

Hans-Georg Geißler

Was sind und welche funktionale Bedeutung haben universelle Invarianten der menschlichen Informationsverarbeitung?

Vorbemerkung

Nach den Vorstellungen der modernen Physik wird die Evolution des Universums durch feste Grundgesetze und die darin eingeschlossenen Konstanten bestimmt, die in Abhängigkeit vom jeweils erreichten Zustand den weiteren Gang der Veränderungen determinieren. Fundamental ist hierbei der universelle Charakter der Gesetze und Konstanten, da ohne Gewährleistung ihrer Universalität weder eine zusammenhängende Entwicklung der Welt im ganzen noch ein gesetzmäßiger Ablauf lokaler Vorgänge gedacht werden kann. Dass etwas nicht ganz Unähnliches auch für das Gehirn als „großem System“ gelten könnte, dass also insbesondere kognitive Leistungen unter der Wirkung universeller Prinzipien und Konstanten der Hirntätigkeit in Bindung an jeweils verfügbare Information und Verarbeitungsziel sich ganzheitlich organisieren, war über lange Zeit nicht viel mehr als eine interessante Denkmöglichkeit. Für ein vorläufiges, evidenzbasiertes System von Hypothesen, das auf die quantitative Beschreibung des Zusammenwirkens von festen Eigenschaften des verarbeitenden Systems und den jeweiligen inhaltlichen Vorgaben beim Ablauf kognitiver Prozesse abzielt, haben sich das Akronym TQM und im legeren Gebrauch die Bezeichnung „Zeitquantenansatz“ durchgesetzt.

Der vorliegende Beitrag ist eine kurz gefasste Einführung in Hauptannahmen des Ansatzes. Für eine breitere Leserschaft werden diese im Kontext von Bedingungen skizziert, die dessen langsame stufenweise Entwicklung ermöglichten. Hierzu gehören maßgeblich Erfahrungen aus der Zeit des Anfangs in den sechziger Jahren am damaligen Berliner Institut für Psychologie in der Oranienburger Strasse 18 mit ihren in einer einmaligen Atmosphäre freundschaftlichen Streits geführten Debatten, an denen der Autor als Mitglied einer interdisziplinär zusammengesetzten Gruppe junger Mitarbeiter teilnehmen konnte – aber ebenso auch der freimütige Austausch über die sich parallel entwickelnden Forschungsvorhaben bis tief in die siebziger Jahre. Die-

ser Artikel ist damit zugleich eine Hommage an Friedhart Klix, der mit aufmerksamem Interesse und behutsamen Vorgaben nach innen und Durchsetzungskraft nach außen – mitten im Kalten Krieg – eine Oase der Wissenschaft möglich gemacht hat.

1. TQM: Anmerkungen zur Vorgeschichte

1.1 *Information als funktional orientierter Schlüsselbegriff*

Als ein in fortwährender Entwicklung befindlicher Ansatz zur Formulierung von Universalien der Kognition ist TQM angewiesen auf Ergebnisse aus möglichst unterschiedlichen Bereichen und über unterschiedliche Arten kognitiver Leistungen des Menschen und mit den sich ableitenden Fragestellungen zugleich auch auf verfügbare formal-mathematische Instrumente. Im Rückblick gesehen, konnte es sich daher kaum besser fügen als es sich mit den regelmäßigen interdisziplinären Kolloquien des Instituts ergab, zu deren Gästen Verhaltensforscher, Linguisten, Sprachpathologen, Neurophysiologen und Mathematiker aus der näheren Umgebung zählten, bald jedoch auch renommierte Besucher aus dem westlichen Ausland und dem Westen Deutschlands, die sich die Möglichkeit einer Visite über das Einfallstor West-Berlin nicht nehmen ließen.

Eine unter den Entstehungsbedingung von TQM gleichrangige Voraussetzung lag mehr auf begrifflicher Ebene: Zu Klix's „behutsamen Vorgaben“ gehörte, dass er zu einer Zeit, in der kybernetische Netzwerkmodelle, Prinzipien der Regelungstheorie und der Selbstorganisation die allgemeine Debatte dominierten, auf ‚Information‘ als übergreifendem Schlüsselbegriff gesetzt und damit die Tür für nachgeordnete problemangepasste Spezifizierungen offen gehalten hatte.

Um die Signifikanz dieser schon früh erkennbaren und 1970 in „Information und Verhalten“ (Klix 1970) umfassend zur Wirkung kommenden Sichtweise für spätere Entwicklungen zu begreifen, lohnt es sich, für einen Moment bei ihrer Entstehung und Festigung zu verweilen: Bei Diskussionen zur Verhaltensrelevanz von Maßen der Information in den frühen 1960er-Jahren hatten Gespräche eine Rolle gespielt, zu denen Klix seine jungen Mitarbeiter regelmäßig ins sogenannte Polsterzimmer im dritten Stock des Instituts einlud. Latenter Ausgangspunkt waren omnipräsente Befunde über Reaktionszeiten. Das nach Hick benannte Gesetz besagt, dass, bei gleichberechtigten Antwortalternativen Latenzen in Wahlreaktionen mit dem Logarithmus dualis von deren Anzahl ansteigen, was als Spezialfall des Shannon'schen Informationsmaßes verstanden werden kann. Funktionsbezogen

interpretiert erfolgt die Antwortauswahl demnach in Stufen binärer Entscheidung. Was aber galt bei ungleichberechtigten Alternativen? Was im Falle anderer Anforderungen, zum Beispiel bei der Suche nach einem bestimmten Objekt in einer Menge von Objekten („Items“)? Um solche und viele weitere Fragen zu beantworten, lag es nahe, den formal-begrifflichen Vorrat zu erkunden, der sich aus Weiterungen des Shannon'schen Informationsbegriffs ergab.

Gemeinsames Studienobjekt war die erste geschlossene Darstellung einer Generalisierung des Shannonschen Konzepts auf Informationsübertragung in Kanälen durch Amiel Feinstein (1958). Grundlage für diese Auswahl war also nicht die sich immer weiter differenzierende kybernetische Begriffswelt als solche, sondern die potentielle Brauchbarkeit der verfügbaren Modelle für die angemessene Darstellung von Funktionsprinzipien der anzunehmenden spezifischen Prozessabläufe. Dass hierzu auch andere, deterministische, Ansätze gehörten, war Klix lange schon bewusst gewesen. Nur hatten über viele Jahre effektiv nutzbare Beschreibungen gefehlt. Der Anschluss kam im Ergebnis zunehmender Bekanntheit des Berliner Arbeitskreises Ende der 1960er-Jahre sozusagen ins Haus gelaufen: an einem der Kolloquiums-Dienstage in der Person von Dr. Voss als Emissär des Nijmeger Institut, mit E. Leeuwenbergs Arbeit zur Strukturellen Information im Gepäck (Leeuwenberg 1967). Klix, der sich zu diesem Zeitpunkt zufällig auf Reisen befand, hat die Arbeit alsbald aufgegriffen. Für den Autor dieser Zeilen wurde sie zum Ausgangspunkt einer Zusammenarbeit, die – nach mehr als einem weiteren Jahrzehnt – in Leipzig schließlich in einen Universitätsvertrag einmünden sollte.

1.2 Mentale Operationszeiten bei einfachen und komplexen Anforderungen

Eine wichtige Implikation des von Leeuwenberg eingeführten Informationsmaßes bestand darin, dass für einfache Aufgaben eine serielle Verarbeitung von Informationseinheiten perceptiver Repräsentationen nahe gelegt wurde. Für den an Prozessabläufen Interessierten hatten die Ergebnisse aber noch einen Mangel: Sie erlaubten keine Aussagen über verschiedene Anforderungen hinweg bezüglich vergleichbarer Verarbeitungsschritte und deren Verknüpfung in komplexen Abläufen.

Eine Nachricht, die sich für die Lösung dieses Problems als entscheidend erweisen sollte, war mit Mitteilungen über eine von Saul Sternberg (vgl. Sternberg 1966) entwickelte Experimentalsituation von ingenieüser Einfachheit bereits früher am Institut eingetroffen. Darin hatten Probanden unter-

schiedlich große Teilmengen von Mengen uniform strukturierter Objekte („Items“), z.B. Ziffern, im Gedächtnis zu halten. Danach hatten sie, so schnell wie mit ausreichender Sicherheit möglich, zu entscheiden, ob ein dargebotenes Item zur jeweils memorierten Teilmenge gehörte oder nicht. Die in guter Näherung linearen, für positive und negative Antworten gleichen Anstiege der Reaktionszeiten mit der Anzahl der Items ließen sich zwanglos als Belege für einen im Gedächtnis ablaufenden erschöpfenden seriellen Vergleich des Testitems mit den dort gespeicherten Items interpretieren. Damit sollte die Zunahme der Reaktionszeit pro zusätzlichem Item ein Maß der für einzelne Items erforderlichen Operationszeit sein.

Nicht untypisch für das Flair und die vernetzte Arbeitsweise am Institut, hatte die Information über Sternbergs Experiment den Autor durch einen Anruf des Linguisten Manfred Bierwisch am Morgen desselben Tages erreicht, an dem Klix ihn gegen Mittag zu sich bat, um ihm die von einer Tagung mitgebrachte Arbeit Sternbergs zu überreichen. Er tat das mit der Bemerkung, dass damit nun wohl eine Prozedur zur Verfügung stehe, die im Grundsatz auch in anderen Situationen die Berechnung kognitiver Operationszeiten erlauben sollte.

Sternberg's Originalparadigma ist in ungezählten Abwandlungen zur Anwendung gekommen. Ganz im Geiste von Klix' Bemerkung, ging es in den späteren Arbeiten am Institut um etwas anderes, nämlich Übertragungen der grundlegenden Logik auf verschiedene Klassen von Anforderungssituationen. Die Umsetzung dieses Anliegens erforderte nicht nur Erkundungsversuche zum Zwecke der Erprobung neuer paradigmatischer Situationen, sondern auch den Aufbau von Forschungsgruppen, deren studentische Mitglieder zumeist die eigentlichen Träger der Forschungsarbeit wurden.

Unter den ausgereiften Studienobjekten der siebziger Jahre nahmen schließlich komplex strukturierte Objekte und Situationsbeschreibungen die Position uniformer Objekte im Sternbergparadigma und relationale Prüfalgorithmen die Stelle einfacher serieller Vergleiche ein. Zur Illustration möge die visuellen Testanforderungen entlehnte Experimentalsituation dienen, die in der von Autor zusammen mit Scheidereiter angeleiteten studentischen Forschungsgruppe „Perzeption“ zur Anwendung kam. Als Testmaterial dienten hier Stränge aus unterschiedlich gemusterten quadratischen Elementen. Die Aufgabe der Probanden war es, Wiederholungen verschieden positionierter Teilstränge gleicher Musterung zu erkennen. Die Vergleichbarkeit des angenommenen Lösungsprinzips mit dem für Sternbergs Aufgabe unterstellten Prinzip bestand in der Annahme, dass in der erweiterten relationalen Anforderung interne isomorphe Repräsentationen der Musterstränge in seri-

ellen Schritten miteinander verglichen werden. Die Anlage des Experiments mit seinen Variablen erlaubte durch deren genau bestimmte Wirkung im Rahmen des Modells vielfältige Konsistenzprüfungen, die das angenommene Schema der Detektion von Wiederholungen eindrucksvoll bestätigten (vgl. Geissler et al. 1978).

2. Der TQM-Ansatz: Anlässe und Schritte der langsamen Entstehung

2.1 „Magische“ Ordnung in Operationszeiten: Die Entdeckung ganzzahliger Beziehungen

Für die große Mehrheit quantitativ orientierter Psychologen sind Konstanten gewohnheitsgemäß (immer noch) nichts anderes als stabile Größen, die sich bei der Anpassung von Daten an angenommene, mathematisch ausdrückbare Gesetzmäßigkeiten ergeben können. Ebenso ist die Auffassung habituell, dass es darüber hinaus keine durch die Psychologie beantwortbare Frage zu deren Natur oder Herkunft gibt. Sollten sich Übereinstimmungen von Parameterschätzungen zwischen qualitativ unterschiedlichen Situationen herausstellen, so wird man bestenfalls auf deren Herkunft aus Eigenschaften der zu Grunde liegenden physiologischen Mechanismen und Vorgänge verweisen und damit die Hirnphysiologie in die Verantwortung nehmen.

Die Logik von TQM besagt, bezogen auf zeitliche Regularitäten der menschlichen Kognition, dass die Dinge auch ganz anders liegen könnten: Sollte sich nämlich zeigen, dass aus psychologischen Datensätzen stabile Konstanten herausgefiltert werden können, die die Wirkung externer Variablen auf mentale Leistungen und deren Zusammenhänge bestimmen, so könnten diese Konstanten und Beziehungsstrukturen gerade umgekehrt als effektive Hilfsmittel dazu dienen, in den sonst extrem unübersichtlichen Erregungsmustern des Gehirns die zugehörigen physischen Korrelate zu identifizieren.

Um eine solche Möglichkeit ernsthaft prüfen zu können, muss der Blick von den Inhalten der untersuchten Vorgänge weg auf scheinbar rein formale Aspekte gerichtet werden. Und an die Stelle der Würdigung der Resultate eines inhaltlich wohlgeplanten Versuchs muss die Analyse der Ergebnisse möglichst unterschiedlicher Experimente treten. Im Kontrast zu den gängigen Routinen des Forschungsalltags verlangte diese Option den Zugang zu ausreichend diskrepanten und dabei doch vergleichbaren Datenquellen. Am Tisch der gemeinsamen Kolloquien der Berliner Forschungsgruppen war gerade diese Bedingung erfüllt wie kaum irgendwo sonst.

Um das allmähliche Aufdämmern des Bilds einer strengen zeitlichen Ordnung einigermaßen nachzuvollziehen, genügt heute ein Blick in zwei Publikationen. Der oben schon zitierte Bericht der Arbeitsgruppe „Perzeption“ weist als Schätzungen von Operationszeiten die Werte (in ms) 62, 62, 63 und 54 aus. In der zusammenfassenden Darstellung von Experimenten mit semantischen Materialien der Gruppe „Begriffsbildung“ (vgl. Hoffmann et al. 1980) erscheinen dagegen in den meisten Fällen wesentlich höhere Werte. So erhielt Hoffmann neben einer Operationszeit von 55 ms auch Beträge von ungefähr 250 ms. Elke van der Meer konnte für die von ihr untersuchten Bedingungen zeigen, dass alle empirischen Werte mit hoher Präzision als Kombinationen apriori angenommener Operationszeiten von 220 ms oder 110 ms dargestellt werden können. Für sechs Fälle erhält man, in der berichteten Reihenfolge, als (relative) systematische Abweichungen von den empirischen Werten 0; 0; 0,007; - 0,01; 0,016 und 0,028. Die Voraussagen liegen somit im Mittel nur ca. sieben Tausendstel über den empirischen Werten, was für 220 ms einem korrigierten Wert von 218,5 ms entspricht.

An den Schätzungen unmittelbar erkennbar ist eine Verdoppelungsbeziehung zwischen ausgezeichneten Operationszeiten in der Nähe von 55, 110 und 220 Millisekunden. Für eine umfassendere Beschreibung lag der Gedanke nahe, unter Einschluss der am besten gesicherten Operationszeiten für Ziffern im Sternbergversuch ($36,81 \pm 0,71$ ms) und dessen Replikation durch Marianne W. Kristofferson 1973 ($36,2 \pm 0,7$ ms) nach einem größten gemeinsamen Teiler Q in der Bedeutung einer modularen Einheit zu suchen. Die Brauchbarkeit dieser Idee illustriert schon ein Überschlag für den Wert $Q = 9,1$ ms, dessen Vielfache $4Q = 36,4$ ms; $6Q = 54,6$ ms; $7Q = 63,7$ ms; $12Q = 109,2$ ms und $24Q = 218,4$ ms (!) den oben angegebenen Schätzungen sehr nahe kommen.

2.2 *Umriss diskreter Verarbeitungsstrukturen*

Mit Strukturen der beschriebenen Art war eine den Daten innewohnende quantenhafte Ordnung aufgedeckt. Vor allem aber konnte mit einem gewissen Recht in dem gefundenen Grundintervall von ca. neun Millisekunden Dauer eine Invariante schrittweiser Informationsverarbeitung vermutet werden. Wie sich aus solchen Elementarzeiten in Verflechtung mit der Aufgabenlösung reguläre Zeitstrukturen wie die beobachteten ergeben können, lag jedoch noch im Dunklen. Um in Richtung auf eine verallgemeinerungsfähige Lösung des Problems voranzukommen, musste man zunächst möglichst nahe an den untersuchten Anforderungen bleiben, bei denen es sich

im weitesten Sinne um visuelle Erkennungssituationen handelte. Kritische Beiträge kamen in einem ersten Schritt aus Studien zur Aktualgenese an strukturierten Objekten, danach auch aus weiterführenden Analysen komplexerer Erkennungsleistungen.

Quantale Epochen der Aktualgenese

Die Möglichkeit eines Vergleichs von Leistungen im Sternbergversuch mit aktualgenetischen Befunden eröffnete sich erstmals 1974 mit einem Tagungsbeitrag von Vanagas et al. (1976). In den dort berichteten Experimenten wurden Probanden in der Erkennung von visuellen Mustern als Elementen von Mengen von Mustern unterschiedlichen Umfangs trainiert. Für den Nachweis elementarer Operationszeiten entscheidend ist, dass bei diesem Versuchstyp die Häufigkeiten richtiger Erkennung, dargestellt als Funktionen der Darbietungszeiten, in die Rolle von Reaktionszeiten als abhängigen Variablen im Sternbergversuch eintreten. Nach extensivem Training zeigten sich stufenartige Verläufe einer mittleren Stufenlänge von ca. neun Millisekunden, in guter Übereinstimmung mit den chronometrischen Schätzwerten für Q (siehe oben). Für die Anzahl der Stufen ergab sich angenäherte Proportionalität zum Logarithmus dualis des Mengenumfangs („Alphabetgröße“), was auf eine stufenweise Abarbeitung analog der für das Hick'sche Gesetz angenommenen hinweist. Eine erst 1984 möglich werdende computergestützte Analyse in Zusammenarbeit mit H. Buffart (vgl. Geissler 1985a) erbrachte als genauere Abschätzung von Q den Wert 9,14 ms, der sich in der Folge als Standard bewährte (vgl. auch Geissler 2018, Tab.1.1, S. 12).

Repräsentation und serielle Abarbeitung: Das Problem der „Scheinbaren Redundanz“

Zusammengenommen stützen die bisher angeführten Beispiele die Annahme, dass unter Bezug auf aufgabenspezifische interne Repräsentationen von Information unterschiedliche, in ihrer zeitlichen Gliederung in quantalen Einheiten aber gleichartige serielle Prozesse ablaufen. Eine volle Deckung zwischen Substrukturen der Objektrepräsentation und zeitlichen Einheiten der ablaufenden Prozesse ist nur bei der Gedächtnissuche im Sternbergexperiment, und auch dort nur im Falle gleichmäßiger Merkmalskodierung, gegeben. Das Prinzip aufgabenabhängiger Nutzung mentaler Repräsentationen ist als „Geleitete Inferenz“ zuerst in Geissler und Buffart (1985) vorgestellt worden. Grundlegend für den experimentellen Nachweis seiner Gültigkeit sind regelhafte Abweichungen („Scheinbare Redundanz“) der beobachteten

Verarbeitungszeiten von Voraussagen, die sich aus der Anzahl der, in einer gegebenen Situation rein logisch notwendigen, Prüfschritte ergeben (Geissler 1985b; vgl. auch Geissler 2004).

Im Weiteren werden Hauptannahmen anhand exemplarischer Befunde eingeführt.

3. TQM: Drei Hauptannahmen im Schnelldurchgang

Hinweise auf universelle Grundlagen

Schon die ersten Anzeichen für gequantelte Abläufe bei einfachen Erkennungsaufgaben hatten die Frage nach einer breiteren oder gar universellen Signifikanz zeitlich quantenhafter Verarbeitung aufgeworfen. Auf der Ebene direkt beobachtbarer Regularitäten waren relevante Vorgänger rasch gefunden, die schon früher erhebliche Aufmerksamkeit auf sich gezogen hatten. Eine einschlägige Entwicklungslinie hatte ihren Ursprung schon Mitte des 19. Jahrhunderts in der durch den Biologen von Baer vorgetragenen Idee einer kleinsten zeitlichen Einheit der Perzeption, dem *Psychologischen Moment*, die eine vorläufige Bestätigung in Berichten über Verschmelzungsschwellen von 1/18 Sekunden ($\sim 55,5$ ms) fand. Etwa der gleiche Wert wurde später von Brecher (Brecher 1933) für den Tastsinn gefunden – mit dem Unterschied, dass Brecher verlässliche Einzeldaten für 14 Personen berichtete, die Messungen an Hautpartien unterschiedlicher Rezeptordichte sowie den Einfluss von Drogen einschlossen. Brechers Ergebnisse wurden schließlich durch von Békésy aufgegriffen in einem Experiment zur Wahrnehmung schwelennaher periodischer Luftdruckschwankungen im Infraschallbereich (v. Békésy 1936), das das erste Beispiel multipler Zeitstrukturen anlog den für Operationszeiten in Erkennungssituationen berichteten Zeiten erbrachte. Im Experiment waren, beginnend im unterschwelligem Bereich, für feste Frequenzen die Reizintensitäten kontinuierlich bis zur Wahrnehmbarkeit gesteigert worden. Im sonst stetigen Schwellenverlauf zeigten sich hierbei senkrechte Brüche, dargestellt als Funktion der Periodendauer bei Perioden von ~ 27 , ~ 31 , ~ 36 , ~ 45 , ~ 55 , ~ 72 , ~ 90 , ~ 110 und ~ 220 Millisekunden, deren partielle Deckung mit den oben für Erkennungssituationen berichteten Operationszeiten (fette Ziffern) offensichtlich ist. Gemäß $3 \times 9.1 = 27.3$; $4 \times 9.1 = 36.4$; $5 \times 9.1 = 45.5$; $6 \times 9.1 = 54.6$; $8 \times 9.1 = 72.8$ und $10 \times 9.1 = 91$ fügen sich aber auch die restlichen Daten perfekt in das Schema ein – mit einer Ausnahme: dem Wert von 31 ms, der ungefähr in der Mitte zwischen zwei benachbarten Werten liegt. Für eine später von Latour (1967) untersuchte ähnlich einfache Situation galt das Gleiche. Es wur-

den neben Latenzen von Augenbewegungen erstmals auch EEG-Alpha-perioden vor und während des Experiments gemessen. Auch hier fand sich eine Ausnahme, die auf die mögliche Existenz eines halb so großen Moduls hinwies.

Diese und weitere Beispiele verdeutlichten, dass die für gedächtnisbasierte kognitive Operationen gefundenen Gesetzmäßigkeiten ganz analog auch für Leistungen galten, die üblicherweise vorgeordneten sensorischen Prozessen zugerechnet werden. Andererseits wiesen die Ausnahmen von der formulierten Ordnung auf die Existenz einer noch feinkörnigeren zeitlichen Strukturierung hin. Damit stand die Herausforderung, alle als Grundlage für die weitere theoretische Arbeit erkennbaren Regularitäten in ein universell formuliertes System konsistenter Annahmen zu gießen.

Die im Folgenden umrissenen Hypothesen knüpfen in ihrer Formulierung jeweils an Gültigkeitsbeschränkungen von bisher formulierten Regularitäten an.

Hypothese H1: Zeitquantum und Hierarchien quantaler Zeitbereiche

Die vordergründig stärksten Einwände gegen ein Zeitintervall von rund neun Millisekunden Dauer als universelle Einheit ergaben sich aus dem Umfang des insgesamt abzudeckenden Bereichs: Als Untergrenze wurde der Wert durch eine steigende Zahl von Ausnahmen in Frage gestellt, die für eine feinere zeitliche Körnung sprachen. Gegen seine Relevanz für längere Perioden – etwa Zyklen des Memorierens im Kurzzeitgedächtnis der Größenordnung von zehn Sekunden – sprach schon allein die anzunehmende Unschärfe seiner Umgrenzung infolge des Weber'schen Gesetzes.

Bei dieser Ausgangslage war nur Verlass auf bewährte Prinzipien der Theoriebildung. Das Auftauchen quantitativ vergleichbarer Strukturen sowohl in elementaren sensorischen Leistungen als auch in Charakteristiken komplexer Informationsverarbeitung sollte danach als Hinweis auf eine breite Relevanz der zugrunde liegenden Regularitäten gedeutet werden, die den Versuch einer stark verallgemeinerten Formulierung rechtfertigt. Eine solche wurde erstmalig in Geissler (1987) vorgestellt und diskutiert. Hierin wurde Q durch eine universelle Grundeinheit Q_0 der halben Größe ersetzt, bezogen auf den vielfach bestätigten Standardwert also durch $Q_0 = 9,14/2 \text{ ms} = 4,57 \text{ ms}$, aus der sich größere quantale Einheiten als ganzzahlige Vielfache $Q_q = q \times Q_0$ ableiten („Zeitquantenhypothese“). Die heutige Datenlage stützt eine noch stärkere Einschränkung, wonach als Vielfache q nur Potenzen von 2 in Frage kommen. Aus theoretischer Sicht ist diese Option inso-

fern bevorzugt, als nur sie einer dichtesten, gleichmäßig aufgebauten Gesamtstruktur aus koexistierenden Zeitbereichen entspricht.

Der zweite Bestandteil der Verallgemeinerung betrifft die Längen möglicher Ketten oder Folgen aus quantalen Perioden Q_q . In Übereinstimmung mit einer uniformen Aufbauregel müsste deren Obergrenze eine universelle Konstante M sein, für mögliche Kettenlängen N also $1 \leq N \leq M$ gelten („Bereichshypothese“). Alle dem Autor bekannt gewordenen aussagekräftigen Daten sprechen für $M = 30$ bei normal befähigten Erwachsenen.

Exemplarische Befunde

Der unter Nutzung des Freiraums abstrakter Theoriebildung abgeleitete Vorschlag einer ganzen Hierarchie von Zeitbereichen hat sich bisher noch nicht definitiv gegenüber einer nach den Grundsätzen empirischer Verallgemeinerung abgeleiteten Hypothese Cavanaghs (1972) durchgesetzt. Danach geht es um einen einzigen Zeitbereich, der sich für Behaltensvorgänge im Kurzzeitgedächtnis aus dessen Kapazitätsbeschränkungen ergibt. Gruppenversuche mit uniformem Material lieferten hypothesenkonforme Abschätzungen (vgl. Bredenkamp in diesem Band). Dass solche Resultate das Vorhandensein einer übergreifenden zeitlichen Organisation nicht ausschließen, zeigen Ergebnisse anderer Analysen, die neben Variationen von Objektklassen- und Anforderungsstruktur auch individuelle Unterschiede einschlossen. In komprimierter Form dokumentiert Abbildung 1a Anzeichen einer versteckten hierarchischen Ordnung. Hierin repräsentieren schwarze Symbole in Anlehnung an Cavanagh für Einzelpersonen berechnete Werte (Puckett/Kausler 1984). Offene Symbole stehen für Schätzungen aus elf Gruppenexperimenten unter Nutzung funktionaler Spannen, die als Schnittpunkte bilinearer Approximationen der Reaktionszeitcharakteristiken für das Kurzzeitverhalten überschreitende Listenlängen berechnet wurden (Puffe 1990).

In der Clusterstruktur der Darstellung finden sich klar abgegrenzte Lücken oberhalb von Höchstwerten in enger Nachbarschaft der theoretischen Abschlußzeiten von $30Q_0 = 30 \times 4,57 \text{ ms} \equiv 137,1 \text{ ms}$ und $30 \times 2Q_0 = 30 \times 9,14 \text{ ms} \equiv 274,2 \text{ ms}$. Das nächsthöhere Vielfache bei etwa 550 ms wird nicht erreicht, liegt aber, wie eine Extrapolation aus dem vorangehenden Cluster (gerahmte Dreiecke) illustriert, genau im Trend.¹

¹ Wir übergehen hier weniger scharf begrenzte Häufungen in der Nähe der Zwanzigfachen von Q_0 , $2Q_0$, und $4Q_0$, die sich als Substrukturen in die beschriebene Ordnung einfügen.

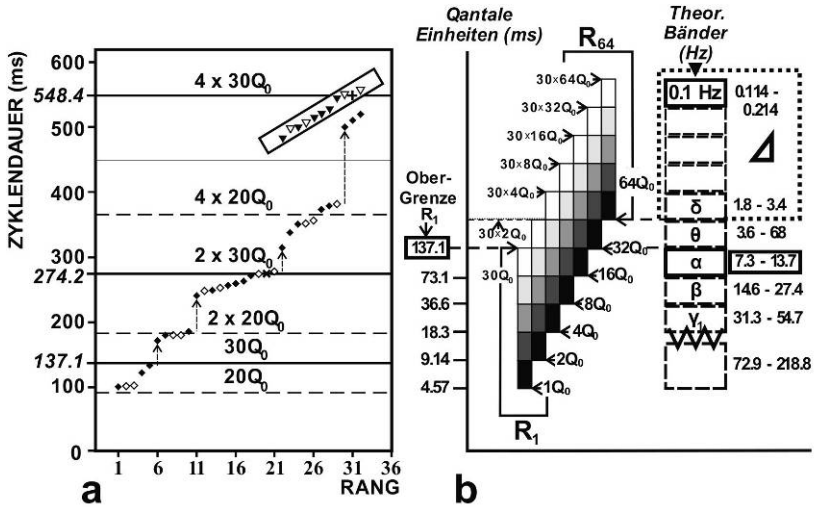


Abb. 1: **a:** Empirische Hinweise auf hierarchische Bereichsstrukturen; **b:** Hierarchie von Zeitbereichen nach TQM und ihre hypothetischen Entsprechungen in Bändern zyklischer Hirnaktivität. Erläuterung im Text

Für das Schicksal der Bereichsannahme entscheidend ist der Nachweis ihrer Gültigkeit auch für Intervalle im Sekunden- und Minutenbereich. Eine ausreichende quantitative Übereinstimmung mit Voraussagen im Geiste von TQM ist nur dann zu erwarten, wenn die funktionale Unabhängigkeit modularer Instanzen der Kognition mit deren Einbindung in ein System ganzheitlicher zeitlicher Organisation verträglich ist. Als Grundlage für eine erste Prüfung ist die Hierarchieannahme auf der linken Seite von Abbildung 1b verbildlicht bis zu einem Vielfachen von 30×2^6 , also dem 1920fachen der quantalen Einheit Q_0 , was einer Maximaldauer von 8,77 Sekunden entspricht. Dieses Vielfache ist als Obergrenze eines Bereichs (R_{64}) dadurch ausgezeichnet, dass die zugehörige Modulare Grundeinheit der Dauer von $2^6 \times Q_0 = 292,5$ ms oberhalb der Obergrenze des kleinsten Bereichs R_1 der Hierarchie bei $30 \times Q_0 = 137$ ms – und somit außerhalb der Darstellungsmöglichkeiten in diesem Bereich – liegt. Deshalb sollte auch bei präzisester möglicher zeitlicher Koordination die „modulare Unabhängigkeit“ der in beiden Bereichen ablaufenden Prozesse garantiert sein.

Zyklen einer Dauer von bis zu ca. zehn Sekunden sind bekanntlich für Vorgänge der auffrischenden Wiederholung im Kurzzeitgedächtnis typisch. Das wirft die Frage nach der Relevanz der quantitativ vorausgesagten Obergrenze auf. Eine vorläufige Antwort kommt aus Studien von Stebel (1987; vgl. hierzu Geissler 2018, S. 26). Von den unterschiedlich ermittelten Schätzungen von 8,2 s; 8,4 s und 8,8 s fällt die höchste mit der vorausgesagten Obergrenze von 8,77 s praktisch zusammen.

Hypothese H2: Hierarchische Segmentierung

Eine andere Beschränkung der formulierten Bevorzugung von annähernd ganzzahligen Vielfachen einer Grundeinheit bestand darin, dass diese Beschreibung Anzeichen massiver Ungleichberechtigung von Mehrfachen unterschiedlicher Größe ignoriert. Besonders auffällig in Reaktionszeitdaten ist der Gegensatz zwischen der dichten Lage kleiner und der weiträumigen Anordnung „großer“ kritischer Vielfacher $N > 10$. Daneben zeigten sich aber auch starke Unterschiede in quantitativen Effektausprägungen, in von Békésy's Daten zum Beispiel zwischen großen Sprunghöhen bei Perioden von ~220, ~110 und ~ 55 ms Dauer einerseits und schwach ausgeprägten Diskontinuitäten bei etwa 91, 72 und 45 ms (in Entsprechung zu $N = 20, 16$ und 10) andererseits. In dieses Bild fügen sich auch Lücken in der Reihe der Mehrfachen bei kleinen Primzahlen ein, die sich bei Gelegenheit einer Nachanalyse fanden (Geissler 1990).

Insgesamt vermittelten diese Ergebnismuster den zwingenden Eindruck, dass als entscheidender Faktor für alle beschriebenen Merkmale nur die Zerlegbarkeit der jeweils anzunehmenden Vielfachen in Frage kommt. Dieser Annahme kam auch insofern herausragende Bedeutung zu als ihre Bestätigung ein Netz von Überprüfungsmöglichkeiten ausspannen sollte. Aber welche auf quantale Epochen bezogene Beschreibung machte sie plausibel? Eine bis heute überzeugende Antwort auf diese Frage wurde als Synchrony-Hierarchie Hypothese zuerst in Geissler (1985b) vorgeschlagen. Die Hypothese hat zwei Bestandteile: (**H₁₁**) Operative wirksame Ketten quantaler Epochen sind kodiert als Bestandteile von Hierarchien synchroner zyklischer Aktivität; (**H₂₂**) Je nach Aufgabenstellung bestimmt die Anzahl möglicher alternativer hierarchischer Kodierungen die Wahrscheinlichkeit und/oder die Ausprägung des realisierten Prozesses oder Zustands.

Quantitative Belege aus der Analyse von Betabewegungen

H₂₂ ist in der vorliegenden Formulierung unvollständig spezifiziert und daher in erster Linie als Ausgangspunkt für die Ableitung genauerer anforderungsabhängiger Beschreibungen zu verstehen. Eine besonders einfache Form nehmen diese an, wenn es um Wahrscheinlichkeiten von Übergängen zwischen unterschiedlichen perzeptiven Interpretationen ein und derselben Reizstrukturen geht. Dieser Fall liegt vor bei spontanen Übergängen zwischen sogenannten Betabewegungen, induziert durch zyklische Ortsveränderungen eines unveränderlichen Einzelreizes, und alternativen Repräsentationen der Darbietungssequenzen als ortsgebundene oszillatorische Veränderungen zweier Objekte. Bei solchen Anordnung treten für feste Darbietungszeiten der Einzelreize Übergänge gehäuft in der Nähe kritischer zeitlicher Abstände (ISIs) zwischen den Darbietungen auf. Um die Annahme einer Beziehung zur Mannigfaltigkeit möglicher hierarchischer Kodierung zu erhärten, ist eine große Zahl von Daten erforderlich. Diese Bedingung konnte erstmalig in Experimenten zu Betabewegungen von Schebera erfüllt werden (vgl. Geissler et al. 1999). Abbildung 2 zeigt Übergangshäufigkeiten aus drei Experimentalserien mit 46 Versuchspersonen, dargestellt als Funktion

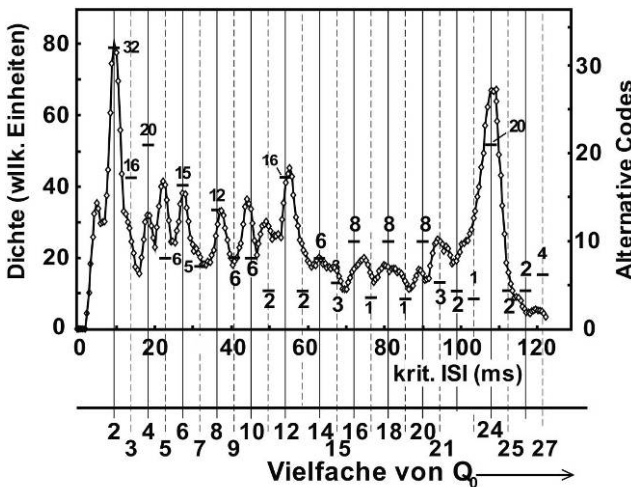


Abb. 2: Übergangshäufigkeiten (geglättet) von Betabewegungen zu ortsfesten Reizinterpretationen in Beziehung zu Anzahlen alternativer Kodierungen quantaler Zyklen (waagerechte Balken). Weitere Erläuterung im Text

der kritischen ISIs zusammen mit der Anzahl alternativer hierarchischer Darstellungen der nächstgelegenen Vielfachen von Q_0 als Maß von deren Bevorzugung entsprechend Hypothese **H₂₂**. Zwischen beiden Größen ergibt sich eine Maßkorrelation von $r = 0,86$. In Anbetracht nicht präzise kontrollierbarer Overshoots als Folge interindividuell variierender Reaktionslatenzen dürfte diese Zahl die Enge der tatsächlich bestehenden Beziehung noch beträchtlich unterschätzen.

Hypothese H3: Die verallgemeinerte Überlagerungshypothese

Ein besonders schwerwiegender Mangel aller bisher betrachteten Formulierungen zeitlicher Regularitäten besteht darin, dass der stochastische Charakter mentaler Prozesse weitgehend unberücksichtigt bleibt. Weitgehend – genau genommen mit einer Ausnahme, denn, als Vorgang interpretiert, kann die Realisierung einer bestimmten Option nach dem obigen Schema hierarchischer Segmentierung als Zufallsentscheidung im Wettbewerb zwischen sich überlagernden alternativen hierarchischen Darstellungen verstanden werden. Hypothese H3 verallgemeinert die Überlagerungsannahme und behandelt ihre Gültigkeit unter verschiedenen Bedingungen als eine Hauptquelle stochastischer Variabilität.

Als zentral für die Weiterführung des TQM-Ansatzes stellt sich ihre Anwendung auf eine fundamentale Form stochastischer Variabilität dar, deren Beschreibung durch G. Th. Fechner als Weber'sches Gesetz am Anfang der wissenschaftlichen Psychologie stand. Abbildung 3 veranschaulicht die Herleitung des Gesetzes für mentale Repräsentationen von Zeit, auf der Grundlage einer einfachen, erstmalig in Geissler (1985b) diskutierten Darstellung²

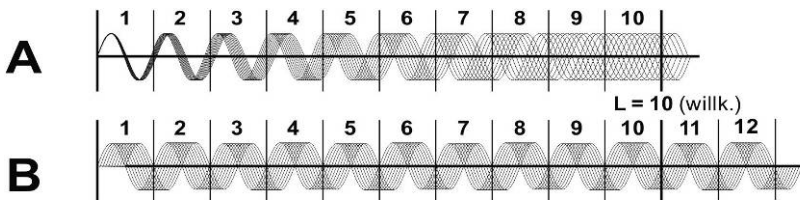


Abb. 3: Schematische Erläuterung des Webergesetzes für Zeit als Konsequenz der Überlagerung zyklische Träger unterschiedlicher Zyklendauer (A) und Phasenlage (B). Erläuterung im Text

² Diese Darstellung setzt für die Komponenten präzise Frequenzen voraus. Für realistischere Versionen ergeben sich ähnliche etwas komplexere Schlussfolgerungen.

als Konsequenz der Überlagerung von oszillatorischen Trägerprozessen leicht voneinander abweichender Periodendauer.

Es ergeben sich zwei Implikationen, die keine direkte Entsprechung im Webergesetz für wahrgenommene Intensitäten besitzen: (1) Wie in Schema A für anfängliche Synchronie dargestellt überdecken die Phasenlagen der sich überlagernden Komponenten infolge ihrer wachsenden Streuung nach einer endlichen Anzahl L von Perioden die nominelle Überlagerungsperiode und beenden damit deren mögliche Funktion als operative Einheit (Hypothese „beschränkter Kohärenzdauer“). (2) Im Kontrast hierzu bleibt die anfängliche Streuung der Phasenlagen bei gleicher Periodendauer der Komponenten (Schema B) erhalten. Beide Eigenschaften zusammen ergeben das von empirischen Fassungen des Gesetzes her für Ebenmerkliche Unterschiede bekannte Bild der Summe aus einem mit konstantem Anstieg linear wachsenden Anteil und einer bedingungsabhängigen Konstante entsprechend $\Delta t = C \cdot t + K$ – wobei nur für C ein konstanter Wert von universeller Geltung für mentale Zeit in allen ihren Erscheinungsformen erwartet wird.

Die Eigenschaft (1) ist grundlegend für eine Re-Interpretation der bisherigen Strukturannahmen. Danach entspricht L („Kohärenzlänge“) dem postulierten Bereichslimit M , und die von TQM angenommene Verdopplungsordnung folgt als Konsequenz aus dem lückenlosen Übergang zur jeweils nächstgrößeren quantalen Einheit. Zusätzlich ergibt sich mit der Voraussage einer festen Bindung zwischen M und der (dem Webergesetz folgenden) stochastischen Variabilität – eine Beziehung, deren experimentelle Überprüfung 1985 noch in weiter Ferne zu liegen schien. Die Möglichkeit ergab sich erstmals für die Daten aus den Untersuchungen zu Betabewegungen. Wie Kompass (2001) zeigen konnte, kommt der Anstieg der Antwort-Variabilität von $\sim 1/27 \times \text{ISI}$ in der Tat dem theoretisch postulierten Verhältnis nahe (vgl. Geissler 2018, S. 35).

Hier gilt es festzuhalten, dass die geschilderte Re-Interpretation weit verbreiteten Annahmen über Ursprung und Bedeutung der stochastischen Variabilität mentaler Vorgänge widerspricht, wonach es sich bei kapazitiven und zeitlichen Beschränkungen kognitiver Prozesse, insbesondere von Gedächtnisfunktionen, um Konsequenzen unvermeidlichen neuronalen „Rauschens“ handelt. Im Gegensatz hierzu stützt die TQM-basierte Interpretation die Annahme einer streng gesetzmäßig gesteuerten und für alle Funktionen und Zeitbereiche einheitlich implementierten Ordnung zeitlicher Begrenzung, deren Prinzipien bei ungestörter Wirkung die jeweils möglichst „rechtzeitige“ Freigabe von verfügbarer Kapazität und eine damit harmonisierte Übernahme zu bewahrender Information sicherstellen.

4. Schlussbetrachtung: TQM als Werkzeug integrativer Theoriebildung

Zum Abschluss der vorliegenden skizzenhaften Einführung in Logik und empirische Grundlagen des TQM-Ansatzes liegt es nahe, nach Perspektiven seiner Fortführung und seinem denkbaren Beitrag zu forschungsstrategischen Veränderungen zu fragen.

Bezüglich einer möglichen Rolle des Ansatzes als Bestandteil und Instrument psychologischer Theoriebildung müssen wir uns hier auf die Nennung von Aspekten beschränken. Im Vergleich zum gegenwärtigen Stand der Entwicklung muss im nächsten Schritt seiner Bewährung naturgemäß die dynamische Implementation der abgeleiteten numerischen und strukturellen Invarianten im Vordergrund stehen. Der zu erwartende Gewinn besteht wesentlich in der Aufdeckung und Nutzung von Zusammenhängen in der Prozessarchitektur, die bei traditionell fallbezogener Analyse verborgen bleiben müssen, und in deren Rolle als Kriterien der Kreuzvalidierung spezifischer Voraussagen.

Eine zweite mögliche Entwicklungslinie bezieht sich auf den Ansatz selbst: Die bisherige Beschränkung auf zeitbezogene Invarianten besagt nicht, dass nicht auch Konstituenten anderer Dimensionalität als Teil einer allgemeineren, auf universelle Invarianten bezogenen Darstellung zu verstehen sind. Im Gegenteil, Befunde von Teghtsoonian (1971), deren Diskussion den Rahmen dieses Berichts überschreitet, weisen auf enge Parallelen zwischen Invarianten bereichsbezogener Repräsentationen von Zeit und Intensität hin (vgl. Geissler 2018, S. 36).

TQM als Ausgangspunkt integrativ psycho-physischer Analysen

Mit den so formulierten Erwartungen bleibt die wahrscheinlich fundamentalste Option der Weiterführung noch außer Betracht: Konstanten wie Q_0 , M und C haben ihre Basis nicht in den variablen Inhalten menschlicher Kognition, sondern sie verkörpern funktionell wirksame Eigenschaften ihres physischen Trägers, des Gehirns. Zugleich sind sie in der nach TQM anzunehmenden tragenden Rolle für den koordinierten Ablauf kognitiver Prozesse in der Hirnforschung bisher noch unbekannt. Die zu Recht beklagte weitgehende Unverbundenheit psychologischer und hirneurophysiologischer Theoriebildung stellt sich aus dieser Sicht als Folge eines grundlegenden Mangels dar: dem Fehlen einer wechselseitig akzeptierten Theorie der Beziehungen zwischen verhaltensbasierten und physiologischen Konstrukten, die als Basis einer integrativen psycho-physischen Forschungsstrategie die-

nen könnte. Dabei hat es historisch an relevanten Konzepten nicht gefehlt, die als Ansätze in dieser Richtung verstanden werden können. So definierte Fechner 1860 als sogenannte Psychophysische Tätigkeit denjenigen Teil von Vorgängen im Gehirn, die in eindeutiger Entsprechung zu psychologisch dokumentierten geistigen Phänomenen und Vorgängen stehen (Fechner 1860; Bd. 1, S. 10). Ähnlich postulierte die Gestaltpsychologie ihr Isomorphieprinzip unter Bezug auf das sogenannte Psychophysische Niveau als notwendige und hinreichende Voraussetzung der Organisation von Hirnprozessen.

In der durch TQM vermittelten Sicht entfällt die Notwendigkeit, in diesem Sinne als neurales Äquivalent psychologisch identifizierter Repräsentationen ausgezeichnete Substrukturen der Hirntätigkeit anzunehmen. Dagegen stellt sich die *funktionelle Organisation* von Hirnprozessen als eine unter der Wirkung metrischer und struktureller Invarianten hierarchisch gegliederte Sequenz von ganzheitlichen Resonanzzuständen dar. Dieser strategisch neuen Beschreibung wohnt inne (1), dass es (jedenfalls über eine bestimmte Komplexitätsstufe untersuchter Vorgänge hinaus) nur mit Kenntnis auf der Verhaltensebene objektivierter funktionaler Gesetzmäßigkeiten möglich ist, die jeweils relevanten physischen Äquivalente zu entschlüsseln. Umgekehrt gilt aber auch (2), dass der Ausbau einer zusammenhängenden verhaltensbasierten Darstellung ohne Kenntnis physischer Entsprechungen bestenfalls nur höchst fragmentarisch möglich ist.

Wenn diese Annahmen wohlbegründet sind, kann man in TQM die Anfänge einer Theorie erblicken, die eine permanente Form interdisziplinärer Erforschung kognitiver Prozesse fundiert. Bezüglich einer breiteren Ausleuchtung dieser Perspektive sei auf Geissler (1991, 1992, 1997, 2000) und auf weitere einschlägige Arbeiten mehrerer Autoren in Lachmann und Weis (2018) verwiesen. Hier müssen zum Ausblick am Schluss der Arbeit zwei illustrierende Beispiele genügen.

Bezüglich (A) ergibt sich ein relevantes Problem aus trotz ihrer langen Bekanntheit noch wenig verstandenen hirnphysiologischen Ergebnissen, die für eine ausgezeichnete Stellung des EEG Alphabands in der zeitlichen Architektur menschlicher Kognition sprechen. Bei der Ableitung einer verhaltensbasierten Hypothese hierzu kann die rechte Seite von Abbildung 1 gute Dienste leisten. Darin sind hypothetische EEG-Frequenzbänder in 1:1-Korrespondenz zu regulären Substrukturen der links dargestellten Hierarchie von Zeitbereichen definiert. Aus dieser Korrespondenz folgt für das angenommene, dem Alpha-Frequenzbereich entsprechende Band eine bevorzugte Stellung daraus, dass seine Obergrenze (als Periodendauer ausgedrückt) mit der des kleinsten quantalen Zeitbereichs R_1 zusammenfällt, während die

Obergrenzen der übrigen Bänder sich entweder als ganzzahlige Teiler oder Vielfache hieraus ableiten. Die angenommene Entsprechung ermöglicht quantitative Vergleiche zwischen verhaltens- und substratbasierten Konstrukten. Eine erste Einschätzung erlaubt Abbildung 4. Hierin sind für das Alphaband vorausgesagte Grenzen zusammen mit 22 von Experten benutzten physiologischen Definitionen (nach Klimesch 1999) dargestellt. Unter den nach TQM formal zulässigen Werten³ 28, 30 und 32 für M, ergibt sich nur für den aufgrund von Verhaltensdaten empirisch ausgezeichneten Wert von M = 30 eine genähert symmetrische Beziehung zwischen vorausgesagter Erstreckung und empirisch fundierter Verteilung.

Im Falle weiterer Bestätigung der betrachteten Re-Interpretation von EEG-Bändern dürfte ein tiefgreifender Unterschied gegenüber üblichen Auffassungen in den Mittelpunkt rücken, der sich aus der Überlappung von Zeitbereichen in Entsprechung zu einer richtungsabhängig asymmetrischen Generierung zyklischer Trägerprozesse ergibt.

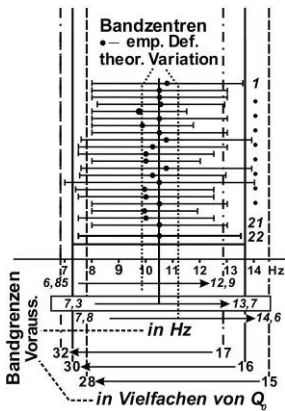


Abb. 4: Empirische Experten-Definitionen des EEG-Alphabands (22 begrenzte Waagerechte) sind nur mit der TQM-Vorausage M = 30 verträglich*

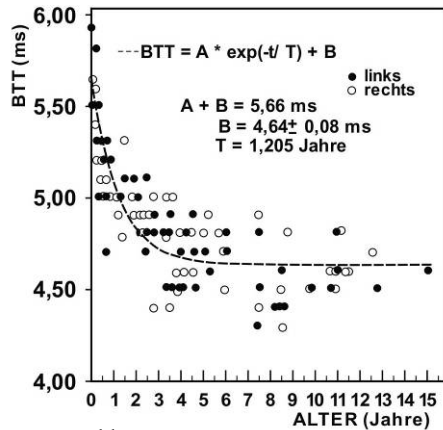


Abb. 5: Hirnstamm-Übertragungszeiten (BTT) nach Fabiani et al. (1979) als hypothetisches Maß des Entwicklungsgangs von Q_0 von der Geburt bis zum Alter von 15 Jahren*

* Erläuterung im Text

3 Die Primzahl-Vielfachen 29 und 31 von Q_0 scheiden aus weil nicht gleichmäßig segmentierbar.

Abbildung 4 illustriert exemplarisch die umgekehrte Möglichkeit, wie in Fällen, in denen TQM derzeit keine Voraussagen gestattet, aus physiologischen Befunden hypothetische Aussagen über mögliche Verhaltensäquivalente gewonnen werden können. Abbildung 5 zeigt nach Fabiani et al. (1979) für Kinder im Alter bis zu 15 Jahren sogenannte Brain-Stem Transmission Times (BTTs), definiert als Zeitabstände zwischen Ableitungsextrema. In diesem Falle spricht ein Schätzwert der Asymptote von $4,64 \pm 0,08$ ms zusammen mit den hier gut bekannten neuronalen Grundlagen für die Vergleichbarkeit mit dem für Q_0 angenommenen Standardwert von 4,57 ms für Erwachsene. Das Ergebnis begründet somit die Annahme, dass der wiedergegebene Trend den Entwicklungsgang der universellen Konstante repräsentiert.

Literatur

- Békésy, G. v. (1936). Über die Hörschwelle und Fühlgrenze langsamer sinusförmiger Luftdruckschwankungen. In: *Annalen der Physik*, Bd. 5/H. 26, S. 554–566
- Brecher, G. A. (1933). Die Entstehung und biologische Bedeutung der subjektiven Zeiteinheit – des Momentes. In: *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, Bd. 18, S. 204–243
- Cavanagh, J. P. (1972): Relation between the immediate memory span and the memory search rate. In: *Psychological Review*, Bd. 79, S. 525–530
- Fabiani, M.; Sohmer, H.; Tait, C.; Gafni, M.; Kinarti, R. (1979): A functional measure of brain activity: Brain stem transmission time. In: *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Bd. 47/H. 4, S. 483–491
- Fechner, G. Th. (1860), zit. nach Fechner, G. Th. (1964): *Elemente der Psychophysik*. Teil I, S. 1–336; Teil II, S. 1–569. Nachdruck E. J. Bonset, Amsterdam
- Feinstein, A. (1958): *Foundations of Information Theory*. New York: McGraw Hill
- Geissler, H.-G.; Klix, F.; Scheidereiter, U. (1978): Visual Recognition of Serial Structure: Evidence of a Two-stage Scanning Model. In: Leeuwenberg, E. L. J.; Buffart, H. F. J. M. (eds.): *Formal Theories of Perception*. Chichester u.a.O.: John Wiley and Sons, S. 299–314
- Geissler, H.-G. (1985a): Zeitquantenhypothese zur Struktur ultraschneller Gedächtnisprozesse. In: *Zeitschrift für Psychologie*, Bd. 193/H. 4, S. 347–362
- Geissler, H.-G. (1985b): Sources of seeming redundancy in temporally quantized information processing. In: d'Ydewalle, G. (ed.): *Cognition, information processing, and motivation. Proceedings of the XXIII International Congress of Psychology of the I.U.Psy.S.*. Selected/ Revised Papers. Bd. 3. Amsterdam: North-Holland, S. 199–228
- Geissler, H.-G. (1987): The temporal architecture of central information processing: Evidence for a tentative time-quantum model. In: *Psychological Research*, Bd. 49/H. 2–3, S. 99–106
- Geissler, H.-G. (1990): Foundations of quantal processing. In: Geissler, H.-G. (ed.): *Psychophysical explorations of mental structures*. Göttingen: Hogrefe, S. 193–210

- 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. In: *Zeitschrift für Psychologie*, Bd. 199/ H. 2, S. 121–143
- Geissler, H.-G. (1992): New magic numbers in mental activity: On a taxonomic system for critical time periods. In: Geissler, H.-G.; Link, S. W.; Townsend, J. T. (ed.): *Cognition, Information Processing and Psychophysics*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, S. 293–321
- Geissler, H.-G. (1997): Is there a Way from Behavior to Nonlinear Brain Dynamics? On Quantal Periods in Cognition and the Place of Alpha in Brain Resonances. In: *International Journal of Psychophysiology, Special Issue*, Bd. 26, S. 381–393
- Geissler, H.-G. (2000): Zeitverarbeitung – Verarbeitungszeit: Temporale Invarianten und oszillatorische Mechanismen in Wahrnehmung und Gedächtnis. In: *Zeitschrift für Psychologie*, Bd. 208, S. 129–168
- Geissler, H.-G. (2004): Functional Architectures in Structural Recognition and the Role of “Seeming Redundancy”. In: Kaernbach, Chr.; Schröger, E.; Müller, H. (eds.): *Psychophysics beyond Sensation*. London u.a.O.: Lawrence Erlbaum Ass., S. 157–196
- Geissler, H.-G. (2018): Deciphering the Time Code of the Brain: From Psychophysical Invariants to Universals of Neural Organization. In: Lachmann, Th.; Weis, T. (eds.): *Invariances in Human Information Processing*. New York, London: Routledge, Taylor and Francis, S. 3–50
- Geissler, H.-G.; Buffart, H. (1985): Task-dependency and quantized processing in classification. In: d’Ydewalle, G. (ed.): *Cognition, information processing, and motivation. Proceedings of the XXIII International Congress of Psychology of the I.U.Psy.S.* Selected/ Revised Papers. Bd. 3. Amsterdam: North-Holland, S. 277–294
- Geissler, H.-G.; Schebera, F.-U.; Kompass, R. (1999). Ultra-precise quantal timing: Evidence from simultaneity thresholds in long-range apparent movement. In: *Perception & Psychophysics*, Bd. 61/H. 4, S. 707–726
- Hoffmann, J.; Klix, F.; van der Meer, Elke; Metzler, P. (1980): Structure and Process in Human Memory. In: Klix, F.; Krause, B. (eds.): *Psychological Research*. Humboldt Universität Berlin 1960–1980. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, S. 133–161
- Klimesch, W. (1999): EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. In: *Brain Research Reviews*, Bd. 29/H. 2–3, S. 169–195
- Klix, F. (1970): *Information und Verhalten*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften
- Kompass, R. (2001): *Zur Analyse zeitlich-diskreter Strukturen in der Wahrnehmung*. Lengerich: Pabst Science Publishers
- Kristofferson, M. W. (1973): Effects of practice on character-classification performance. In: *Canadian Journal of Psychology*, Bd. 26/H. 1, S. 54–60
- Lachmann, Th.; Weis, Tina (eds.) (2018): *Invariances in Human Information Processing*. New York, London: Routledge, Taylor and Francis
- Latour, P. L. (1967): Evidence of internal clocks in the human operator. In: *Acta Psychologica*, Bd. 27, S. 341–348
- Leeuwenberg, E. L. J. (1967): Structural Information of visual patterns: An efficient coding system in perception. The Hague u.a.O.: Mouton

- Puckett, J. M.; Kausler, D. H. (1984): Individual differences and models of memory span: A role for memory search rate? In: *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, Bd. 10/H. 1, S. 72–82
- Puffe, M. (1990): Quantized speed-capacity relations in short-term memory. In: Geissler, H.-G. (ed.): *Psychophysical explorations of mental structures*. Göttingen: Hogrefe, , S. 290–302
- Stebel, J. (1987): Gedächtniswirkungen im Sekundenbereich – untersucht an Reaktionen auf zyklisch dargebotene Lichtsignale. In: Geissler, H.-G.; Reschke, K. (Hg.), *Psychophysische Grundlagen mentaler Prozesse*. Leipzig: Universitätsverlag, S. 93–121
- Sternberg, S. (1966): High-speed scanning in human memory. In: *Science*, Bd. 153 (3736), S. 652–654
- Teghtsoonian, R. (2012): The standard model for perceived magnitude: A framework for (almost) everything known about it. In: *American Journal of Psychology*, Bd. 125/H. 2, S. 165–174
- Vanagas, V.; Balkelite, O.; Bartusjavicus, E.; Kirvialis, D. (1976): The quantum character of the recognition process in the visual analysator of humans (in Russian). In: Gleser, V. D. (ed.): *Information processing in the visual system*. Leningrad: Akademie der Wissenschaften der UdSSR, S. 26–30