



Werner Krause

## Invarianzeigenschaften in der menschlichen Informationsverarbeitung<sup>1,2</sup>

Unter Invarianz verstehen wir das sich nicht Verändern einer Größe, wenn eine andere Größe oder ein Parameter verändert werden.

Etwa ab der Mitte der sechziger Jahre des vorigen Jahrhunderts bildete die Formalisierung geistiger Prozesse einen Schwerpunkt in der Elementaranalyse der menschlichen Informationsverarbeitung. Dies drückte sich nicht nur in der Anzahl von Handbüchern zur Mathematischen Psychologie aus sondern auch inhaltlich in der Art und Weise zu fragen, wobei die Analogie zur Physik nicht zu übersehen war. Vor dem Hintergrund dieser speziellen Forschungsintensität spielte die Frage nach der Invarianz eine wichtige Rolle, denn diese Art zu fragen hatte in den Naturwissenschaften entscheidend zur Theorienbildung beigetragen. Warum sollte diese Art zu fragen nicht auch in der menschlichen Informationsverarbeitung erfolgreich sein, zumal dieses Gebiet zu den Naturwissenschaften gezählt wurde.

Grundprinzipien dieser Art standen im Brennpunkt zur Erforschung der menschlichen Informationsverarbeitung, wie sie in der 2. Hälfte des vorigen Jahrhunderts in der Klix-Schule und zugleich an anderen Universitäten wie z.B. Aachen, Bamberg, Bern, Dresden, Düsseldorf, Göttingen, Jena, Leipzig und Salzburg betrieben wurden, wobei hier eine Beschränkung auf den deutschsprachigen Raum erfolgt. Drei dieser Grundprinzipien hatten wir besondere Aufmerksamkeit geschenkt: Vereinfachung, Flexibilität kognitiver Strukturen und Invarianz. Als Untertitel habe ich sie in meinem Buch „Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht“ angeführt. Über Vereinfachung und Flexibilität in der kognitiven Strukturierung ist in der Leibniz-Sozietät von Mitgliedern der Klix-Schule wiederholt vorgetragen worden (Krause, B., 2014a, 2014b; Krause, W. 2000b, 2011; Krause, W. und Seidel 2004; Rothe, 2012; Sommerfeld, 2009, 2010; Sprung und Sprung, 2010; Sommerfeld und Krause, 2013). Zum Grundprinzip der Invarianz wollen wir hier ein Resümee ziehen. Dabei wird zu zeigen sein, dass eine anfänglich überoptimistische Erwartung einer relativ nüchternen Ergebnisbetrachtung gewichen ist.

### 1. Invarianz in drei Teildisziplinen der menschlichen Informationsverarbeitung

Wir beschränken uns hier auf die Teilgebiete Wahrnehmung, Gedächtnis und Denken.

#### 1.1. Wahrnehmung

In der Psychophysik ist das Phänomen der Größenkonstanz seit mehr als 100 Jahren sehr gründlich untersucht worden. Dieses Phänomen beschreibt die Beziehung zwischen dem Netzhautbild und dem Urteil einer Versuchsperson über die Größe eines Gegenstandes bei Variation der Distanz. Nach dem Strahlensatz verändert sich mit Distanzänderung die Größe des Netzhautbildes. Dagegen bleibt das Urteil einer Versuchsperson über die Größe des Gegenstandes – in einem bestimmten Distanzbereich der Variation – konstant. Das Urteil ist also invariant gegenüber der Abstandsvariation. Zumindest gilt das für eine Abstandsvariation bis zu ca. 17 Metern. Diese Invarianzeigenschaft der menschlichen Informationsverarbeitung ist gültig, aber eben nur für eine Teilstrecke, also nicht generell.

<sup>1</sup> Herbert Hörz zum 80. Geburtstag gewidmet.

<sup>2</sup> Mathias Brosz danke ich für die Unterstützung bei der Datenverarbeitung. Mein Dank gilt auch Gerd Lürer, Peter Petzold und Erdmute Sommerfeld für kritische Anmerkungen und Ergänzungen.

## 1.2. Gedächtnis

Das Einspeichern und Wiederabrufen (oder das Behalten und Erinnern) von Information ist mit dem Sternbergparadigma ausführlich untersucht worden: Einer Versuchsperson werden Zeichen aus einer Menge von Zeichen sequentiell dargeboten. Anschließend wird ein Zeichen gezeigt und die Versuchsperson muss entscheiden, ob das Zeichen in der vorher gezeigten Menge von Zeichen enthalten war. Gemessen werden Fehler und Antwortzeiten. Gefragt wurde nun, ob das Prinzip dieses Gedächtnisprozesses ( je mehr, umso schneller ) von der Variation des Materials unabhängig, also gegenüber Materialtransformation invariant ist. Cavanagh (1972) findet eine lineare Beziehung zwischen der Gedächtnisspanne  $g$  und der Abtastzeit  $s$  pro Zeichen, die zunächst als Geradengleichung

$$y = a * x + b \quad (1)$$

und speziell als

$$s = a * 1/g + b \quad (2)$$

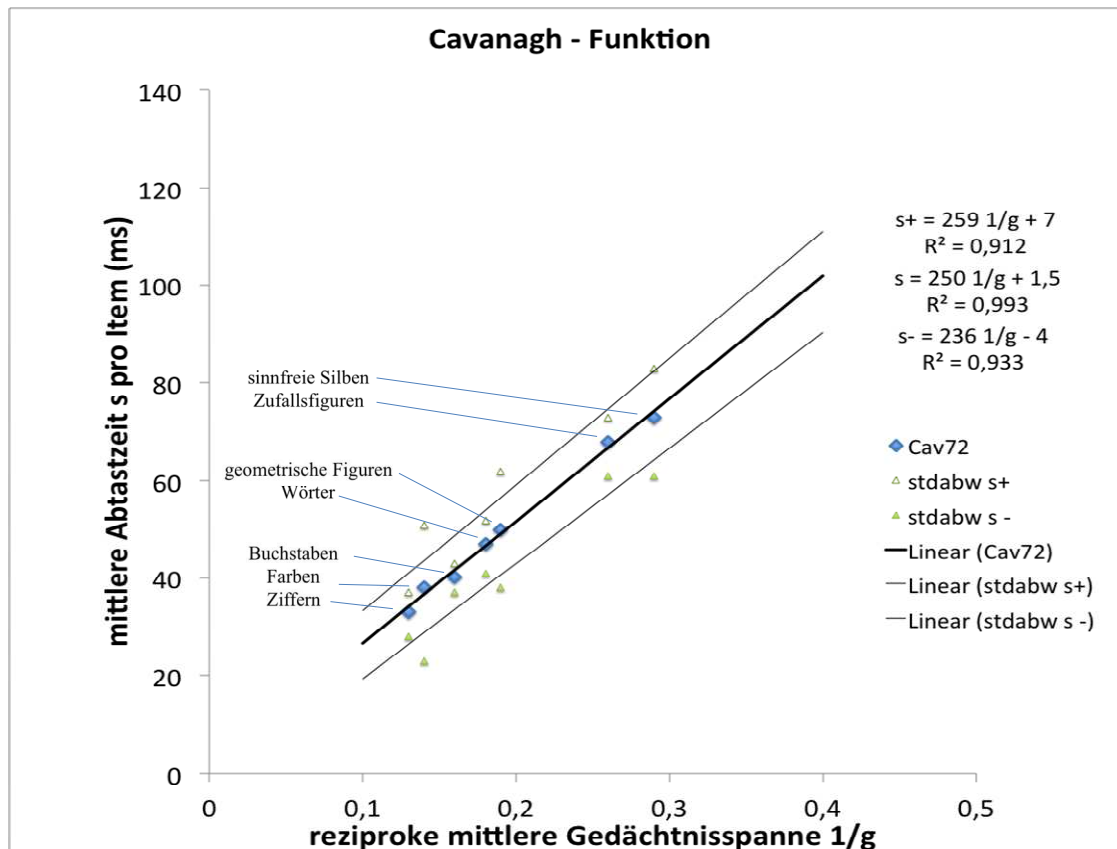
geschrieben werden kann. Nach Anpassung erhält er

$$s = 250 * 1/g + 1,5 \quad (3)$$

mit der Anpassungsgüte  $R^2 = 0,993$ , die er aus einer Vielzahl von zuvor publizierten Daten ableitet. Die Reizmaterialvariation von Ziffern über Farben, Buchstaben usw. bis zu Zufallsmustern und sinnfreien Silben ist dabei Parameter. Vernachlässigen wir den konstanten Term in (1), dann gilt für den Anstieg

$$a = s * g = C \quad (4)$$

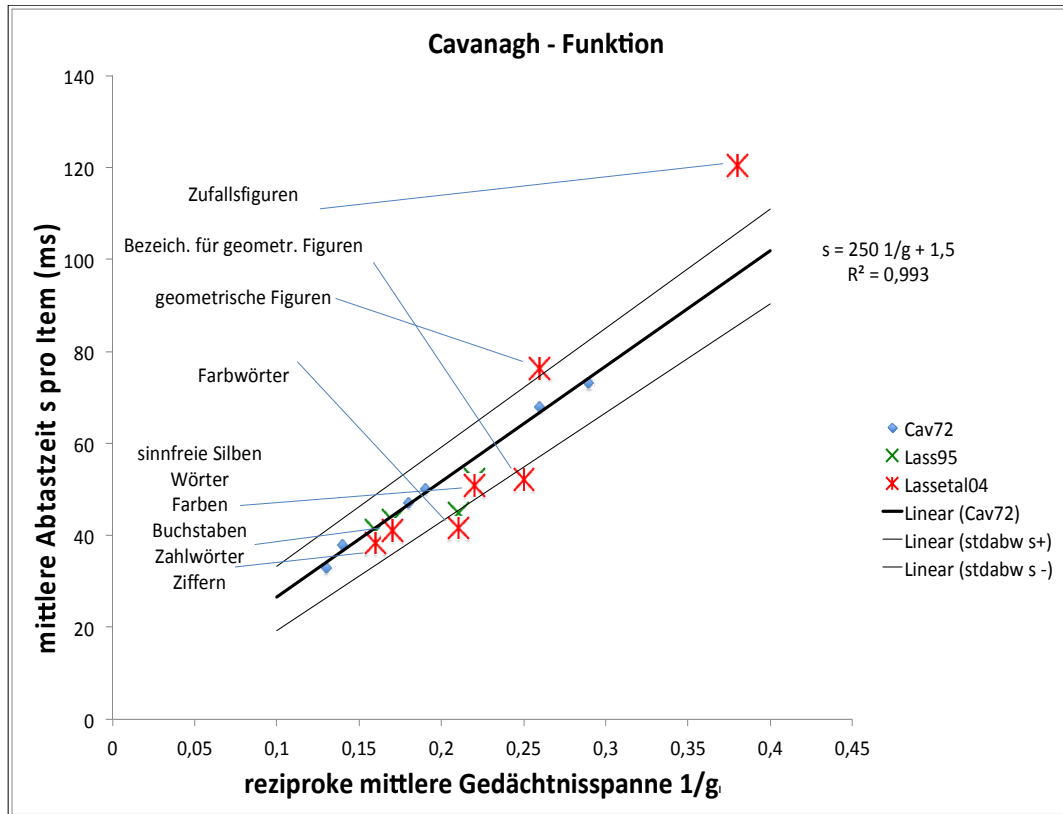
Der Anstieg  $a$  ist als Cavanagh-Konstante  $C$  in die Literatur eingegangen. In Abbildung 1 ist die Cavanagh-Funktion  $s$  über  $1/g$  dargestellt. Aus der durch Anpassung bestimmten Funktion folgt das Prinzip des Prinzips des Einspeicherungs- und Abrufprozesses: Je grösser die Gedächtnisspanne ist, je mehr also behalten wird, umso schneller erfolgt der Abtastprozess und umgekehrt: je kleiner die Gedächtnisspanne ist, je weniger Zeichen gespeichert werden, umso langsamer werden sie abgetastet. Die Abtastzeit ist also keineswegs immer die gleiche sondern vielmehr von der materialspezifischen Anzahl der in der Gedächtnisspanne gespeicherten Zeichen abhängig.



**Abbildung 1:** Die Beziehung zwischen der Abtastzeit  $s$  pro Zeichen (ms) in der Sternbergaufgabe und der reziproken Gedächtnisspanne für sieben Reizkategorien ( $R^2 = 0,993$ ). (Cavanagh, 1972).

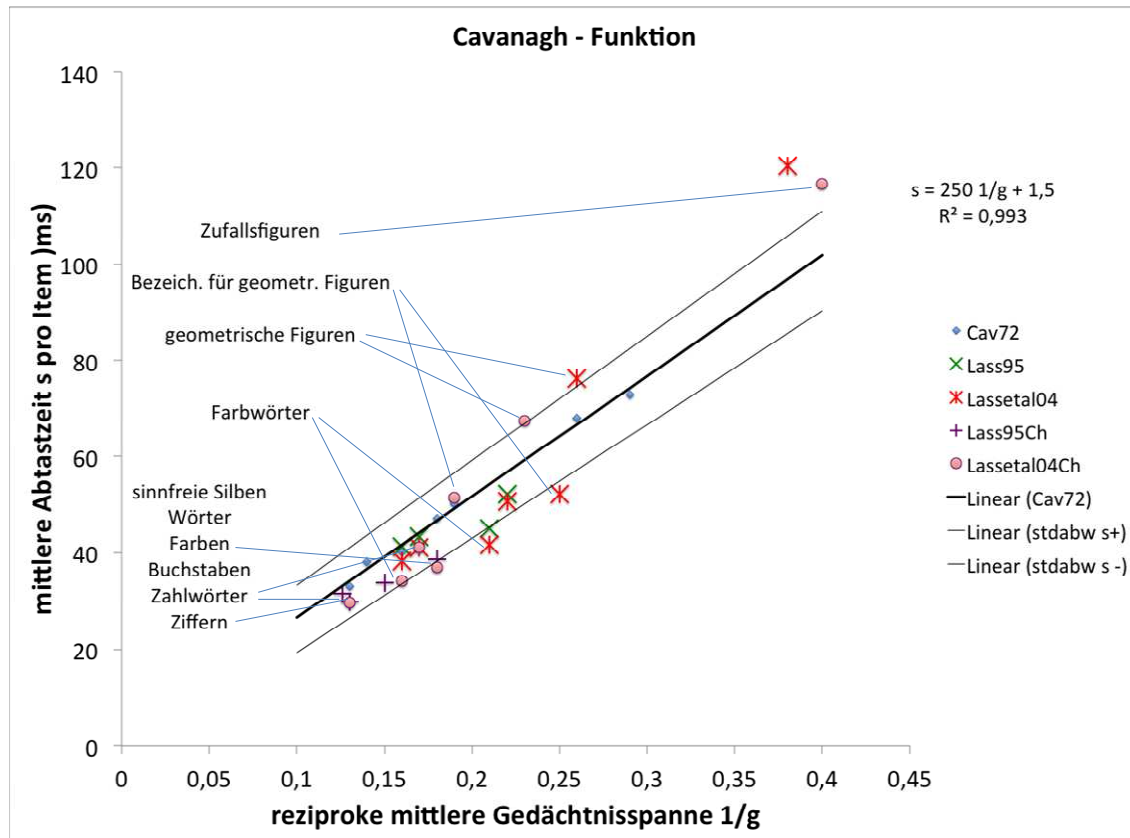
Nun haben Lass (1995), Lass et al (2004) sowie Lüer und Lass (2012) für eine große Variation des Reizmaterials gezeigt, dass die Cavanagh – Konstante  $C$  keineswegs konstant ist. Für verschiedene Reizmaterialien erhalten sie  $C$  – Werte zwischen 190 ms und 354 ms und weisen damit die Cavanagh – Konstante als eine universelle und materialunabhängige Konstante zurück.

Trägt man in Abbildung 1 die von Lass (1995) und Lass et al (2004) gefundenen Werte in das Cavanagh - Diagramm ein und kennzeichnet dazu die einzelnen Messpunkte für die Materialien, dann ergibt sich Abbildung 2. In dieser Abbildung 2 ist auffällig, dass



**Abbildung 2:** Die Beziehung zwischen der Abtastzeit  $s$  pro Zeichen (ms) in der Sternbergaufgabe und der reziproken Gedächtnisspanne für die von Lass (1995) und Lass et al (2004) verwendeten sieben Reizkategorien. Die Cavanagh – Funktion (Cav72) (Cavanagh, 1972) ist mit eingezeichnet, ebenso die in den Originalarbeiten verwendeten Reizkategorien.

einige Messwerte außerhalb des Streubereiches liegen, wie er von Cavanagh angegeben wurde. Das gilt für Zufallsfiguren, Bezeichnungen geometrischer Figuren, geometrische Figuren und auch Farbwörter. Dies begründet die Zurückweisung. Andererseits liegen aber einige Messpunkte innerhalb des Streubereiches. Das betrifft Ziffern, Zahlwörter und Farben. Wörter und sinnfreie Silben aus der Original-Cavanagh-Funktion liegen ebenfalls in diesem Bereich. Sollte sich diese Messung bestätigen, müsste auch für Gedächtnisprozesse von einer Invarianz nur für Teilmengen, also nicht generell, gesprochen werden. Der Eindruck, dass die Invarianz nur für Teilmengen gilt, verstärkt sich, wenn in das Diagramm der Abbildung 2 auch die Werte einer chinesischen Stichprobe aus der Untersuchung von Lass et al (2004) mit eingezeichnet werden



**Abbildung 3:** Analog Abbildung 2. Zusätzlich sind die Daten der beiden chinesischen Stichproben ( Lass95Ch, Lassetal04Ch) aus den Arbeiten von Lass (1995) und Lass et al (2004) mit eingezeichnet.

Für Zufallsfiguren liegen die Werte außerhalb des Streubereiches. Für die „Bezeichnung geometrischer Figuren“, für „geometrische Figuren“ und für Farbwörter sind die Befunde nicht eindeutig, da sie sowohl innerhalb als auch außerhalb des Streubereiches liegen. Für Ziffern, Zahlwörter und u.U. auch Farben wird die Interpretation bekräftigt: Die Invarianz gilt also nur für Teilmengen.

Es ist ganz offensichtlich, dass die hier geführte Argumentation vom Streubereich abhängig ist. Wie bereits mit Abbildung 1 verdeutlicht, haben wir die von Cavanagh (1972) angegebenen Standardabweichungen übernommen. Da sowohl die Abtastzeit  $s$  als auch die Gedächtnisspanne  $g$  streuungsbehaftet sind, ergeben sich drei Möglichkeiten für den Streubereich: die Standardabweichung für  $s$ , die Standardabweichung für  $g$  und eine Kombination beider im Sinne einer Vektoraddition. Für die beiden zuletzt genannten Varianten werden die Streubereiche so extrem groß, dass fast alle zur Verfügung stehenden Messwerte in die so bestimmten Streubereiche fallen und eine Zurückweisung der zu untersuchenden Eigenschaft der Größe  $C$  von vornherein ausgeschlossen ist. Im Sinne einer Verschärfung der Aussage haben wir uns auf die Standardabweichung für die Abtastzeit  $s$  beschränkt. So ergibt sich ein wesentlich kleinerer Streubereich. Dies ist die ungünstigste Annahme für unsere Argumentation.

Die Frage nach der Gültigkeit der Invarianz wurde nur vor dem Hintergrund der mathematischen Funktion betrachtet. Nun ist aber ganz offensichtlich, dass eine mathematische Funktion, die durch Anpassung an eine Datenmenge entsteht, nichts über den Elementarprozess aussagt, der abläuft, hier die Informationsaufnahme, die Einspeicherung, die Abtastung nach gefragter Information und die Antworterzeugung. Erst eine Analyse aller am Prozess beteiligter Komponenten erlaubt eine Aussage darüber, welche Komponenten invariant sind gegenüber einer Materialtransformation. Intuitiv ist klar, dass beispielsweise die Kodierung von Zufallsmustern sicher anders verläuft als die von häufig verwendeten Ziffern. Die Beantwortung solcher Fragen setzt eine strenge Komponentenanalyse beispielsweise mittels Blickbewegungsmessung voraus.

Ziehen wir ein erstes Resümee: Konstante, wie etwa das Zeitquant von Geißler (1987, 1991, 1997) mit 4,56 ms haben wir hier ausgeklammert. Dies gilt in gewisser Weise auch für die „Magische Zahl sieben plus minus zwei“ (Miller, 1956), wenn man sie denn als „Konstante“ auffassen wollte. Der Anstieg der Cavanagh – Funktion wird in der Literatur als Cavanagh – Konstante bezeichnet. Dieser Anstieg der Funktion ist invariant gegenüber der Veränderung von Reizmaterialien einer Teilmenge. Differentiell ist die Cavanagh - Invariante keineswegs konstant, wie Bredenkamp (1988, 1990, 1992) gezeigt hat. Der von ihm untersuchte Rechenkünstler, der die 137. Wurzel aus einer 1000-stelligen Zahl in 40 Sekunden ziehen konnte, wies eine Cavanagh – Invariante von  $C = 478$  ms aus, wohingegen wir aus den von Cavanagh angegebenen Daten für Normalpopulationen einen Wert von 250 ms errechnen haben. Es lässt sich zeigen, dass der  $C$  – Wert des Rechenkünstlers weit außerhalb des Streubereiches im Cavanagh – Diagramm liegt. Bedenkt man noch, dass  $C$  deshalb so groß wird, weil  $g = 17,65$  (für Ziffern) beim Rechenkünstler beträgt, dann wird deutlich, dass die Einzelgrößen  $s$  und  $g$  viel anschaulicher interpretierbar sind als die Cavanagh - Invariante selbst.

Auch für die von Lass und Lüer (Lass, 1995; Lass et al, 2004; Lüer und Lass, 2000; Lüer und Lass, 2012) vorgelegten differentiellen Vergleiche zwischen Chinesen und Deutschen wird deutlich, dass – wie die Autoren selbst feststellen – Chinesen im Prinzip mehr Items behalten und schneller abtasten. Die  $C$  – Werte wandern im Streubereich der Cavanagh – Funktion in Richtung Koordinatenursprung, bleiben also – im Streubereich – gleich. Dies bedeutet, dass das Prinzip ( je mehr, umso schneller ) auch für die chinesische Stichprobe gilt. Die Größen  $s$  und  $g$  sind differentiell sensibel. Wenn das Prinzip gilt, kann  $C$  nicht differentiell sensibel sein. Lediglich für solche Fälle, bei denen das Prinzip verletzt wird, kann eine differentielle Sensibilität erwartet werden. Beim Rechenkünstler ist das der Fall. Damit entfällt auch der Anspruch einer Konstanten für  $C$ .

Vor dem Hintergrund dieser formalen Betrachtungsweise ist es besonders aufschlussreich, die historische Entwicklung „...kognitiver Invarianten bei der Diagnose geistiger Leistungen“ (Lüer und Lass, 2012) zu verfolgen. In der Vielfalt unterschiedlicher Denkweisen, hier einer eher formalen, liegt möglicherweise die Chance, das Problem neu zu betrachten.

### 1.3. Denken

Klix (1992) zitiert Descartes: „Das Menschliche Denkvermögen bleibt immer ein und dasselbe, wenn es sich auch den verschiedensten Gegenständen zuwendet, und es erfährt durch ihre Verschiedenheit ebensowenig eine Veränderung wie das Sonnenlicht durch die Mannigfaltigkeit der Gegenstände, die es bestrahlt.“ Hat Descartes Recht?

Die Antwort auf diese Frage hängt von der Spezifikation des Begriffes „Denkvermögen“ ab. Wird „Denkvermögen“ als eine Fähigkeit zur Erzeugung neuer Information durch und für das Individuum aufgefasst, muss man auf jeden Fall Descartes folgen. Damit sind aber keine Probleme zu lösen. Bezieht man den Realisierungsaspekt mit ein und denkt dabei an Problemlösestrategien, muss der generelle Anspruch einer Invarianz infrage gestellt werden.

Wir wollen – ebenso wie beim Abschnitt Gedächtnis – zeigen, dass die Eigenschaft der Invarianz im Denken, speziell von Denkstrategien, nur jeweils für Klassen von Problemanforderungen gilt und die Vermutung von Invarianz für die Menge aller Anforderungen nicht zu halten ist. Aber für Teilmengen von Anforderungen gilt sie.

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 elementaren Problemlösen sollten Brücken geschlagen werden. Dies wurde umso dringender empfunden, weil die bisherige Bezugsetzung zwischen den komplexen Problemlöseleistungen und dem Intelligenzquotienten wenig Aufklärendes gebracht hatte. Uwe Kotkamp (1999) hat sich in seinem Buch „Elementares und komplexes Problemlösen. Über Invarianzeigenschaften von Denkprozessen“ dieser Fragestellung angenommen. Von den von ihm untersuchten drei internen strategischen Größen Reduktion des kognitiven Aufwandes, Informationsverhalten und strukturelle Flexibilität wollen wir uns auf die Aufwandsreduktion beschränken und prüfen, ob dieses strategische Vorgehen der Aufwandsreduktion invariant ist gegenüber Anforderungstransformation.

Das komplexe Problem FEUER (Brehmer und Allard, 1985; Dörner und Schoppek, 1986; Dörner und Pfeifer, 1992) gehört zu den großen kombinatorischen Problemen. Die Problembeschreibung entnehmen wir dem Buch von Kotkamp. „Die Versuchsperson sieht auf dem Monitor ... ein Waldgebiet. Die Bäume repräsentieren jeweils Waldflächen, die Haussymbole Dorfgebiete, die Grassymbole Ödland, die durch Dämme umfassten

Gebiete stellen Wasserflächen dar. Man sieht außerdem Feuerlöscheinheiten. Die Löschleinheiten sind schwere Bolldozer, die Brände durch das Versprühen von Löschwasser löschen. Außerdem gibt es noch einen Löschhubschrauber. Die Versuchsperson erhält die Instruktion, in der Rolle eines Feuerwehrhauptmannes die Verantwortung für den Schutz des Waldgebietes zu übernehmen. Es ist ihre Aufgabe, die Löschleinheiten so zu dirigieren, dass durch auftretenden Brände möglichst wenig Wald, keine Dammanlagen und vor allem keine Dörfer vernichtet werden.“ Es gibt eine Anzahl von Befehlen, mit denen die Versuchsperson eine bzw. mehrere Löschleinheiten steuern kann. Zudem gibt es noch eine große Anzahl zusätzlicher Parameter wie Windrichtung, Windstärke usw. Alle Befehle können jeweils für eine Einheit, als sogenannte Einzelbefehle oder für mehrere Einheiten gleichzeitig, als sogenannte Massenbefehle, durchgeführt werden. Gemessen werden neben der Zeit und anderen Größen die Häufigkeit der Anwendung von Einzel und Massenbefehlen zur Erfassung des kognitiven Aufwandes und zur Erfassung der Lösungsgüte der Anteil unversehrter Häuser, Dammanlagen und Waldflächen.

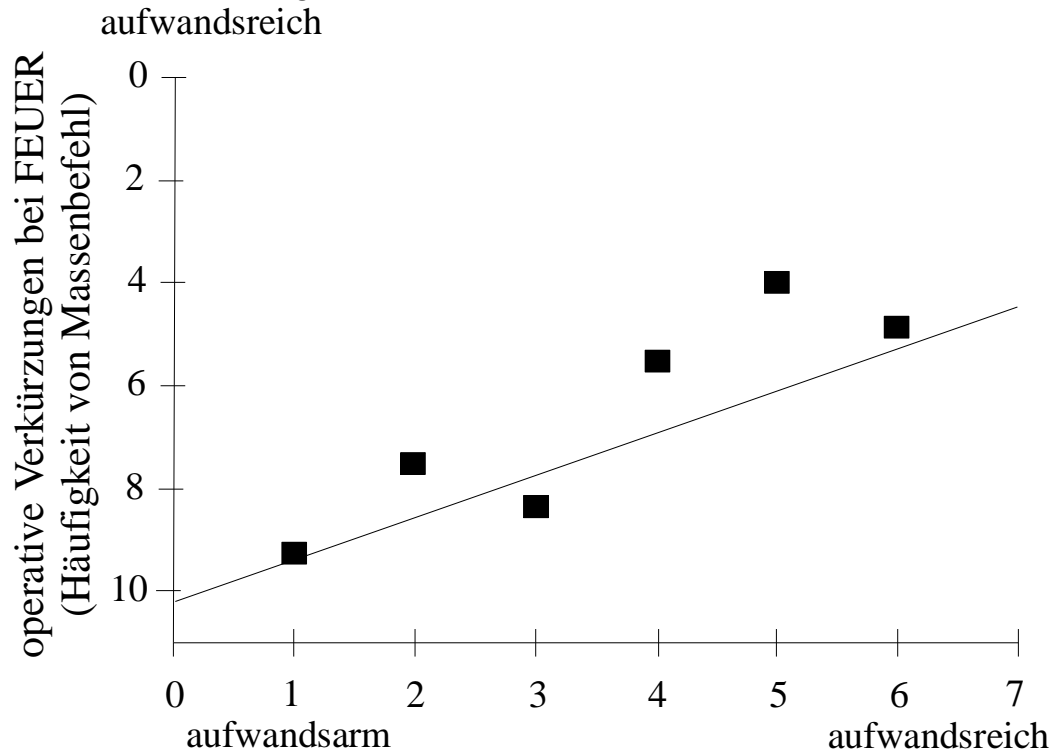
Es ist offensichtlich, dass bei dem FEUER-Szenarium in besonderem Maße strategisches Denken gefordert ist, bei dem die Angemessenheit oder Unangemessenheit der Maßnahmen von Konstellationen und nicht von Einzelmerkmalen abhängig ist (Dörner und Pfeifer, 1992). Eine aufwandsreduzierende Vorgehensweise (weniger Befehle in kürzerer Zeit) spiegelt sich im Gebrauch von Massenbefehlen wieder. Umgekehrtes gilt für Einzelbefehle. Über die Verwendungshäufigkeit von Massen – und Einzelbefehlen lässt sich so beispielsweise eine aufwandsreduzierende Vorgehensweise messen.

Als elementare Problemanforderung zieht Kotkamp zum Vergleich transitive Inferenzanforderungen, also deduktive Inferenzen heran, die in der psychologischen Literatur als Ordnungsprobleme (Groner, 1978; Groner und Groner, 1982) bekannt sind und seit mehr als 100 Jahren (Störing, 1908; siehe Fuchs, 1983; Kotkamp, 1999) untersucht werden. Die exakte Definition findet sich in Krause, Seifert und Sommerfeld (1986). Versuchspersonen müssen auf der Grundlage gegebener relationaler Aussagen zwischen jeweils zwei Elementen (z.B. Klaus steht links von Horst. Horst steht links von Rolf.) transitive Schlüsse ziehen, um eine Frage zu beantworten (z.B. Steht Klaus links von Rolf?). Wir haben gezeigt (Krause und Wysotzki, 1984; Krause, 2000b; Sommerfeld und Krause, 2013), dass Versuchspersonen den Inferenzprozess auf einen Vergleichsprozess reduzieren, indem sie die Menge an gegebener Information intern ordnen und in geeigneter Weise hierarchisch strukturieren. Dabei können kognitive Strukturen mit unterschiedlichem Behaltensaufwand ausgebildet werden. Der Behaltensaufwand der kognitiven Strukturen lässt sich durch die Anzahl von Merkmalen bestimmen, die zur Benennung von gebildeten Teilklassen in der (hierarchischen) kognitiven Struktur notwendig sind und von daher unbedingt behalten werden müssen, wie Sommerfeld (1994) in ihren modelltheoretischen Überlegungen gezeigt hat. Die unterschiedlichen kognitiven Strukturen lassen sich nach der Anzahl der Merkmale ordnen. Die kognitive Struktur mit der kleinsten Merkmalsanzahl hat dann den geringsten Behaltensaufwand, ist also am behaltensärmsten. Mit der direkten Messung der kognitiven Struktur gelingt die experimentelle Unterscheidung aufwandsarmer versus aufwandsintensiver Vorgehensweisen beim elementaren Problemlösen.

Kotkamp stellt nun folgende Frage: Wenn Problemlösestrategien (hier die Aufwandsreduktion) invariant gegenüber der Transformation von Problemanforderungen sein sollten, dann sollten Versuchspersonen, die beim Lösen elementarer Probleme aufwandsreduzierend vorgehen, dies auch beim Lösen komplexer Problemanforderungen tun und umgekehrt. Die Abbildung 4 zeigt das Ergebnis.

In der Verwendung von Massenbefehlen kommen, den operativen Aufwand bei der Systemsteuerung reduzierende, operative Verkürzungen (Klassenbildung über Handlungsfolgen) zum Ausdruck. Beim Ordnungsproblem wurden aus messtechnischen Gründen 6 statt 4 Klassen berücksichtigt. Der Anstieg der Geraden ist signifikant von Null verschieden. Die Korrelation beträgt  $r = 0,29$ . Einen ent-

sprechenden Befund erhält Kotkamp für das Informationssuchverhalten. Für die Lösungsgüten ergibt sich kein Zusammenhang.



### Klassenbildung über kognitive Strukturen beim elementaren ORDNUNGSPROBLEM

**Abbildung 4:** Aufwandsreduktion durch Klassenbildung über Prozeduren (mittlere Häufigkeit von Massenbefehlen, operative Verkürzung) beim komplexen Problemlösen FEUER in Abhängigkeit von der Aufwandsreduktion durch Klassenbildung über kognitive Strukturen beim elementaren Problemlösen nach Kotkamp (1999).

Die Ergebnisse stützen die Vermutung, dass die aufwandsreduzierende Klassenbildung über kognitiven Strukturen und Prozeduren eine anforderungsinvariante, personenspezifische Eigenschaft von Denkprozessen darstellt: Wer beim elementaren Problemlösen vereinfacht, vereinfacht auch beim komplexen Problemlösen: eine effiziente Strategie zur Einschränkung des Problemraumes.

Ist eine solche Problemlösestrategie invariant gegenüber jeder Anforderung?

Betrachten wir folgende Konstruktionsaufgabe: Entwirf einen Betonmischer, der in zwei Sekunden Beton mischt (Spies, 1992). Eine Lösungsmöglichkeit, die in der Arbeitsgruppe von Spies angegeben und erprobt wurde, ist die der Implosion, durch die eine Verwirbelung des Mischgutes in minimaler Zeit entsteht. Im allgemeinen liegt eine solche Lösung außerhalb plausibler Lösungsmöglichkeiten und es muss für eine Suche in Wissensbereichen kognitiver Aufwand aufgebracht werden. Also eher aufwandsintensive und nicht aufwandsreduzierende Vorgehensweisen sind hier gefragt. Mit einem klassischen Beispiel von Duncker (1933) soll das untermauert werden. Zur damaligen Zeit war bekannt, dass die Genauigkeit von Pendeluhrn von der Temperatur abhängig waren. Die Aufgabe seiner Versuchspersonen bestand darin, etwas zu entwerfen, damit die Genauigkeit der Pendeluhr von Temperaturschwankungen unabhängig wird. Der Metallstab des Pendels ändert bei Temperaturschwankungen seine Länge und damit die Ganggenauigkeit der Uhr. Eine der Lösungen, die von Dunckers Versuchspersonen angegeben wurde, bestand darin, den Metallstab zweimal um 180 Grad umzulenken, sodass die Temperatúrausdehnung in der einen Richtung durch die Ausdehnung in der anderen Richtung kompensiert werden sollte. Das Kompensationsprinzip, ein uraltes Prinzip beim Entwerfen technischer Gebilde, wurde hier genutzt. Wie aufwändig mag ein solcher Suchprozess



sein, wenn keine Vorerfahrung vorliegt? Mit aufwandsreduzierenden, suchraumeinschränkenden Techniken kann man hier nicht agieren.

Wir wollen – mangels experimenteller Daten – ein drittes Beispiel anführen, um den Unterschied im Lösungsverhalten zu den „Turm von Hanoi“-Problemen – zumindest von der Phänomenologie her – zu untermauern. Auf Altshuler (1973, 1983, 1984), der in den fünfziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts in Baku eine Erfinderschule gegründet hatte, geht folgende Aufgabe zurück: Zum Schleifen von Bleiglas soll eine Vorrichtung entworfen werden, bei der trotz maximaler Schleiffläche maximale Schleifflüssigkeit eintreten kann, bei gleichzeitiger Verkürzung der Schleifzeit. Herkömmlich tritt die Schleifflüssigkeit durch die Löcher in der Schleifscheibe ein. Um die Schleifzeit zu verkürzen, müsste die Drehzahl erhöht werden. Das bedingt mehr Schleifflüssigkeit, die durch die Bohrungen in der Schleifscheibe treten muss. Das ist ( ohne Druckerhöhung ) durch Vergrößerung der Bohrungen, durch die Flüssigkeit fließt, zu erreichen. Die Konsequenz ist aber eine Verringerung der Schleiffläche und so eine Verlängerung der Schleifzeit. Damit wird das Gegenteil dessen erreicht, was eigentlich bezweckt werden sollte. Das Problem ist mit herkömmlichen Variationsmöglichkeiten zwischen Schleiffläche und Durchmesser der Bohrlöcher nicht zu lösen. Altshuler fordert sein Konstrukteure in solchen Fällen zur Zuspitzung des Widerspruchs auf und will damit eine Suchraumerweiterung anregen, d.h., Aufwand muss aufgebracht werden. Eine der Lösungen, die seine Konstrukteure vorschlagen, besteht darin, Wasser mit feinem Sand zu versetzen, schnell durch Kälte erstarren zu lassen und einen solchen Eiskörper zum Schleifen zu verwenden. Die durch das Schleifen erzeugte Wärme bringt das Eis zum Schmelzen, die Sandkörner schleifen. Auf diese Weise erhält man bei maximaler Schleiffläche auch maximale Schleifflüssigkeit, die dann mit höherer Drehzahl wegen der schnelleren Erwärmung auch größer wird. Die von Altshuler eingeführte Innovationsstrategie „Zuspitzung des Widerspruchs“ fordert zur Aufbringung von kognitivem Aufwand heraus.

Für solche sogenannten Entwurfsprobleme sind bisher keine Lösungsstrategien bekannt, wenn man von den Förderungsmöglichkeiten durch Innovationsstrategien (Spies, 1991, 1993, 1995, 1996; Altshuler, 1973) absieht. Intuitiv ist klar, dass durch eine aufwandsreduzierende problemraumeinschränkende Strategie keine Lösung erzielt werden kann. Vielmehr ist hier das Gegenteil notwendig, eine Problemraumerweiterung, möglicherweise mittel analoger Inferenzen. Damit ist die Invarianzeigenschaft im Denken infrage gestellt.

Nun können wir Probleme in Klassen einteilen. Problemklassifikationen sind in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts von Dörner (1976), Sydow (1980), Hesse (1991) und vielen anderen erarbeitet worden. In Krause (2000) findet sich eine Übersicht. Eine sehr grobe Problemklassifikation ist die nach der Vollständigkeit der Bestimmungsstücke eines Problemraumes in zwei Klassen: Problemraum abgeschlossen versus Problemraum nicht abgeschlossen. Ein Problemraum ist die Menge der Zustände und Operationen. Die zwei Klassen unterscheiden sich also darin, ob die Menge der Zustände / Operationen abgeschlossen (also dem Problemlöser vollständig bekannt) ist oder nicht. Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt Beispiele.

Für Probleme mit abgeschlossenem Problemraum (In diese Klasse gehören elementare wie komplexe Probleme.) liegt die Vermutung nahe, dass eine aufwandsreduzierende problemraumeinschränkende Strategie zum Ziel führt. Für Probleme mit nicht abgeschlossenem Problemraum ist eine aufwandsreduzierende problemraumeinschränkende Strategie irrelevant, d.h. nicht zum Ziel führend.

**Tabelle 1**

Problemklassifikation nach der Vollständigkeit der Bestimmungsstücke.

Problemraum	
abgeschlossen	nicht abgeschlossen
Turm von Hanoi	Entwurfsprobleme
Ordnungsproblem	z.B. Betonmischer entwerfen
Komplexe Probleme	z.B. Bestrahlungsaufgabe Duncker
z.B. FEUER	z.B. Pendelaufgabe Duncker
	z.B. Schleifproblem

Offensichtlich haben wir bei Denkprozessen eine analoge Situation wie bei Gedächtnisprozessen: Für Teilmengen oder Teilklassen von Problemen gilt die Invarianz, generell für alle Problemklassen gilt sie nicht.

## 2. Schlussfolgerung

Warum sollte die Invarianz eigentlich für Teilklassen gelten? Stellen wir Plausibilitätsüberlegungen an: Aus Alltagserfahrungen ist bekannt, dass eine einmal ausgebildete und bislang erfolgreiche Vorgehensweise erst dann gewechselt wird, wenn sie nicht mehr erfolgreich oder nicht mehr anwendbar ist. Solange aber wird sie beibehalten, immer vorausgesetzt, die Anforderung kann so erfüllt werden. Hier mag ein wesentlicher Grund für die „Teilinvarianz“ liegen. Man kann dies auch als eine Konsequenz des Vereinfachungsprinzips im menschlichen Verhalten interpretieren. Ganz sicher ist es ein effizientes Verhalten.

Mit dem Anspruch, der Frage nach Invarianz möglichst gebietsübergreifend zu begegnen, haben wir hier drei Gebiete der menschlichen Informationsverarbeitung verglichen: Wahrnehmung, Gedächtnis und Denken. Ist das zulässig? Um welche Art von Invarianz handelt es sich in diesen drei Fällen? Am Beispiel der Größenkonstanz in der Wahrnehmung wird die Invarianz einer subjektiven Größe in Abhängigkeit von der Variation einer objektiven Größe hinterfragt. Am Beispiel der Gedächtnisuchprozesse wird die Invarianz eines Verhältnisses (Gedächtnisspanne / Abtastzeit: je mehr, umso schneller) in Abhängigkeit von der Variation des Materials hinterfragt. Am Beispiel des Denkens wird die Invarianz einer Strategie in Abhängigkeit von der Variation von Problemen hinterfragt. In allen drei Fällen sind es jeweils andere Größen, die als Invariante und als Variable betrachtet werden. In allen drei Fällen beobachten wir aber Ähnliches: die Invarianz gilt nur teilweise.

Zusammenfassend stellen also die Befunde aus Wahrnehmungs-, Gedächtnis- und Denkprozessen die Wirkung von Invarianzeigenschaften in der menschlichen Informationsverarbeitung als generelles Prinzip infrage. Vielmehr gilt diese Eigenschaft nur für Teilbereiche, Teilmengen oder Teilklassen, wie in anderen Naturwissenschaften auch.

Dies hat natürlich zur Konsequenz, dass von den eingangs zitierten drei Prinzipien der menschlichen Informationsverarbeitung, die wir als Kondensationspunkte einer Theorienbildung betrachtet haben, zumindest ein Prinzip nicht die Allgemeingültigkeit besitzt: die Invarianz. Daraus ergeben sich Schlussfolgerungen für die weitere Analyse der menschlichen Informationsverarbeitung: Eine erneute Hinwendung zu einer sequentiellen Prozessanalyse im Elementaren und in allen Ebenen der menschlichen Informationsverarbeitung. Die Prinzipien müssen daraus hervorgehen. In einem nachfolgenden Beitrag soll darauf eingegangen werden.

## Literatur

- Altshuler, G.S. (1973). *Erfinden - (k)ein Problem*. Berlin: Tribüne.
- Altshuler, G.S., & Seljuzki, A. (1983). *Flügel für Ikarus - über die moderne Technik des Erfindens*. Leipzig: Urania.
- Altshuler, G.S. (1984). *Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme*. Berlin: Technik.
- Bredenkamp, J., Klein, K.-M., von Hayn, S., & Vaterrodt, B. (1988). Gedächtnispsychologische Untersuchungen eines Rechenkünstlers. *Sprache und Kognition*, 69-83.
- Bredenkamp, J. (1990). Kognitionspsychologische Untersuchungen eines Rechenkünstlers. In H. Feiger (Ed.), *Wissenschaft und Verantwortung*. Göttingen: Hogrefe.
- Bredenkamp, J. (1992). Die Zeitquantenhypothese und experimentelle Daten aus Untersuchungen an einem Rechenkünstler. Vortragsmanuskript (unveröffentlicht).
- Brehmer, B. & Allard, R. (1985). Dynamic decision making: A general paradigm and some experimental results. *Uppsala University, Department of Psychology, Manuscript*.
- Dörner, D. (1976) *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- 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 & Kognition*, 11, 75-90.

- Fuchs, A. (1983). *Sprache und logisches Denken. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum transitiven Schließen*. Frankfurt a.M.: Lang.
- Geissler, H.-G. (1987). The temporal architecture of central information processing: Evidence for a tentative time-quantum model. *Psychological Research*, 49, 99-106.
- 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.
- Geissler, H.-G. (1997). Is there a Way from Behavior to Nonlinear Brain Dynamics? *International Journal of Psychophysiology*, 26, 381-393.
- Groner, R. (1978) *Hypothesen im Denkprozess*. Bern: Huber.
- Groner, R. & Groner, M. (1982) Towards a hypothetico-theory of cognitive activity. In: Groner, R. & Fraise, P. (Eds.) *Cognition and Eye Movements*. Berlin: DVW, 100-121.
- Hesse, F.W. (1991). *Analoges Problemlösen*. Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Klix, F. (1992) *Die Natur des Verstandes*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.
- Kotkamp, U. (1999) *Elementares und komplexes Problemlösen. Über Invarianzeigenschaften von Denkprozessen*. Lengerich: Pabst.
- Krause, B. (2014a). Entwicklung der Wechselwirkung von akademischer und außerakademischer Forschung aus Sicht der experimentellen Psychologie in Berlin. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietaet der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 118*. Berlin: trafo Verlag, 133-147.
- Krause, B. (2014b). Der Einfluss der Kybernetik auf die psychologische Forschungsmethodik. *Leibniz-Online 15/2013*. <http://www.leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2013/01/bkrause.pdf>
- Krause, W. (2000a) *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.
- Krause, W. (2000b). Elementaranalyse von Gedächtnis – und Denkprozessen. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietaet der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 42*. Berlin: trafo Verlag, 27-59.
- Krause, W. (2011) Menschliche Informationsverarbeitung interdisziplinär. *LIFIS ONLINE* [www.leibniz-institut.de/archiv/krause\\_18\\_04\\_11.pdf](http://www.leibniz-institut.de/archiv/krause_18_04_11.pdf)
- Krause, W. & Seidel, G. (2004) Biologische Grundlagen des Verstandes. Höhere Ordnung – kürzere Zeiten: allgemeinspsychologische und differentielle Untersuchungen zur Entropiereduktion. In: Krause, B. & Krause, W. (Hrsg.) *Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften. Festschrift für Friedhart Klix zum 75. Geburtstag. Abhandlungen der Leibniz-Sozietaet, Bd.12*. Berlin: trafo Verlag, 189-214.
- Krause, W., & Wysotzki, F. (1984). Computermodelle und psychologische Befunde der Wissensrepräsentation. In F. Klix (Ed.), *Gedächtnis, Wissen, Wissensnutzung*. (pp. 108-136). Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Krause, W., Seifert, R. & Sommerfeld, E. (1987) Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen im Problemlösen. *ZKI-Informationen 2/87*. Berlin: AdW der DDR.
- Lass, U. (1995). Einfluß von Sprache auf Verarbeitungsprozesse im Kurzzeitgedächtnis. Habilitationsschrift, Institut für Psychologie der Universität Göttingen.
- Lass, U., Lüer, G., Becker, D., Fang, Y. & Chen, G. (2004): Encoding and retrieval components affecting memory span; Articulation rate, memory search and trace redintegration. In C. Kaernbach, E. Schröger & H. Müller (Eds.), *Psychophysics beyond sensation. Laws and invariants of human cognition* (pp. 349-370). Mahwah, N. J.: Erlbaum.
- Lüer, G. & Lass, U. (2000): Was erklärt die Varianz sogenannter psychischer Invarianten? Der Wandel von psychophysischer Konstanz zu psychobiologischer Adaptabilität. *Zeitschrift für Psychologie*, 208, 340-356
- Lüer, G. & Lass, U. (2012). Das Problem kognitiver Invarianten bei der Diagnose geistiger Leistungen. *LIFIS-ONLINE* [23.01.2012], [http://www.leibniz-institut.de/archiv/luer\\_23\\_01\\_12.pdf](http://www.leibniz-institut.de/archiv/luer_23_01_12.pdf)
- Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81-97.

- Rothe, H.-J. (2012). *Quo vadis Arbeitspsychologie?* Abschiedsvorlesung. <http://www.psych.uni-potsdam.de/psych/rothe/index-d.html>
- Sommerfeld, E. (1994) *Kognitive Strukturen*. Münster, New York: Waxmann.
- Sommerfeld, E. (2009) Aufklärung von Basisprozessen menschlicher Informationsverarbeitung. Ein systematischer Zugang durch Elementaranalyse von Denkprozessen bei der Lösung von Ordnungsproblemen? *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 101*. Berlin: trafo Verlag, 93-110 und *Leibniz-Online 6/2009*. [www.leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2012/11/05-Sommerfeld\\_2009\\_04\\_281.pdf](http://www.leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2012/11/05-Sommerfeld_2009_04_281.pdf)
- Sommerfeld, E. (2010) Einfachheit - ein Grundprinzip in den unterschiedlichsten Disziplinen? Anregungen zur interdisziplinären Diskussion. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 108*. Berlin: trafo Verlag, 145-163.
- Sommerfeld, E. & Krause, W. (2013). „Objektiv, aber speziell“: Psychologie als Naturwissenschaft. *Leibniz-Online 15/2013*. [http://www.leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2013/11/sommerfeld\\_krause.pdf](http://www.leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2013/11/sommerfeld_krause.pdf)
- Spies, K. (1991). Eine neuartige Entwicklungsmethodik zur Förderung der Kreativität in den Ingenieurwissenschaften. Forschungsbericht, Institut für Bergbaukunde II der RWTH Aachen.
- Spies, K. (1993). Die Bedeutung der Kreativität in den Ingenieurwissenschaften und ihre systematische Förderung durch methodisches Erfinden. Politechnika Slaska, Gliwice.
- Spies, K. (1992). Mündliche Mitteilung.
- Spies, K. (1995). Gezieltes Entwickeln und technisches Gestalten mit der marktorientierten Innovationsstrategie. *Glückauf, 131*, 648-652.
- Spies, K. (1996). *Ein methodischer Weg zu innovativen Technologien*. Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung.
- Sprung, L. & Sprung, H. (2010) *Eine kurze Geschichte der Psychologie und ihrer Methoden*. München, Wien: Profil Verlag.
- Sydow, H. (1980) Mathematische Modellierung der Strukturrepräsentation und der Struktureerkennung in Denkprozessen. *Zeitschrift für Psychologie, 2*, 166-197.
- Sydow, H. & Petzold, P. (1981) *Mathematische Psychologie*. Berlin: DVW.

Adresse des Verfassers: [urwe.krause@t-online.de](mailto:urwe.krause@t-online.de)