

Jürgen Bredenkamp

Die Verknüpfung verschiedener Invarianzhypothesen in der Lern- und Gedächtnispsychologie

In diesem Beitrag geht es um die Integration von Invarianzhypothesen aus verschiedenen Gebieten der Lern- und Gedächtnispsychologie. Eine derartige Verknüpfung versucht zum einen, der Zersplitterung einer Disziplin in kleinste Ausschnitte, die unverbunden nebeneinander stehen, entgegenzuwirken. Zum anderen führt diese Verknüpfung zu einem empirischen Gehalt der neu entstandenen Theorie, der den der einzelnen zu ihr gehörenden Hypothesen übertrifft. Damit ist im Sinne der Logik der Forschung von Popper (1982) gemeint, dass durch die Verknüpfung der Hypothesen der Eintritt bestimmter empirischer Resultate verboten wird, die für eine der Einzelhypothesen denkbar gewesen wären. Die Gefahr einer fälschlichen Bestätigung der durch Verknüpfung empirisch bewährter Einzelhypothesen entstandenen Theorie wird dadurch geringer. Dieser Aspekt ist auch angesichts des Problems, dass in der Psychologie empirische Befunde oftmals nicht zu replizieren sind, von nicht zu unterschätzender Bedeutung.

Die folgende Darstellung fasst frühere Arbeiten des Autors zusammen, ohne auf bestimmte Details wie die Konstruktion des Lernmaterials und die statistische Hypothesenprüfung einzugehen, die in den zitierten Originalarbeiten dargestellt wurden. Erwähnt sei nur, dass dem Desiderat einer hohen Teststärke immer Rechnung getragen wurde. Die erste hier zu betrachtende Hypothese entstammt der Psychologie des verbalen Lernens und wurde die Total-Time Hypothesis (TTH) genannt. Danach ist die gesamte Zeit, die zur Beherrschung eines Lernstoffes benötigt wird, unabhängig von der Darbietungszeit dieses Stoffes konstant. Wenn also bei einer Darbietungszeit von zehn Sekunden sechs Lernversuche benötigt werden, dann sind nur drei Lernversuche bei einer Darbietungszeit von 20 Sekunden notwendig. In beiden Fällen beträgt die Gesamtzeit bis zur Erreichung des Lernkriteriums 60 Sekunden. Formal ausgedrückt lautet die TTH:

$$(1) T_v = Y_{jv} t_j$$

Dabei ist T_v die gesamte für die Beherrschung des Lernstoffes v benötigte Lernzeit, t_j ist die Darbietungszeit in der j -ten Versuchsbedingung und Y_{jv} die Anzahl der für die Erreichung des Lernkriteriums benötigten Versuche. Spätestens mit dem Sammelreferat von Cooper und Pantle (1967) ist diese Hypothese bekannt geworden. Sie gilt den Autoren zufolge dann, wenn die effektive Lernzeit eine lineare Funktion der nominalen Zeit T_v ist. Neuere Publikationen weisen ihr noch eine gewisse Bedeutung zu (vgl. Baddeley 1997; Ulrich et al. 1996), obwohl sie empirisch falsch ist. Nach Bredenkamp (1975) gilt eine modifizierte TTH (mTTH) in folgender Form:

$$(2) Y_{jv} = a_v + b_v/t_j$$

a_v und b_v sind materialspezifische Konstanten, die zunächst noch keine psychologische Bedeutung aufweisen.

Die zweite zu betrachtende Hypothese ist die einer sogenannten konstanten Langzeit-Gedächtnisspanne von Nevelski (1970), die formal so geschrieben werden kann:

$$(3) I_v = Y_{jv} r_j$$

I_v ist der gesamte zu verarbeitende Informationsgehalt in der informationstheoretischen Einheit Bit und r_j der bei Darbietungszeit t_j verarbeitete Informationsbetrag in Bit. Gemäß der Hypothese ist er unabhängig von der insgesamt zu verarbeitenden Information. Wenn also insgesamt 50 Bit an Informationen zu verarbeiten sind und fünf Bit bei einer Darbietungszeit von zehn Sekunden verarbeitet werden, sind zehn Lernversuche erforderlich, um das Kriterium zu erreichen. Sind insgesamt 100 Bit zu verarbeiten, wären gemäß dieser Hypothese 20 Lernversuche notwendig.

Eine Verknüpfung der Hypothesen (1) und (3) würde die unrealistische Folgerung implizieren, dass die verarbeitete Information linear mit der Darbietungszeit wächst. Auch aus diesem Grund ist der mTTH der Vorzug zu geben, deren Verknüpfung mit Nevelskis Hypothese zu einer hyperbolischen Funktion führt:

$$(4) r_j = \frac{I_v}{a_v + b_v/t_j}$$

Diese Funktion ist von demselben Typ wie die hyperbolische Funktion, mit der bereits 1917 Thurstone die Lernkurve beschrieben hat, die den Zusammenhang zwischen Übung und Lernleistung spezifiziert. Hier ergibt sie sich als logische Folgerung aus der mTTH und Nevelskis Hypothese. Die Gültigkeit dieser Beziehung ist in mehreren Experimenten geprüft worden, in

denen unabhängig voneinander die Darbietungszeit und der statistische Informationsgehalt der Items m_v manipuliert wurden, deren Reihenfolge zu erlernen war. Insgesamt ergaben sich bestätigende Befunde (Bredenkamp/Hager 1979; Bredenkamp/Klein 1998; Bredenkamp/Hamm 2001). Eine Voraussetzung für die Bestätigung ist, dass der Umfang der Items, deren Abfolge zu erlernen ist, größer als die Kurzzeit-Gedächtnisspanne ist.

Die Asymptote der Funktion (4) ist

$$(5) A = r_{max} = I_v / a_v$$

Sie gibt die in einem Lernversuch maximal zu verarbeitende Informationsmenge wieder. Eine weitere Annahme der hier vorgestellten Theorie ist, dass sie der Kurzzeit-Gedächtnisspanne in Bit entspricht. Sollte sich diese Annahme bestätigen lassen, ließe sich die Verknüpfung der mTTH und der Nevelski-Hypothese mit der einflußreichen Theorie des Arbeitsgedächtnisses von Baddeley und Hitch (vgl. Baddeley 1997) und mit der Hypothese von Cavanagh (1972) verbinden. Bezüglich des empirischen Gehalts der Theorie ist zu betonen, dass die Gleichsetzung der Asymptote der Funktion (4) mit der Kurzzeit-Gedächtnisspanne in Bit die Menge zulässiger empirischer Resultate weiter einschränkt.

Zunächst gehen wir auf die Verbindung mit der Arbeitsgedächtnistheorie von Baddeley und Hitch ein. Zum Zeitpunkt unserer empirischen Untersuchungen bestand diese Theorie aus der Annahme einer zentralen Komponente und verschiedener modalitätsspezifischer „Sklavensysteme“. Die zentrale Exekutive überwacht und koordiniert die Tätigkeit der „Sklavensysteme“. Von den letzteren interessiert hier nur die phonologische Schleife, die für die Verarbeitung sprachlicher Informationen zuständig ist. Sie besteht laut Theorie aus einem phonologischen Speicher und einer aktiven Komponente, der ständigen subvokalen Artikulation. Der Speicher hält die Informationen für 1.5 bis 2 Sekunden fest, bevor die Gedächtnisspur zerfällt, falls die Informationen nicht ständig memoriert werden. Für diese Theorie gab es zahlreiche bestätigende Befunde. Sie kann auch den Befund, dass chinesische Probanden über eine größere Gedächtnisspanne für Zahlen als andere Probanden verfügen, obwohl kein Unterschied in der Zerfallszeit von 1.5 bis 2 Sekunden besteht, gut erklären. Die größere Gedächtnisspanne der chinesischen Probanden ist darauf zurückzuführen, dass sie die Zahlen schneller artikulieren.

Nach Baddeley (1997) gilt:

$$(6) B = u_v g_v$$

u_v ist die für die Artikulation eines Items benötigte Zeit, g_v ist die Kurzzeit-Gedächtnisspanne, die im Folgenden immer gemeint ist, und B gibt die Zeitspanne von 1.5 bis 2 Sekunden wieder. Wenn die Asymptote der Funktion (4) der Kurzzeit-Gedächtnisspanne in Bit ($m_v g_v$) entspricht, muss ebenfalls gelten:

$$(7) A = Bm_v / u_v$$

Aus einem Versuch, der die Artikulationszeiten und Gedächtnisspannen für Items unterschiedlichen Informationsgehalts ermittelt, sollte sich die Asymptote für einen Lernversuch mit diesen Items prognostizieren lassen, in dem ein größerer Informationsbetrag als r_{max} zu verarbeiten ist. Geprüft wurde dies von Bredenkamp und Klein (1998, Experiment 1-3). Verwendet wurden Bigramme, deren Informationsgehalt zwischen zwei und vier Bit variierte. Wie erwartet kovariierten Gedächtnisspanne und Artikulationszeit sowie Gedächtnisspanne und Informationsgehalt negativ. Zusätzlich ließ sich zeigen, dass die Gleichung (6) mit $B = 1.96$ Sekunden galt. Ein Lernexperiment mit denselben Items, in dem zusätzlich die Darbietungszeiten variiert wurden, führte zur Bestätigung der Funktion (4). Weiterhin ergab sich, dass die Asymptote dieser Funktion so genau aus Gleichung (7) prognostiziert werden konnte, dass die Abweichungen der tatsächlichen Lernversuche bis zum Kriterium von den prognostizierten Werten minimal und insignifikant waren. Mit anderem Lernmaterial (Wörter) hat Hamm (2004) dieselbe Struktur der Ergebnisse gefunden, wobei $B = 1.83$ Sekunden war.

Bevor die Ergebnisse weiterer Experimente berichtet werden, sei nochmals auf Gleichung (2) eingegangen. Diese Gleichung zeigt, dass jede experimentelle Manipulation, die sich ausschließlich auf a_v und nicht auch auf b_v auswirkt, die Lernleistung nach den bisher berichteten Ergebnissen nur über die Veränderung der Kurzzeit-Gedächtnisspanne beeinflusst. Dies gilt nach den Resultaten von Bredenkamp und Hamm (2001) für eine zusätzliche Belastung der zentralen Exekutiv und für die Störung der Verarbeitung durch irrelevante Sprache. Gemäß Arbeitsgedächtnistheorie stört eine Sprache, die man nicht versteht, die Verarbeitung der Zielitems umso mehr, je größer die Möglichkeit der Interferenz durch Klangähnlichkeit ist. Bredenkamp und Hamm (2001) haben dies mit Polnisch und Rumänisch als irrelevante Sprachen untersucht, wobei die Zielitems wieder Bigramme waren, deren Informationsgehalt variierte. Alle Lernkurven ließen sich mittels Gleichung (4) beschreiben. Ihre Asymptoten ließen sich sehr genau aus den Gedächtnisspannenversuchen, die unter denselben störenden Bedingungen wie die Lernversuche stattfanden, prognostizieren. Eine Absenkung der Gedächtnis-

spanne und damit der Asymptote ließ sich nur bei Belastung der zentralen Exekutive durch eine Zusatzaufgabe, die nicht auch die „Sklavensysteme“ beeinflusst, und für Rumänisch als irrelevante Sprache nachweisen. Polnisch als irrelevante Sprache hatte keinen Effekt, was wegen der geringen Interferenz mit den Bigrammen nicht unerwartet war. Alle anderen bisher geschilderten Bedingungen hatten nur einen Einfluss auf a_v , nicht auf b_v . Das verhält sich anders, wenn die Artikulation der Zielitems unterdrückt werden muss (Bredenkamp/Klein 1998). Unter dieser Bedingung sollten die Items gemäß der Theorie von Baddeley und Hitch nicht in der phonologischen Schleife verarbeitet werden können. Wie erwartet war die Gedächtnisspanne unter dieser Bedingung geringer als mit der Möglichkeit zur Artikulation. Aus der Gedächtnisspanne unter der Bedingung der artikulatorischen Unterdrückung ließ sich auch hier die Asymptote der Funktion (4) für ein Lernexperiment unter derselben Bedingung sehr genau vorhersagen. Der Abfall der Lernleistung ist aber nicht nur auf die geringere Gedächtnisspanne zurückzuführen. Im Unterschied zu den anderen Bedingungen liegt bei artikulatorischer Unterdrückung eine Beeinträchtigung der Übertragung der Informationen in den Langzeitspeicher vor, die sich in dem erhöhten Wert b_v ausdrückt. Nach allen bisherigen Ausführungen kann a_v als die Anzahl der Lernversuche interpretiert werden, die für die Verarbeitung im Kurzzeitspeicher benötigt werden. Könnte in jedem Lernversuch so viel an Information verarbeitet werden wie r_{max} , ohne dass sich die Informationen überlappen, würden a_v Lernversuche ausreichen, um das Lernkriterium zu erreichen. Die über diese minimal erforderliche Anzahl von Lernversuchen hinaus gehende Anzahl gibt der Ausdruck b_v / t_j wieder, der sich auch wie folgt schreiben lässt (vgl. Bredenkamp/ Klein 1998):

$$(8) \quad b_v / t_j = Y_{jv} (1 - r_j / r_{max})$$

Dieser Ausdruck wird als die Anzahl der Lernversuche interpretiert, die notwendig sind, um die Informationen im Langzeitgedächtnis zu speichern. Nur wenn bei artikulatorischer Unterdrückung die zentrale Exekutive ohne Assistenz der phonologischen Schleife die sprachlichen Informationen verarbeiten muss, ist dieser Wert erhöht.

Da die bisher dargestellten Befunde die Beziehung der Asymptote der Lernkurve in Gleichung (4) und der Gedächtnisspanne in Bit untermauert haben, bietet sich eine weitere Untersuchung dieser Beziehung über Cavanaghs Hypothese an. Seine Hypothese bezieht sich auf die Relation zwischen der Kurzzeitgedächtnisspanne und der Suchzeit in einem Sternberg-Versuch. In einem derartigen Versuch wird den Probanden eine Reihe von

Items, die nicht den Umfang der Kurzzeitgedächtnisspanne übertreffen (memory set), präsentiert, und kurz danach wird ein einzelnes Testitem dargeboten, das entweder zur Menge der vorher dargebotenen Items gehört oder nicht. Der Proband soll so schnell wie möglich die Entscheidung der Zugehörigkeit treffen. Ein immer wieder gefundenes Ergebnis ist, dass die zur Entscheidung benötigte Zeit linear mit der Größe des memory set ansteigt. Der lineare Regressionskoeffizient gibt die Zeit an, die für den Vergleich eines Items aus dem memory set mit dem Testitem benötigt wird (Suchzeit). Nach Cavanagh (1972) gilt:

$$(9) C_v = s_v g_v$$

s_v ist die Suchzeit in einem Sternberg-Versuch für Material v und C_v eine Zeitkonstante, die Cavanagh (1972) mit 243 Millisekunden angibt. Inzwischen ist aber klar, dass C_v mit den Materialien und auch interindividuell variiert. Nicht tangiert wird dadurch die Gültigkeit der Funktion (9). Wenn die Asymptote der Lernkurve (A) in Gleichung (4) der Gedächtnisspanne in Bit (m_v, g_v) entspricht und Cavanaghs Hypothese zutrifft, muss auch gelten:

$$(10) A = m_v C_v / s_v$$

Diese Hypothese wurde von Bredenkamp (2004) für Bigramme, deren Informationsgehalt variierte, untersucht und bestätigt. Für Wörter hat Hamm (2004) die in Gleichung (10) wiedergegebene Beziehung ebenfalls bestätigen können.

Cavanagh hat seiner Relation verschiedene Interpretationen gegeben. Eine geht davon aus, dass jedes Item aus einem Bündel von Merkmalen besteht. Um die in der Sternberg-Aufgabe geforderte Entscheidung treffen zu können, werde der Testreiz Merkmal für Merkmal mit der gespeicherten Information verglichen. Cavanagh (1972) ließ offen, um welche Merkmale es sich handelt. Nach den dargelegten Befunden spricht einiges dafür, dass es sich um Informationseinheiten handelt. In diesem Fall muss ein Proband im Sternberg-Versuch so viele Merkmale durchsuchen, wie es der Gedächtnisspanne in Bit entspricht. Wenn jeder Merkmalsvergleich z Millisekunden dauert und die Asymptote A der Lernkurve in Gleichung (4) der Kurzzeitgedächtnisspanne in Bit entspricht, kann z durch die Gleichung (11) geschätzt werden:

$$(11) z = C / A$$

Die Schätzungen für z sollten der Zeitquant-Theorie von Geissler (1990) zufolge ein ganzzahliges Vielfaches von 4.56 Millisekunden sein, wobei diese

Größe die kleinste für elementare Operationen benötigte Zeit ist. Bredenkamp (2004) hat die Gleichung (11) benutzt, um z aus seinen Versuchen zu schätzen. Es ergab sich ein Wert von 27.76 Millisekunden, der ziemlich genau dem Sechsfachen von 4.56 entspricht. Über weitere Befunde, die nicht im Rahmen der hier dargelegten Theorie erhoben wurden und Geisslers Theorie bestätigen, berichtet Krause (2000).

In seinem grundlegenden Werk „Information und Verhalten“ führt Klix (1971) aus, dass es Fakten und Fakten gebe:

„Einmal solche, die gleichsam nur für sich stehen. Es sind Singularitäten der Erkenntnis, deren Wert sich mit dem Wissen um die Tatbestände ausschöpft. Und es gibt Fakten ... in denen hochgradig verdichtete Information vorliegt, durch die sich Grundgesetze von weit ausstrahlender Gültigkeit wie in einem Brennpunkt bündeln.“ (Klix 1971, S. 23)

Krause (2000, S. 337) unterstreicht in seinem Werk über das Denken und das Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht die Wichtigkeit der Erforschung von Invarianzleistungen auch außerhalb der Psychophysik, und mit dem hier vorgestellten Ansatz der Verknüpfung verschiedener Invarianzhypothesen wurde versucht, zu einer Gesetzhypothese zu gelangen, die über ein weiteres Gebiet der Lern- und Gedächtnispsychologie ausstrahlt als die Einzelhypothesen zu den singulären Fakten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die hier betrachteten Hypothesen und empirischen Befunde eine Verknüpfung der Kurzzeit- mit der Langzeitgedächtnis-Forschung ermöglichen: Die Arbeitgedächtnistheorie von Baddeley und Hitch, Cavanaghs Hypothese sowie Geisslers Zeitquant-Theorie können so mit der Langzeitgedächtnisforschung verzahnt werden, dass für experimentelle Untersuchungen exakte quantitative Prognosen möglich sind, die genau überprüft werden können. Allerdings setzt die hier vorgenommene Verzahnung von Kurz- und Langzeitgedächtnis-Forschung voraus, dass die verarbeitete Information in der informationstheoretischen Einheit Bit angegeben werden kann. Deshalb wurde das verwendete Lernmaterial so konstruiert, dass der Informationsgehalt genau angegeben werden kann. Häufig können Probanden aber durch informationsreduzierende Strategien bzw. Strukturierung des Lernmaterials (vgl. Krause 2000) die Verarbeitung effektiver gestalten. Sofern der subjektive Informationsgehalt, der nicht dem statistischen Informationsbetrag entsprechen muss, in der informationstheoretischen Einheit Bit angegeben werden kann (vgl. hierzu Weltner 1970), lässt sich der dargestellte theoretische Ansatz prinzipiell auch auf diese Situation anwenden. Erfolgreich haben Bredenkamp und Hager (1979) die Verknüpfung der

mTTH und Nevelski-Hypothese auf das Textlernen angewandt; die Verzahnung mit der Kurzzeitgedächtnis-Forschung, sofern die subjektive Information erfasst wird, fehlt aber noch. Ebenfalls offen bleibt die theoretische Beziehung der Cavanagh-Hypothese zur Theorie des Arbeitsgedächtnisses von Baddeley und Hitch.

Literatur

- Baddeley, Alan (1997): *Human Memory. Theory and Practice*. Hove, East Sussex: Psychology Press
- Bredenkamp, Jürgen (1975): Die modifizierte Invarianzhypothese und die Hypothese einer konstanten Langzeitgedächtnisspanne. In: *Psychologische Beiträge*, Jg. 17, S. 483–496
- Bredenkamp, Jürgen (2004): Cavanagh's Hypothesis within the context of other Invariance Hypotheses: Theory and Data. In: Kaernbach, Christian; Schröger, Erich; Müller, Hermann (Hg.): *Psychophysics beyond sensation. Laws and Invariants of human Cognition*. Mahwah, New Jersey u.a.O.: Lawrence Erlbaum Associates, S. 319–329
- Bredenkamp, Jürgen; Hager, Willi (1979): Experimentelle Befunde zur modifizierten Invarianzhypothese und zur Hypothese einer konstanten Langzeitgedächtnisspanne. In: *Psychologische Beiträge*, Jg. 21, S. 382–400
- Bredenkamp, Jürgen; Hamm, Silke (2001): Further experimental tests of invariance hypotheses on learning and memory processes. In: *Zeitschrift für Psychologie*, Jg. 209, S. 227–244
- Bredenkamp, Jürgen; Klein, Klaus-Martin (1998): Experimental tests of a model connecting three Invariance Hypotheses on learning and memory processes. In: *Zeitschrift für Psychologie*, Jg. 206, S. 107–124
- Cavanagh, J. Patrick (1972): Relation between the immediate memory span and the memory search rate. In: *Psychological Review*, Jg. 79, S. 525–530
- Cooper, Elaine H.; Pantle, Allan J. (1967): The Total-Time Hypothesis in Verbal Learning. In: *Psychological Bulletin*, Jg. 68, S. 221–234
- Geissler, Hans-Georg (1990): *Foundations of quantized processing*. In: Geissler, Hans-Georg (Hg.): *Psychophysical explorations of mental structures*. Toronto u.a.O.: Hogrefe & Huber Publishers, S. 193–210
- Hamm, Silke (2004): Prognose der Kurzzeitgedächtnisspanne durch verschiedene Invarianzhypothesen. In: Erdfelder, Edgar; Funke, Joachim (Hg.): *Allgemeine Psychologie und deuktivistische Methodologie*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, S. 225–244
- Klix, Friedhart (1971): *Information und Verhalten*. Bern u.a.O.: Huber.
- Krause, Werner (2000): *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht*. Göttingen u.a.O.: Hogrefe
- Nevelski, P. B. (1970): Comparative investigations of the short-term and long-term memory span. In: Pribram, Karl H.; Broadbent, Donald E. (Hg.): *Biology of memory*. New York: Academic Press, S. 21–28
- Popper, Karl R. (1966): *Logik der Forschung*. Tübingen: J. C. B. Mohr

- Thurstone, Louis Leon (1917): The learning curve equation. In: Psychological Bulletin, Jg. 14, S. 64–65
- Ulrich, Rolf; Stapf, Kurt-Hermann; Giray, Markus (1996): Faktoren des Einprägens und Erinnerns. In: Albert, Dietrich; Stapf, Kurt-Hermann (Hg.): Gedächtnis = Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C, Serie 2, Band 4. Göttingen: Hogrefe, S. 95–179
- Weltner, Klaus (1970): Informationstheorie und Erziehungswissenschaft. Quickborn: Schnelle.