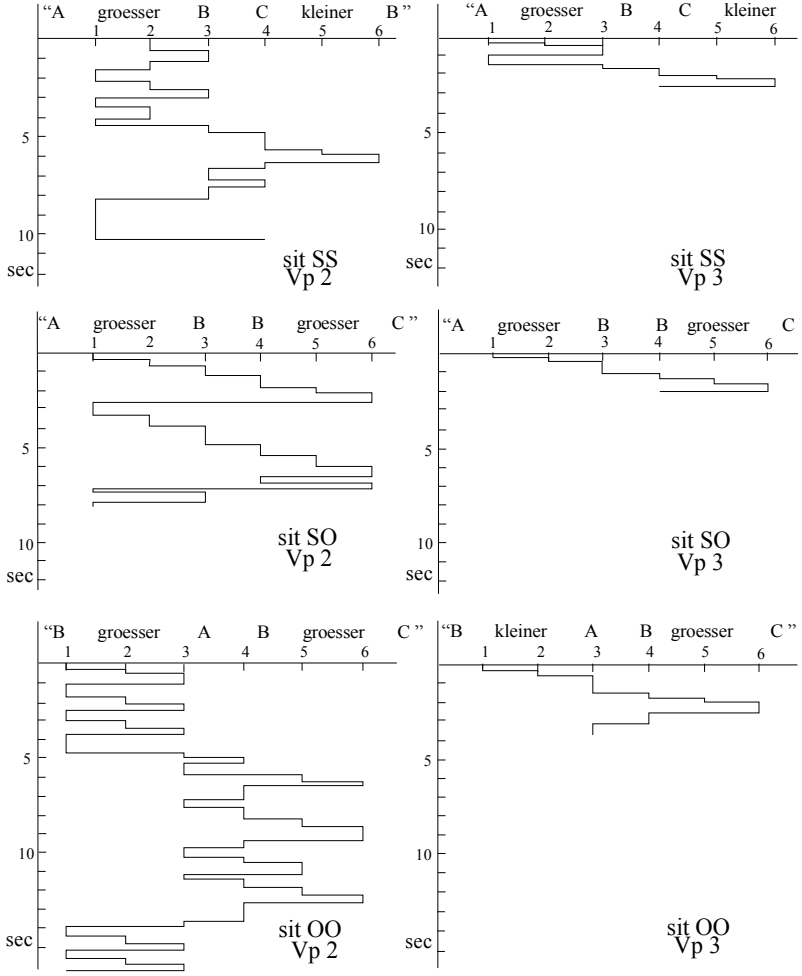


Abb. 4: Blickfixationssequenz (und Fixationsdauer) für zwei zufällig ausgewählte Versuchspersonen beim Verstehen der Sätze eines dreigliedrigen Ordnungsproblems. Erläuterungen im Text.

Die eindeutige Entscheidung über die Wirkung eines Einfachheitskriteriums ist bislang nur deshalb gelungen, weil für die angegebenen Beispiele eine ma-

thematische Beschreibung des Prozesses möglich war. Dies gilt natürlich nur für wenige Fälle in der menschlichen Informationsverarbeitung. Viele Anforderungen zeichnen sich dadurch aus, daß sie mathematisch nicht quantifizierbar sind, obwohl es noch elementare Anforderungen im Sinne der Variablenanzahl sind. Für solche Anforderungen können wir nur nach den Bedingungen fragen, unter denen eine „Anzahl" kleiner wird.

Minimale Anzahl von Blickfixationen beim Lesen: Zur Aufnahme und Verarbeitung von unbekannter Information muss jedes Zeichen (z.B. eines Wortes oder Satzes) – bei Nichtunterschreitung einer minimalen Fixationsdauer – mindestens einmal fixiert werden. Erhöhungen davon widersprechen einem Einfachheitsprinzip. Befunde aus der Leseforschung sprechen jedoch dafür, dass die Wirkung eines solchen Prinzips personenspezifisch und bedingungsabhängig ist. Die Abbildung 4 zeigt die Blickfixationssequenzen zweier Versuchspersonen beim Lesen eines Satzes „A ist größer als B. C ist kleiner als B.". Anschließend muss eine Frage beantwortet werden, z.B.: „Ist A größer als C?". Die Sätze wurden syntaktisch variiert:

SS: A ist größer als B. C ist kleiner als B.
SO: A ist größer als B. B ist größer als C.
OO: B ist kleiner als A. B ist größer als C.

Für die Buchstaben A, B und C wurden im Experiment Namen verwendet. Offensichtlich unterscheiden sich die Blickfixationssequenzen der Versuchspersonen beim Lesen (und Verstehen) der Sätze für deduktive Inferenzen gravierend. Während Versuchsperson 3 sich näherungsweise nach einem Einfachheitskriterium (minimale Anzahl) verhält, weicht Versuchsperson 2 deutlich davon ab. Dieser Unterschied findet sich auch bei allen syntaktischen Variationen.

Auch ist die Wirkung eines solchen Prinzips bedingungsabhängig. Heller (1982) hat seine Versuchspersonen einen Text aus 99 Dreibuchstabenworten lesen lassen und dabei die Anzahl der Blickfixationen unter vier Bedingungen gemessen:

- stummes Lesen
- inneres Sprechen
- mit leiser Stimme lesen
- mit lauter Stimme lesen.

Die folgende Tabelle zeigt die gemittelten Blickfixationsanzahlen (aus Heller, 1982).

	stummes Lesen	inneres Sprechen	leise Stimme	laute Stimme
Fix.-anzahl	8,8	10,3	12,8	13,1
Streuung	1,01	2,31	1,82	1,98

Beim lauten Lesen verdoppelt sich die Fixationsanzahl gegenüber dem stummen Lesen um mehr als 50 %. Ein universelles Kriterium muss diese Anforderungsabhängigkeit berücksichtigen.

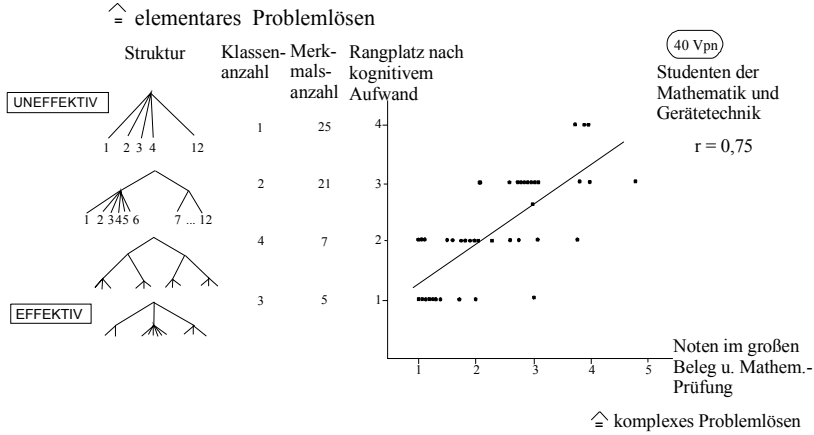


Abb. 5: Korrelativer Zusammenhang zwischen zu behaltenden Merkmalen intern ausgebildeter kognitiver Strukturen von Versuchspersonen beim Lösen transitiver Inferenzen und den Zensuren in ihrem konstruktiven Beleg und in ihren Mathematikprüfungen.

Minimale Anzahl von Merkmalen beim Behalten von Information: Bei der Lösung von Ordnungsproblemen (transitive Inferenzen) lässt sich zeigen, dass leistungsstarke Versuchspersonen gegebene Information so strukturieren, dass die Anzahl zu behaltender Merkmale ein Minimum wird, während leistungsschwache dies nicht tun. Um den Einfluss der Wissenskomponente auf die Ausbildung interner Repräsentationen zu unterdrücken, wurden transitive Inferenzen über einem Material gefordert, dass ohne Bezug zum Wissen konstruiert war, jedoch unterschiedlich einfache Strukturierungen zuließ. Die Anzahl der Merkmale, die für das Behalten der ausgebildeten internen Repräsentation erforderlich war, bestimmte als Maß für den kognitiven Behaltensaufwand (Sommerfeld, 1994) eine Rangordnung über von einzelnen

Versuchspersonen ausgebildeten internen Repräsentationen. Die Untersuchungen wurden an der TU Ilmenau und an der Mathematischen Fakultät der Universität Jena zusammen mit Erdmute Sommerfeld, Günther Höhne und Horst Sperlich durchgeführt (Krause, 2000). Die Abbildung 5 zeigt den korrelativen Zusammenhang zwischen den individuell intern ausgebildeten Repräsentationen beim Lösen transitiver Inferenzen und den Noten in ihrem konstruktiven Beleg (Studenten der TU Ilmenau) und in ihren Mathematikprüfungen (Studenten der Universität Jena). Wie Abbildung 5 zeigt, bilden die besten Studenten bevorzugt interne kognitive Strukturen mit einer kleinsten Anzahl von zu behaltenden Merkmalen aus. Damit ist die Frage nach der Wirkung eines Einfachheitskriteriums in der menschlichen Informationsverarbeitung nicht nur anforderungsabhängig sondern auch personenspezifisch zu beantworten.

Die Bedingungsabhängigkeit des Einfachheitsprinzips lässt sich auch im Problemlösungsprozess nachweisen. Die Anzahl der Blickfixationen beim Lösen eines Zerlegungsproblems ist nicht generell minimal, vielmehr ist die Anzahl von der Zielerreichungswahrscheinlichkeit abhängig (Krause, 2000). Bei hoher Zielerreichungswahrscheinlichkeit, d.h. bei geringem Zielabstand ist die Anzahl gering, bei geringer Zielerreichungswahrscheinlichkeit, d.h. bei großem Ziel – und Anfangsabstand dagegen hoch. Es macht Sinn, bei geringer Zielerreichungswahrscheinlichkeit mehr Information aufzunehmen als bei hoher Wahrscheinlichkeit. Der Bezug zum Beitrag von Gerhard Banse „… so genau wie nötig.“ (Banse, in diesem Band) drängt sich auf.

Die Verringerung einer *Anzahl* bringt natürlich auch Nachteile mit sich: beim analogen Schließen sind drei Operationen notwendig: Relationenerkennung, Relationenübertragung und Relationenanwendung. Patienten mit schizophrenen Denkstörungen reduzieren diese Anforderungsbewältigung auf eine Operation: Relationenanwendung und machen auf diese Weise Fehler beim analogen Schließen. Über diesen gestörten Denkprozess ist hier schon einmal berichtet worden (Krause, 2006).

Ein erstes Fazit: menschliche Informationsverarbeitung orientiert sich an einem *Einfachheitskriterium*, jedoch anforderungsabhängig und personenspezifisch.

2. Die Wirkung des Einfachheitsprinzips bei komplexen Anforderungen

Bei der Lösung komplexer Probleme ist der Nachweis der Wirkung eines Einfachheitsprinzips bisher nicht streng möglich. Dennoch lassen sich Tendenzen der Vereinfachung zeigen, wobei besonders zwei sich zunächst wider-

sprechende Vorgehensweisen (Einschränkung bzw. Erweiterung um einzuschränken) zu beobachten sind.

Bevor ich auf die Vorgehensweisen näher eingehe, möchte ich die Fragestellung aus der Sicht der Denkpsychologie besser begründen.

Das Aufgreifen einer solchen Thematik geschah zunächst unter einem ganz anderen Aspekt und ist auf einen äußeren Anlass zurückzuführen. Im Sommer 1987 fand am Rande einer Tagung an der Akademie der Wissenschaften der DDR in Berlin ein Gespräch mit Dietrich Dörner statt. Am Ende dieses Gespräches war man sich einig: Zwischen dem komplexen und dem elementarenProblemlösen sollten Brücken geschlagen werden. Dies wurde umso dringender empfunden, weil die bisherige Bezugsetzung zwischen den komplexen Problemlöseleistungen und den Intelligenzquotienten wenig Aufklärendes gebracht hatte. Die Idee war geboren, doch wie sollte diese Fragestellung behandelt werden? Es musste ein neuer Weg gesucht werden.

Uwe Kotkamp (Kotkamp, 1999) von der Universität Jena hat sich dieser Fragestellung angenommen. Er ging von der einfachen wie überzeugenden Überlegung aus, dass Forschungsstrategien, die in anderen Disziplinen unseres Faches zu einer erfolgreichen Prozessaufklärung geführt haben, in analoger Weise auf Problemlösen übertragen werden können. So ist bereits im vorvorigen Jahrhundert die Psychophysik mit ihrer Grundsatzfrage nach Invarianzleistungen zu einer wissenschaftlich hoch anerkannten Disziplin geworden, weil mit dieser Forschungsmethodik Reproduzierbares mit generellem Anspruch erarbeitet worden ist. Eine entsprechende Vorgehensweise war im vergangenen Jahrhundert in der Gedächtnispsychologie zu beobachten. Jene Gedächtniseigenschaften und -prozesse sind besonders erforscht worden, die gegenüber Materialvariation invariant waren. Außerhalb dieses Trends der Prozess- und Strukturanalyse ist die Entwicklung in der Denkpsychologie gelaufen. Hier dominierte eine Systematik nach Anforderungsklassen. Eine Prozessanalyse war nur in Ansätzen zu erkennen. Dort, wo sich solche Ansätze abzeichneten, wie etwa bei der Steuerung von Suchprozessen mittels Bewertungsfunktionen waren die Ansätze aus der Forschung zur Künstlichen Intelligenz importiert.

Es musste ein Problem geklärt werden: Gegenüber welchen Messgrößen sollte die Invarianz der Anforderungstransformation postuliert werden? Mit anderen Worten: Welches sollten die entscheidenden Größen menschlicher Informationsverarbeitung beim Denken sein, die bei Transformation der Anforderung invariant bleiben? Zur Beantwortung der Frage griff Uwe Kotkamp auf die Traditionen der Denkpsychologie zurück, wie sie seit Karl Duncker

gepflegt werden: die abhängigen, den Lösungsprozess determinierenden Variablen mussten intern repräsentierte Größen sein. Der Autor baute dabei auf Ergebnissen auf, wie sie an der Humboldt-Universität zu Berlin und an der Akademie der Wissenschaften der DDR in Berlin erarbeitet worden sind. Kognitive Strukturen und kognitive Operationen wurden als Indikatoren eingesetzt, mit denen Funktionsprinzipien wie das der Aufwandsreduktion messbar gemacht werden konnten. Für elementare Problemlöseprozesse war dies vergleichsweise einfach, für komplexe Problemlöseprozesse außerordentlich schwierig.

Kotkamp untersuchte vier Größen und konnte für drei Größen die Invarianzeigenschaft zeigen. Als elementare Probleme wurden Ordnungsprobleme verwendet, als komplexe Probleme die von Dörner entwickelten Systeme „Moro“ und „Feuer“. Während die elementaren Probleme gut strukturiert sind, trifft dies nicht für die komplexen Probleme zu. Die elementaren Probleme sind realitätsfern, die komplexen sind realitätsnah. Es lassen sich noch weitere Gegensätze dieser Problemklassen anführen. Trotzdem konnten für diese Problemklassen invariante Größen angegeben werden.

Zuerst aber zur nicht invarianten Größe: Kotkamp zeigt, dass die Lösungsgüte entgegen der Erwartung keine invariante Größe ist, sie scheidet als Indikator zur Messung geistiger Leistungen aus. Für drei Prozessgrößen findet der Autor dagegen Hinweise auf Anforderungsinvarianz: dies betrifft die Aufwandsreduktion, das Informationsverhalten und die Flexibilität. Ich gehe nur auf die Aufwandsreduktion ein. Ausgangspunkt dieser Überlegung ist, dass ein Aspekt menschlichen Denkens auf Vereinfachung gerichtet ist. Vereinfachung lässt sich dadurch erreichen, dass die Anzahl kognitiver Operationen oder die Anzahl zu behaltender Merkmale u.a. verringert wird. Diese Komplexitätsreduktion wird durch Klassenbildung ermöglicht. Die Versuchspersonen bilden beim Lösen von Problemen Klassen so, dass die Anforderungsbewältigung vereinfacht wird. Mit einer geeigneten operationalen Definition des kognitiven Aufwandes (Sommerfeld, 1994) lässt sich diese Komplexitätsreduktion als Aufwandsreduktion auffassen. Sie wird als Ordnungsbildung im Denken bezeichnet. Vor diesem Hintergrund ist plausibel, dass derjenige, der beim Lösen eines Ordnungsproblems die einfachsten Klassen bildet, um den Aufwand zu reduzieren, dies auch beim Lösen eines komplexen Problems tut. Diese „Verdichtung“ von Information ist eine Eigenschaft, die menschliches Denken charakterisiert, unabhängig davon, welches spezifische Problem gelöst wird. Analoges gilt für die beiden anderen Größen: Informationsverhalten und Flexibilität. Es ist wahrscheinlich gewor-

den, dass sich kognitive Funktionsprinzipien als anforderungsinvariant nachweisen lassen. Für die Diagnostik interessant ist die individuelle Spezifität dieses Ergebnisses. Die wissenschaftliche Leistung, die hinter einem solchen Ergebnis steckt, wird noch dadurch unterstrichen, dass die Forschung zu kognitiven Stilen in der traditionellen Psychologie diese Frage zu beantworten versuchte, jedoch kein überzeugendes Ergebnis bisher vorgelegt hat.

Ich habe die Einordnung dieser Fragestellung deshalb so ausführlich vorgenommen um zu zeigen, dass die Frage nach einem Einfachheitsprinzip bei komplexen Anforderungen die logische Konsequenz aus der bisherigen traditionellen Entwicklung der Problemlöseforschung darstellt. Zur Behandlung bieten sich zwei Wege an, in die „Breite“ oder in die „Tiefe“ zu gehen. Der „Breiten“-weg betrifft die Generalisierung über alle wissenschaftlichen Disziplinen und wird mit diesem Arbeitskreis in Angriff genommen. Der „Tiefen“-weg betrifft eine neue Mathematik für die menschliche Informationsverarbeitung, wie sie Klix (2004) fordert und Dörner (2002) mit seiner für das Mentale angepassten Logikform im Ansatz versucht. Doch zurück zu den Vorgehensweisen der Vereinfachung.

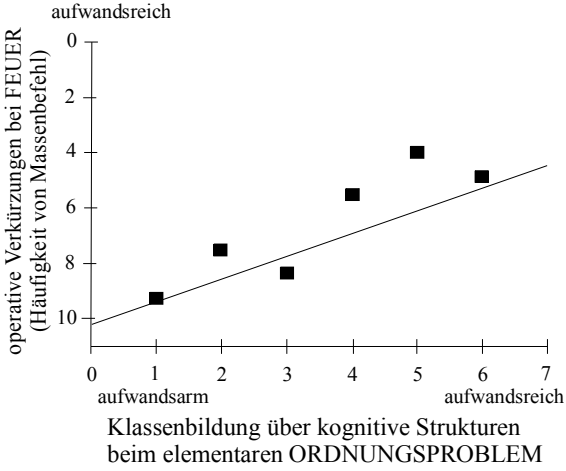


Abb. 6: Aufwandsreduktion durch Klassenbildung über Prozeduren (mittlere Häufigkeit von Massenbefehlen) beim komplexen Problemlösen FEUER in Abhängigkeit von der Aufwandsreduktion durch Klassenbildung über kognitiven Strukturen beim elementaren Ordnungsproblem nach Kotkamp (1999).

Einschränkung einer Anzahl von Operationen durch Klassenbildung und damit Verkürzung der Lösungszeit: Beim komplexen Problemlösen bzw. bei

Problemen der Handlungsregulation (z.B. Dörner's „Feuer": Die Versuchsperson muss den Feuerwehreinsatz bei einem Waldbrand leiten (Dörner &Schoppek (1987), Dörner (1989), Dörner & Pfeifer (1992)), kann die Lösungsgüte (Anzahl nicht abgebrannter Bäume) durch Makrobildung über Operationen erhöht und dadurch die Lösungsschrittanzahl reduziert werden. Diese Vereinfachung durch Klassenbildung weist Kotkamp (1999) sowohl für das komplexe als auch für das elementare Problemlösen nach. Die Abbildung 6 zeigt diesen korrelativen Befund. Er findet, dass Versuchspersonen, die beim elementaren Problemlösen durch Klassenbildung eine Anzahl von Merkmalen verringern, beim komplexen Problemlösen durch Klassenbildung auch eine Anzahl von Operationen verringern. Die Tendenz zur Vereinfachung ist personenspezifisch im elementaren wie im komplexen Problemlösen nachgewiesen. Dessen ungeachtet ist es aber bislang nicht möglich gewesen zu zeigen, dass dieser komplexe Prozess der Handlungsregulation etwa durch ein Minimalprinzip in dem oben betrachteten systemtheoretischen Sinn gesteuert würde.

Erweiterung einer Anzahl verfügbarer Operationen und Auswahl jener mit der kürzesten Lösungszeit: Beim mathematischen Problemlösen (z.B.: „Wieviele Diagonalen hat ein 23-Eck?", Heinrich (1997, 2004)) kann die Verkürzung der Lösungszeit mathematisch Hochbegabter auf die Ausbildung einer Doppelrepräsentation und damit auf die Zurverfügungstellung einer größeren Anzahl von Operationen in unterschiedlichen Modalitätsbereichen zurückgeführt werden. So z.B. kann man ein mathematisches Problem durch Rechnen und durch bildhafte Vorstellungen lösen. Experimentalpsychologische und neurowissenschaftliche Befunde dazu wurden hier bereits vorgetragen (Krause, 2006). Aus gedächtnispsychologischen Untersuchungen (Paivio, 1974) ist die Nutzung der Doppelrepräsentation zur Vereinfachung der Lernleistung bekannt. Auch die Begründung der außergewöhnlichen Leistungen von Savants (z.B. Daniel Tammet: Erlernen einer Sprache in einer Woche, Tammet (2009)) stützt sich auf die Ausbildung einer Doppelrepräsentation, die weitaus größere Vernetzungen erlaubt als eine einfache Repräsentation. Die Annahme einer Doppelrepräsentation zur Erklärung außergewöhnlicher Leistungen findet sich auch in anderen Bereichen. Die Befundlage geht dabei jedoch über subjektive Beschreibungen nicht hinaus.

Ein zweites Fazit: Strategien der Vereinfachung (Einschränkung und Erweiterung) könnten Gegenstand weiterführender Diskussionen sein.

3. Der Informationsverarbeitungsprozess

Bisher haben wir Größen experimentell eingeführt und danach gefragt, ob Versuchspersonen bei der Anforderungsbewältigung solche Größen nach einem mathematischen Kriterium minimieren, ob Anzahlen kleiner werden und von welchen Bedingungen dies abhängt. So wurde der Nachweis der Verhaltenswirksamkeit des Einfachheitsprinzips geführt.

Jetzt fragen wir nach einem Einfachheitsprinzip für den menschlichen Informationsverarbeitungsprozess selbst. Damit werfen wir die Frage nach der Gestaltung auf, müssen aber nach dem heutigen Kenntnisstand die Forderung nach Formalisierung des Prozesses und nach mathematischer Definition eines Einfachheitskriteriums vorerst aufgeben und noch spekulativ bleiben.

Neuere Vorstellungen über menschliche Informationsverarbeitung gehen davon aus, dass die Anzahl kognitiver Elementareinheiten relativ klein ist und dass eine Vielzahl von komplexen Anforderungen durch Kombination von nur wenigen kognitiven Elementareinheiten bewältigt werden kann. Klix (1992) führt für Denk – und Sprachprozesse das Postulat einer mentalen Grammatik ein, die auf *sechs – also nur auf einer sehr geringen Anzahl von – kognitiven Operationen* basieren soll: Aktivation, Inhibition, Substitution, Transformation, Projektion und Inversion. So könnten z.B. Problemlösestrategien aktiviert und anschließend alle bis auf eine inhibiert werden.Aktivations– und Inhibitionsprozesse weist Roth (1990) nach. Die kognitiven Operationen werden von Klix (1992) fünffach begründet. Und weiter heißt es an anderer Stelle bei Klix (1992): „Dies wäre schon eine fantastische Geschichte, wenn sich die Elementarprozesse bei einfachen Lernleistungen auch als Grundlage flexiblen Denkens entpuppten.“. Ein verführerischer Gedanke: In der Evolution sollte sich eine solche Entwicklung vollzogen haben, dass die unterschiedlichsten Anforderungsbewältigungen wie Lernen, Sprachverarbeitung, Denken, …, auf den gleichen kognitiven Prozessen basieren. Erste Modellrechnungen legen den Gedanken nahe, dass nur ein kleiner Teil dieser sechs kognitiven Operationen im Informationsverarbeitungsprozess tatsächlich genutzt wird.

Aus der Analyse zum mathematischen Problemlösen hat Seidel in ihrer Dissertation (Krause, Seidel, Heinrich (2003), Seidel (2004)) mit Hilfe einer von Schack (1997, 1999) entwickelten EEG-Kohärenzanalysemethode und der von Lehmann (1987) entwickelten Idee der Identifikation von Mikrozuständen zeigen können, dass näherungsweise *sechs – also nur eine sehr geringe Anzahl von - Mikrozuständen* topographisch unterscheidbar sind. Trotz Variation der Anforderung treten (individualspezifisch die gleichen oder ex-

trem ähnliche) wenige Aktivationsmuster auf. Unterstellt man, dass diese topographisch unterscheidbaren EEG-Kohärenzmuster kognitive Prozesse widerspiegeln, so drängt sich der Gedanke auf, dass sich unterschiedliche Anforderungsbewältigungen in unterschiedlichen Sequenzen – gleichsam wie bei einem Alphabet – von nur wenigen Elementarbausteinen abbilden lassen.

Ein solcher Prozess bleibt mit wachsender Komplexität der Anforderungen einfach.

Wie aus den Beispielen deutlich werden sollte, betrachten wir Einfachheit – im Gegensatz zu einer traditionellen systemtheoretischen Auffassung, bei der Einfachheit vorzugsweise nur als Eigenschaft von Systemen und nicht von Signalen betrachtet wird – als universelle Größe, die keiner Einschränkung unterliegt. Diese Erweiterung ist zwingend, wenn Einfachheit interdisziplinär betrachtet werden soll. Die systemtheoretische Auffassung setzt Kenntnis über das zu betrachtende System voraus. In den meisten Disziplinen ist diese Forderung nur ungenügend erfüllt.

Einfachheit soll ohne jede Beschränkung für viele Disziplinen gelten. Das verlangt eine Definition. Die Wissenschaftsgeschichte hat uns am Beispiel des Begriffes „Ordnung“ gelehrt, dass und wie dies möglich ist. Die Physiker fassen Ordnung als Gegensatz zu Unordnung auf, die Mathematiker Ordnung als Anordnung. Beiden gemeinsam ist die Zuordnungvon „etwas“ zu „etwas“. Erst die inhaltliche Verständigung über diesen Begriff „Ordnung“ ermöglichte die exakte mathematische Fassung.

Aufgabe des Arbeitskreises sollte es sein, sich auf eine disziplinübergreifende Definition der Einfachheit zu verständigen, die selbst möglichst einfach ist.

Literatur

Banse, G. (2010). „Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig!“ Das Einfachheitsprinzip in den Technikwissenschaften. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 108.* Berlin: trafo Verlag, 93-104.

Claus, Th. (2006). *Der geschmiedete Himmel.* DVD. Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt. Landesmuseum für Vorgeschichte. Berlin: Medienproduktion.

Dörner, D. (1989). *Die Logik des Mißlingens.* Hamburg: Rowohlt.

Dörner, D. &Schoppek, W. (1987). Feuer. Computersimulation zur Ausbreitung und Bekämpfung von Waldbränden. *Universität Bamberg. Lehrstuhl Psychologie II, Turbo-Pascal-Programm.*

Dörner, D. & Pfeifer, E. (1992). Strategisches Denken, Stress und Intelligenz. *Sprache und Kognition, 11, 75-90.*

Dörner, D. (2002). *Die Mechanik des Seelenwagens*. Bern: Huber.

Geissler, H.-G. (1991). Zeitcodekonstanten – ein Bindeglied zwischen Psychologie und Physiologie bei der Erforschung kognitiver Prozesse? Hypothesen und Überlegungen zu Quantenstrukturen in der Alphaaktivität des Gehirns. *Zeitschrift für Psychologie*, *199,* 121-143.

Gundlach, W., & Schulz, G. (1987). Ist die Effektivität von Problemlösungen aus Diskussionen voraussagbar? *Psychologie für die Praxis*, *4,* 350-368.

Gundlach, W., & Schulz, G. (1990). Kognitive und kommunikative Komponenten des Problemlösens in kleinen Gruppen. *Dissertation*, Institut für Psychologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Hassenstein, B.& Reichardt, W. (1956): Systemtheoretische Analyse der Zeit-, Reihenfolgen- und Vorzeichenauswertung bei der Bewegungsperzeption des Rüsselkäfers *Chlorophanus*. *Z.Naturforschung,*11b, 513-524.

Heinrich, F. (1997). Mündliche Mitteilung.

Heinrich, F. (2004). *Strategische Flexibilität beim Lösen mathematischer Probleme.*Hamburg: Kovac.

Heller, D. (1982).Eye Movements in Reading.In R. Groner& P. Fraisse (Eds.).*Cognitionand Eye Movements*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 139-154.

Hörz, H. (2010). Philosophischer Reduktionismus oder wissenschaftlich berechtigte Reduktionen? Zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen des Prinzips Einfachheit. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 108.* Berlin: trafo Verlag, 11-36..

Klix, F. (1971). *Information und Verhalten.* Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Klix, F. (1992). *Die Natur des Verstandes.* Göttingen: Hogrefe.

Klix, F. (1993). *Erwachendes Denken.* Heidelberg: Spektrum.

Klix, F. (2004). Information in Evolution und Geschichte. In B. Krause und W. Krause (Hrgb.), *Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften.* Abhandlungen der Leibniz-Sozietät. 12. Berlin: trafo, 27-48.

Kotkamp, U. (1999).*Elementares und komplexes Problemlösen. Über Invarianzeigenschaften von Denkprozessen.* Lengerich: Papst.

Krause, W. (1970). Untersuchungen zur Komponentenanalyse in einfachen Problemlöseprozessen. *Zeitschrift für Psychologie*, *177,* 199-249.

Krause, W. (2000). *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht.* Göttingen:Hogrefe.

Krause, W. (2006). Außergewöhnliche menschliche Informationsverarbeitung. – Extremgruppenvergleiche –. www.leibniz-sozietaet.de/ leibniz-online, 2/2006.

Krause, W., Seidel, G. & Heinrich, F. (2003). Über das Wechselspiel zwischen Rechnen und bildhafter Vorstellung beim Lösen mathematischer Probleme. *Der Mathematikunterricht, 6*, 50-62.

Krause, W. & Seidel, G. (2004). Biologische Grundlagen des Verstandes. In B. Krause & W. Krause (Hg.), *Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften*. Abhandlungen der Leibniz-Sozietät. 12. Berlin: trafo, 189-214.

Lehmann, D.,Ozaki, H.& Pal, I. (1987). EEG alpha map series: brain micro-states by space-oriented adaptive segmentation. *Electroencephalogr.Clin.Neurophysiol.*, *67,* 271-288.

Müller, S. (2010). Einfachheit biochemischer Komplexität – ein Widerspruch?.*Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 108.* Berlin: trafo Verlag, 57-65.

Paivio, A. (1974). Spacing of repetitions in the incidental and intentional free recall of pictures and words.*Journal of verbal learning and verbal behavior*, *13,* 497-511.

Petzold, P. (1992). Context effects in judgments of attributes: An information-integration approach. In H.-G.Geissler& S. Link (Eds.), *Cognition, information processing and psychophysics: Basic issues.*Hillsdale, NJ: Erlbaum, 175-205.

Roth, N., Heine, A., Borkhardt, A., König, T., &Knye, M. (1990). Die Aktivierung gespeicherter Information - Versuch einer psychophysiologischen Analyse des Gedächtnisabrufes. Vortragsmanuskript, Lerntagung an der Universität Halle.

Rothe,H.-J. (1992). Charakteristik menschlicher Dekodierungsleistungen zur Ermittlung von handlungsrelevanten Informationen. *Zeitschrift für Psychologie, 200*, 269-286.

Schack, B. (1997). Adaptive Verfahren zur Spektralanalyse Instationärer Mehrdimensionaler Biologischer Signale. *Habilitationsschrift*, Technische Universität Ilmenau.

Schack, B. (1999). Dynamic Topographic Spectral Analysis of Cognitive Processes. In Ch. Uhl (Ed.), *Analysis of Neurophsyiological Brain Functioning.* Berlin, Heidelberg, New York:

Seidel,G. (2004). *Ordnung und Multimodalität im Denken mathematisch Hochbegabter: sequentielle und topologische Eigenschaften kognitiver Mikrozustände.* Berlin: WVB.

Sommerfeld, E. (1994). *Kognitive Strukturen.* Münster: Waxmann.

Tammet, D. (2009). *Wolkenspringer*. Düsseldorf: Patmos.

Timpe, K.-P. (1968). Ansätze zur Modellierung eingeübter sensomotorischer Prozesse (Das Regelverhalten des Menschen). In Klix, F. (Hrgb.). Kybernetische Analysen geistiger Prozesse. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 106-136.