

3.3 Hoffmann, M.H.W.: $6 + 4 = 7 + 3 = 10$? – Curriculum-Entwurf und Lerntheorie

Einleitung

Durch die Umstellung der Diplomstudiengänge auf Bachelor- und Masterstudiengänge sind an praktisch jeder Fakultät für Ingenieurwissenschaften in Deutschland und anderen europäischen Ländern neue Curricula zu entwerfen. Schnell wird den Betroffenen klar, dass eine einfache Aufteilung eines Diplomcurriculums in zwei Teile nicht zum Erfolg führt.

Was aber macht ein gutes Curriculum aus? Fachliche Konsistenz ist natürlich eine Selbstverständlichkeit. Aber gibt es noch mehr zu beachten?

Der freundlich gemeinte Rat der Kollegen aus Psychologie, Philosophie und Pädagogik, sich mit Lerntheorien vertraut zu machen, führt oft nicht zum gewünschten Resultat, da es eine Vielzahl von Lernmodellen gibt, von denen die meisten komplexe Lernfortschritte nur unzureichend erklären können. Den Designer eines Ingenieurscurriculums interessiert beispielsweise, ob ein Lernmodell in der Lage ist, die Unterschiede zwischen auswendig gelernten Standardmethoden zur Lösung eines Standardproblems und der Lösung von Problemen auf der Basis eines tieferen Verständnisses plausibel zu machen. Hier findet man unter den buchstäblich hundert von Modellen, die sich oftmals nur in Geringfügigkeiten unterscheiden, in nur ganz wenigen Fällen geeignete Ansätze.

Da die Denk- und Argumentationsweisen von Ingenieur- und Naturwissenschaftlern auf der einen Seite und Psychologen, Philosophen und Pädagogen auf der anderen Seite oft sehr weit auseinander liegen, wird die Geduld der Ersteren bei der Suche nach einem geeigneten Modell oft auf eine harte Probe gestellt.

Darum wird hier nach einer kurzen, zusammenfassenden Darstellung von Lernmodellen und –theorien ein Modell des Lernens vorgestellt, welches Lernen als Signal verarbeitenden Prozess in einem System mit verschiedenartigen Gedächtnistypen darstellt und damit der Denkweise von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern entgegen kommt. Es basiert auf neueren Resultaten der Neuropsychologie. Diese ist inzwischen in der Lage, viele in-vivo-Messungen durch bildgebende Verfahren [1], wie beispielsweise Positron-Emissions-Tomographie (PET), oder funktionale Magnetresonanzverfahren (functional magnetic resonance imaging, fMRI) am menschlichen Hirn vorzunehmen und so das Modell zu unterstützen. Das Modell ist zudem in der Lage, die an vielen Stellen als Standard angesehene Lerntaxonomie¹ nach Bloom et al. [2] zu erklären.

In der Folge wird die Frage geklärt werden, wie Curricula optimiert werden können, um den Lernfortschritt zu maximieren, und ob Lernfortschritt eine lineare Funktion des zum Lernen erforderlichen Zeitaufwandes ist. Damit wird die Frage geklärt werden können, ob eine Aufteilung einer Gesamtstudien-dauer von 10 Semestern in $6 + 4$ oder $7 + 3$ oder eine andere Aufteilung besser ist, oder ob die Aufteilung der 10 Semester den Lernfortschritt nicht beeinflusst.

Überblick über Lerntheorien

Nach Shuell [3] „beinhalten nahezu alle Lernkonzepte explizit oder implizit drei Kriterien: die Veränderung in dem Verhalten oder der Fähigkeit einer Person etwas zu tun, die Bedingung dass diese Veränderung aus Erleben oder Erfahrung resultiert, und die Bedingung, dass diese Veränderung nachhaltig ist.“

¹ Lerntaxonomie = Klassifizierung der erlernten Kompetenzen und Fähigkeiten

Weil eine Verhaltensänderung oder der Erwerb von Fähigkeiten ohne gute Gründe sehr unwahrscheinlich ist, fügt Hoffmann [4] dem noch ein Kriterium des Vergleiches bzw. der Beurteilung hinzu. Demnach wird Lernen als Prozess definiert, in welchem die Beurteilung einer vorgegebenen Informationsmenge und einer Liste potenzieller Konsequenzen aus dieser Beurteilung nachhaltig als Ergebnis einer vergleichenden Beobachtung oder aus dem Vergleich aktueller mit früherer Erfahrung verändert wird.

In der geisteswissenschaftlichen Fachliteratur wird eine Vielzahl von Lernmodellen und den darauf aufbauenden Lerntheorien beschrieben, die daran gemessen werden müssen, ob sie den oben definierten Lernprozess widerspruchsfrei erklären. Gleichzeitig müssen sie konsistent sein, dürfen also nicht im Widerspruch zum „Experiment“, d.h. der täglichen Erfahrung stehen.

Ein Überblick mit Referenz auf etwa hundert besonders wichtigen Quellen zur Lerntheorie sowie ein Nachschlagewerk der wichtigsten Begriffe wird von Leonhard [5] gegeben. Die meisten heute gebräuchlichen Lernmodelle/Lerntheorien wurden überwiegend während des letzten Jahrhunderts entwickelt. Einige Pioniere der Lerntheorie wie beispielsweise Dewey [6] und Lewin [7] haben Modelle entwickelt, die auch heute noch zitiert werden. Modernere Theorien wurden von Piaget [8], Gagné [9] oder Bandura [10] geschaffen, um nur einige zu nennen.

Lerntheorien werden grob in vier Kategorien eingeteilt, die behavioristische, die kognitivistische, die konstruktivistische und die humanistische.

Letztere ist gleichzeitig auch die älteste. Sie geht in der abendländischen Welt bis auf Aristoteles zurück. Für den Naturwissenschaftler oder Ingenieur ist der humanistische Ansatz eher ungewöhnlich. Als Modell wird ein Axiomensystem benutzt. Durch dieses wird postuliert, dass Lernen eine eigendynamisch wachsende Persönlichkeitsentfaltung zu einem ganzheitlichen, reifen Wesen mit starkem Charakter ist. Bekannteste Vertreter dieser Richtung sind Maslow [11] und Rogers [12]. Unglücklicherweise setzen die Axiome dieses Modells bereits die Korrektheit von angenommenen elementaren Schritten des Lernens voraus. Damit lassen sich humanistische Modelle nicht dazu verwenden, diese Schritte zu erklären. Dies soll aber nicht die Bedeutung der auf diesen Axiomen aufgebauten Theorie schmälern.

Behavioristische Lerntheorien können grob dadurch beschrieben werden, dass in ihnen Lernende wiederholt bestimmten Reizen (Stimuli) ausgesetzt und durch ein Belohnungs- oder Bestrafungssystem so konditioniert werden, dass sie mit dem erwünschten Verhalten auf diese Stimuli reagieren. Wesentlicher Protagonist dieser Kategorie war Skinner [13]. Das Modell, das diesen Theorien zugrunde liegt, interpretiert den Lernenden als ein System, das Eingangssignale, die Reize, verarbeitet, und darauf mit Ausgangssignalen, beispielsweise Aktionen, oder Zustandsänderungen, beispielsweise Gedächtnisänderungen, reagiert.

Der Ingenieur erkennt daraus sofort die Problematik des Modells: Das System „lernender Mensch“ ist nämlich keineswegs linear. Daher macht es auch nur begrenzt Sinn, Reaktionen auf isolierte Einzelreize als repräsentativ für das System anzunehmen, denn Letzteres setzt die Gültigkeit des Superpositionsprinzips voraus, welche ja nur für lineare Systeme uneingeschränkt gilt. Zudem enthält das System eine solch große Zahl von Einzelspeichern, dass es illusorisch ist, die Zustandsvariablen des Systems auch nur im Ansatz vollständig zu beschreiben.

Das kognitivistische Lernmodell versucht daher das System „lernender Mensch“ als aus Subsystemen bestehendes vernetztes System darzustellen, das auf Eingangssignale reagiert. Es wird versucht, die in den Subsystemen ablaufenden Prozesse zu modellieren und daraus die Gesamtwirkungsweise des Systems zu erklären. Publikationen von Atkinson und Shiffrin [14], Schneider und Shiffrin [15], Shiffrin und Schneider [16] sowie Craik und Lockhart [17] sind Pionierarbeiten in dieser Kategorie. Ihre Arbeiten stammen aus den sechziger und siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Kritiker ihrer Arbeiten sa-

hen in diesen Modellen den Versuch, das menschliche Hirn als Computer zu modellieren. Dieses lehnten sie angesichts der damit nicht erklärbaren Willensfreiheit ab.

Vom ingenieurwissenschaftlichen Standpunkt aus haben kognitivistische Modelle ihren Reiz, da sie sich stark an Ursache-Wirkung-Prinzipien orientieren. Der Erfolg solcher Modelle steht und fällt aber mit der Identifikation von geeigneten Subsystemen und ihrer korrekten Beschreibung. Dies war in den 1970er Jahren noch nicht in der notwendigen Form möglich.

Konstruktivismus setzt voraus, dass Lernende sich ihr Wissen durch Konstruktion eigener Konzepte aneignen. Dabei testen sie ihre Hypothesen auf Basis früherer Kenntnis und Erfahrung. Vygotskii [18], Piaget [8], Bruner [19] und viele Andere gelten als Protagonisten des Konstruktivismus. Die den konstruktivistischen Lerntheorien zu Grunde liegenden Lernmodelle können zum mindesten in Teilen aus kognitivistischen Modellen hergeleitet werden. Wesentlicher Unterschied ist hier aber die Existenz einer im Lernsystem eingebauten Instanz, welche wahrgenommene Information wertet und einordnet. Dadurch schafft sich der Lernende ein Wertesystem. Er entwickelt sich mit dem Lernprozess und verändert dadurch wiederum sein eigenes Lernverhalten.

Wenn es gelingt, diese wertende Instanz in adäquater Form zu beschreiben und in ein ansonsten kognitivistisches Modell einzubauen, dann entsteht ein dem Ingenieurdenken sehr entgegenkommendes kognitivistisch-konstruktivistisches Modell des Lernens. Ein solches wird hier betrachtet.

Sinneswahrnehmungen und ihre Interpretation als Voraussetzungen des Lernens

In jedem Fall kann „Lernen“ als Signal verarbeitender Prozess interpretiert werden: Information wird über Sensoren (die Sinne) empfangen, gefiltert, klassifiziert, identifiziert und so in Speichern abgelegt, dass sie wieder abgerufen und mit weiterer Information verknüpft werden und gegebenenfalls zur Einleitung von Aktionen benutzt werden kann.

Diese stark vereinfachende Beschreibung legt nahe, zur Analyse des Lernprozesses auch Methoden heran zu ziehen, die aus den Ingenieurwissenschaften bekannt sind. In der Tat stammen die ersten kognitivistischen Lernmodelle indirekt aus ihnen.

Ein in den Geisteswissenschaften öfters zitiertes kognitivistisches Modell stammt von Gagné und Driscoll [20]. Es ist in Abbildung 1 als Blockschaltbild wiedergegeben.

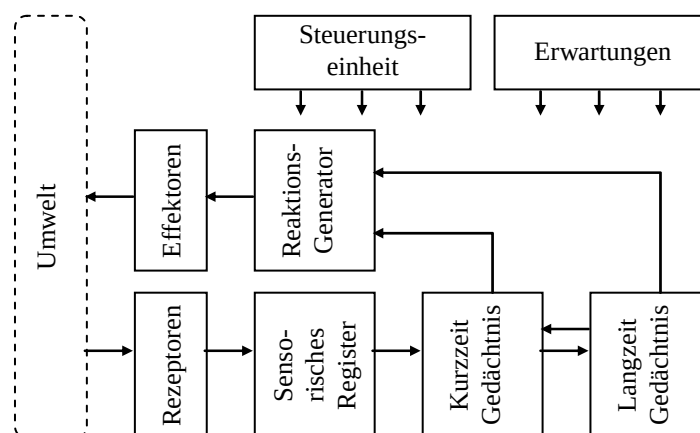


Abbildung 1: Blockschaltbild des Lernmodells nach Gagné und Driscoll, adaptiert aus [20].

Dieses Modell wird zum kognitivistisch-konstruktivistischen Modell, wenn die mit „Steuerungseinheit“ und „Erwartungen“ bezeichneten Blöcke ersetzt werden durch ein wertendes Steuerungssystem.

Der ausgebildete Informationstechniker erkennt in Abbildung 1 sofort eine potenzielle Rückkopplungsschleife. Allerdings ist das Modell in dieser Form noch wesentlich zu grob, um detaillierte Aussagen abzuleiten. Es ist daher sinnvoll, die einzelnen Subsysteme des Gesamtsystems zu verfeinern. Dies muss mit einer Untersuchung der Sinneswahrnehmung beginnen. Glücklicherweise gibt es dazu inzwischen sehr weitgehende Vorarbeiten aus der Neurophysiologie.

Exemplarisch wird das (monaurale) Hörsystem betrachtet. Der erste Teil dieses Systems ist der Rezeptor entsprechend Abbildung 1. Es besteht aus dem Außen-, Mittel- und Innenohr, einem System, in dem akustische Filterung und Anpassung vorgenommen wird, und in dem letztendlich Luftdruckschwankungen in einen parallelen Strom von Signalen [21], [22] im Hörnerv gewandelt werden und über mehrere Zwischenstationen zum Thalamus, einer Schaltstruktur im Zwischenhirn übertragen werden.

Dort erfolgt eine Vorselektion und Verteilung [23], [24] der Nervensignale in die Amygdalae, Hirnstrukturen in den beiden Hirnhälften, welche unter anderem Höreindrücke mit Gefühlen verbinden, eine weitere Struktur, welche für musikalisches Empfinden zuständig ist, und eine Struktur, welche für grundlegende Aktionen der Spracherkennung sorgt. Bei den beiden letzten Strukturen handelt es sich um die primären auditorischen Cortices in den beiden Hirnhälften.

Der Hörnerv und die nachfolgenden Strukturen bis zum Thalamus können als sensorisches Register aufgefasst werden. Information wird in den Nervenzellen elektrisch geleitet und zwischen den Nervenzellen durch Calcium-Ionen und Botenstoffe weitergegeben. Letzteres ermöglicht die selektive Weitergabe der Information wie in einer Schaltmatrix. Auf- und Abbau der Ionen und Botenstoffe benötigt Zeit. Dies erklärt die im Vergleich zu metallischen Leitern relativ langsame Ausbreitungsgeschwindigkeit. Bei Beendigung des Hörstimulus klingt die Leitung durch Abbau der Überträgerstoffe, also durch Dämpfung und Relaxation ab.

Der für das Lernmodell wesentliche Prozessanteil erfolgt im auditorischen Cortex und den ihm nachgeschalteten Strukturen. Wie man aus den wissenschaftlichen und praktischen Untersuchungen zur Spracherkennung weiß, geschieht der weitere Prozess in vielen Einzelschritten. Hier muss also das Gagné-Driscollsche Modell entscheidend verfeinert werden.

Im auditorischen Prozess werden in einem ersten Schritt Phoneme in dem in Nervenimpulse gewandelten akustischen Strom identifiziert. Dies sind die kleinsten, innerhalb einer Sprache bedeutungsunterscheidenden Informationseinheiten [25]. In der deutschen Sprache kommen etwa 40 verschiedene Phoneme vor [26]. Muttersprachler haben im Normalfall keine Schwierigkeiten, diese Phoneme zu unterscheiden. In der eigenen Sprache nicht vorkommende Phoneme anderer Sprachen werden aber erst nach intensivem Training erkannt. Davor werden unbekannte Phoneme entweder nicht erkannt, oder, was wahrscheinlicher ist, als Allophon² eingestuft, welches dem tatsächlich gehörten Phonem phonologisch nahe kommt.

Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass gehörte Information zunächst mit Mustern bekannter Phoneme verglichen und so in eine Folge wahrscheinlich wahrgenommener Phoneme abgebildet wird, d.h. es findet eine Encodierung in eine Folge von relativ wenigen „Codewörtern“ statt, siehe auch [27] - [29].

² Allophon: eine von mehreren phonetischen Ausprägungen eines Phonems

Aus den aufeinander folgenden Phonemen werden nun wieder durch Vergleich mit abgespeicherten Mustern phonetische Silben gebildet. Es wird also eine erneute Encodierung auf höherer Stufe vorgenommen. Parallel zum Vorgang der Silbenbildung werden Intonation und Betonung mit einigen wenigen, weiteren abgespeicherten Mustern verglichen.

Aus den gefundenen Silbenfolgen, ihrer Intonation und deren Betonung [30] wird durch Vergleich mit weiteren gespeicherten Mustern das wahrgenommene Wort gefunden.

Es schließen sich danach weitere Erkennensprozesse durch Mustervergleich statt. Ganz ähnliche Vorgänge, nur mit noch höherer Komplexität finden beim Sehen statt. Geringere Komplexität weisen die anderen Sinneswahrnehmungen auf.

Der Prozessablauf ist aber im Anschluss an die erste Umwandlung der Sinneswahrnehmung in Nervenimpulse und eine erste Encodierung immer der Gleiche: Aus Folgen einfacher Informationseinheiten werden durch Vergleich mit gespeicherten Mustern komplexere Informationseinheiten in neuer Encodierung gebildet. Es bildet sich so eine Hierarchie von Erkennensprozessen, welche nicht mehr die Originalinformation verarbeiten, sondern daraus durch Vergleich gewonnene Muster.

Charakteristikum der bis jetzt behandelten Abläufe ist, dass sie durch „Schaltkreise“ beschrieben werden können, d.h. es findet keine aktive Abspeicherung statt. Das schließt natürlich nicht aus, dass Information aus vorhandenen Speichern verwertet wird. Bis dahin konnte also auch noch kein Lernprozess stattfinden, denn zum Lernen gehört die Abspeicherung von Information. Daher müssen nun Speicher im menschlichen Hirn betrachtet werden.

Speicherung von Information

In der Psychologie werden Gedächtnisspeicher oft in zwei Typen von Speichern kategorisiert. Dies geht auf Experimente in den 1950er und 1960er Jahren zurück [31], [32]. Das so genannte Kurzzeitgedächtnis verliert Information innerhalb von einigen zehntel Sekunden bis zu einigen 10 Sekunden. Das Langzeitgedächtnis kann Information bis zu einigen Dekaden lang speichern. Inzwischen weiß man erheblich mehr über die Biochemie des Lernens, so dass diese Kategorisierung zu grob erscheint.

In der Tat wurde ja bereits weiter oben das Abklingen von Information auf dem Weg über Nervenbahnen und ihre Verschaltungen berichtet. Dies betrifft das „Gedächtnis“, das innerhalb von einigen zehntel Sekunden bis zu 2 Sekunden abklingt. Es ist mit dem „sensorischen Register“ des Gagné-Driscollschen Lernmodells identisch. Es wird an einigen Stellen auch Ultrakurzzeitgedächtnis genannt [33].

Für Prozesse, die in der Erkennenshierarchie zu weit fortgeschritten sind, würde die normale Abklingzeit der Nervenaktivität nicht mehr ausreichen, um eine Weiterverarbeitung zu garantieren. Experimente legen aber nahe, dass im Gehirn eine Rückkoppelschleife geschaltet ist, welche erkannte Muster bis zu 20 Sekunden lang halten kann, so dass ein bewusstes Abrufen der Information möglich wird. Solange kein anderer Mechanismus greift, sind danach die Informationspakete abgeklungen und unwiederbringlich verloren. Das durch diese Rückkopplung automatisch entstehende flüchtige Gedächtnis wird Kurzzeitgedächtnis genannt [33].

Werden nun aus irgendeinem Grund eines oder mehrere der erkannten Muster auffällig, und handelt es sich um ein auditorische oder visuelle Muster, dann wird – je nach Art des Musters – aktiv, d.h. durch Aufmerksamkeit eine weitere Rückkoppelschleife geschaltet. Für auditorische Muster entsteht die artikulatorische oder phonologische Schleife, für visuelle der visuell-räumliche Notizblock. Grob gesagt ermöglicht die phonologische Schleife, dass man sich im Geist etwas „vorsagt“, der visuell-räumliche

Notizblock erlaubt, dass man sich im Geist einen Film ablaufen lässt oder Bilder vorstellt. Dieses Modell wurde von den Psychologen Baddeley und Hitch [35] eingeführt, die gleichzeitig noch einen Funktionsblock forderten, der die Aufmerksamkeit steuern soll, welche erst den Einsatz der Schleifen regelt. Dieser Block wurde von ihnen zentrale Exekutive genannt. Alle drei Funktionseinheiten, phonologische Schleife, visuell-räumlicher Notizblock und zentrale Exekutive werden zusammen mit ihren Verschaltungen auch Arbeitsgedächtnis genannt. Darunter ist allerdings nicht ein Speichertyp zu verstehen, sondern ein Subsystem des Gehirns, das wenigstens zwei Kurzzeitspeicher in Form von Rückkopplungsschleifen enthält, und daher vergleichsweise schnell arbeiten kann.

Schließlich gibt es noch Langzeitspeicher, die durch Einrichtung permanenter synaptischer Verbindungen entstehen, und damit solange funktionell bleiben, bis sie durch krankhafte Veränderung zerstört werden. Der Prozess der Herstellung dieser Verbindungen, den man auch Plastizität nennt, ist allerdings fragil und zeitaufwändig [36]. Der Vorgang wird erst dann angestoßen, wenn die Notwendigkeit dazu auf Grund hinreichend vieler Wiederholungen oder besonderer Aufmerksamkeit besteht.

Die sich aufbauenden Verbindungen werden wieder abgebaut, wenn der Speichervorgang nicht in einem bestimmten Zeitraum, der so genannten Konsolidierungsphase, einige Male wieder angestoßen wird, um die biochemisch notwendige Umgebung für die Plastizität zu erhalten. Dies erklärt, warum Information, die bereits sicher abgespeichert zu sein schien, nach einigen Wochen wieder verschwinden kann, wenn sie in der Konsolidierungsphase nicht immer wieder einmal abgerufen wird. Letzteres führt nämlich zur erneuten Ausschüttung der notwendigen Stoffe, welche die synaptische Verbindung ermöglichen. Erst wenn die synaptische Verbindung stabil ist, muss sie nicht mehr aktiv unterstützt werden.

Mit dieser Kenntnis über die vorhandenen Speichersysteme wird es nun möglich, den Prozess des Lernens genauer zu modellieren.

Erkennen und Lernen

Wie weiter oben ausgeführt, geht dem Prozess des Lernens ein Prozess des Erkennens in mehreren Hierarchiestufen voraus. Wird nun ein neues, bis dahin unbekanntes Muster identifiziert, dann muss dieses in einem Langzeitspeicher, dem Musterspeicher, abgelegt werden: das neue Muster wird gelernt.

Damit nicht jede beliebige gestörte, wahrgenommene Informationseinheit als Muster abgespeichert wird und so den Erkennensprozess durch Informationsüberflutung zum Erliegen bringt, muss vor Speicherung die Relevanz der Informationseinheit festgestellt werden. Dies kann durch Verknüpfung mit einer starken Emotion (Schmerz, Ekstase, usw.) oder durch mehrfaches Wiederholen und gleichzeitiges Verknüpfen mit einer moderaten Emotion (Freude, Trauer, Sympathie, Aversion, etc.) oder durch Aufmerksamkeit, beispielsweise durch die zentrale Exekutive geschehen. Letzteres dürfte der Regelfall im Studium sein.

Wird ein bestimmter Schwellwert der Relevanz überschritten, wird die neue Informationseinheit als Muster abgespeichert und damit gelernt. Auch der Prozess der Speicherung im Langzeitgedächtnis bedarf der regelmäßigen Wiederholung, wie oben ausgeführt wurde. Wird die Konsolidierungsphase vorzeitig abgebrochen, bleibt die synaptische Plastizität fragil, die vermeintlich gespeicherte Information wird nach einiger Zeit wieder vergessen (dies erklärt, warum Studierende, die gezielt nur ein paar Tage auf ein Examen hin lernen, ihr Wissen nach dem Examen partiell oder sogar ganz wieder vergessen).

Die Zyklen und Ebenen des Lernens

Faktenwissen

Mit den bisherigen Betrachtungen zur Sinneswahrnehmung kann das Erlernen neuer Muster (wie beispielsweise Phoneme, Silben oder Wörter) und deren Abspeicherung im Langzeitgedächtnis modelliert werden. Dieses gestaltet sich mehr oder weniger als ein automatisch ablaufender Prozess, der lediglich durch Wiederholung und Emotion oder Aufmerksamkeit angestoßen wird, also Prägung, sofern dies unbewusst abläuft. Es handelt sich dabei um die elementarste Stufe des Lernens. Beispiele sind das kleinkindhafte Lernen, aber auch die unterbewusste Prägung des Kaufverhaltens Erwachsener.

Sobald die zentrale Exekutive des Arbeitsgedächtnisses, also das Bewusstsein involviert wird, aber die Mustererkennung immer noch automatisch abläuft, handelt es sich um elementares Auswendiglernen. Dieses wird beispielsweise angewandt, wenn Wörter einer Fremdsprache auswendig gelernt werden.

In beiden Fällen handelt es sich um Gegebenheiten, die abgespeichert werden, also um Faktenwissen [2].

Lernen von Faktenwissen ist offenbar der erste Schritt des Lernens. Es kann aber, wie bereits gezeigt, bewusst oder unbewusst gesteuert sein. Im ersten Fall spricht man von deklarativem Wissen, in letzterem von non-deklarativem oder reflexivem oder implizitem Wissen [37].

Konzeptionelles Wissen

Faktenwissen alleine ist nutzlos, wenn die gespeicherte Information nicht mit anderer gespeicherter Information in Zusammenhang gebracht werden kann: Zu jedem einzelnen Faktum muss Hintergrundinformation aufgebaut werden, die in zeitlicher, räumlicher oder sachlicher Nähe zum Faktum stehen muss. Ein Beispiel mag dies verdeutlichen.

Angenommen, ein Kind hat gelernt, was ein Ball ist. Dann wird es im Lauf der Zeit auch Eigenschaften des Objekts Ball kennen lernen. Ein Ball ist rund, mittelhart, elastisch usw. Diese Eigenschaften sind wieder Fakten, die als Faktenwissen gespeichert sind. Um diese Fakten mit dem Faktum Ball in Verbindung zu bringen, müssen die Relationen Ball → rund, Ball → mittelhart, Ball → elastisch, etc. gespeichert werden. Es sind also Verweise von einem Faktum auf andere Fakten, die wieder als Muster erkannt und gespeichert werden. Damit unterscheidet sich das so aufgebaute Wissen von dem Faktenwissen. Deswegen macht es Sinn, dieses Wissen um Relationen eigens zu kategorisieren. In der Literatur ist dafür der Begriff „konzeptionelles Wissen“ gebräuchlich [2]. Ein besserer Ausdruck wäre wahrscheinlich „Kontextwissen“.

Es sind nicht nur statische Eigenschaften, die als konzeptionelles Wissen abgespeichert werden. Vielmehr können auch Verweise auf Ereignisse abgespeichert werden. Ein Ereignis kann dabei als eine Kette von Fakten in zeitlicher Abfolge gesehen werden.

Damit wird es beispielsweise möglich, das Faktum „Ball“ mit dem Ereignis „fliegt auf mich zu“ und dem Faktum „Schmerz“ in Verbindung zu bringen. Dies wäre nutzlos, wenn diese Information nicht zu einer Reaktion führen würde.

Prozedurales Wissen

Um bei obigem Beispiel zu bleiben, muss daher gelernt werden, was im Fall einer solchen Kombination aus Fakten und Ereignissen zu tun ist. Diese Handlung muss schnell erfolgen, und darf daher nicht mehr im Arbeitsgedächtnis prozessiert werden, weil dies zu lange dauern würde. Der Ablauf der notwendigen Aktion muss daher bereits vor Auftreten der Notwendigkeit zur Handlung als Liste von Aktionsstimuli abgespeichert sein. Damit wird eine neue Kategorie von erlernbaren Kenntnissen definiert: das prozedurale Wissen.

Prozedurales Wissen in diesem Sinn ist offenbar implizites oder nicht-deklaratives Wissen. Damit unterscheidet sich die hier benutzte Definition von einigen Literaturstellen, wie beispielsweise [2], in denen auch bewusst gesteuerte Prozeduren zum prozeduralen Wissen gezählt werden.

Kanonisches Wissen

Der Grund für diesen Unterschied liegt darin, dass unter Einbeziehung des Arbeitsgedächtnisses (also der zentralen Exekutive, des Bewusstseins) nur dann ein auf vorherigem Wissen aufgebauter Plan zur Handlung erstellt werden kann, wenn bis dahin Regeln erkannt wurden, nach denen Fakten und Ereignisse im Zusammenhang stehen. Diese Regeln müssen vorher erkannt und abgespeichert worden sein. Da ein Regelwerk auch Kanon heißt, wird diese neue Wissenskategorie als kanonisches Wissen bezeichnet [4].

Das Erkennen von Regeln kann entweder durch äußere Anreize oder durch eigenen, internen Mustervergleich erfolgen. Die hier zu Grunde liegenden Muster sind aber weitaus abstrakter und komplexer als die Muster, die zum Erkennen des Faktenwissens erforderlich sind. Damit die abstrakten Muster für das kanonische Wissen erkannt werden, ist es notwendig, dass ein solides Faktenwissen, konzeptionelles Wissen und prozedurales Wissen auf breiter Basis vorhanden ist.

Der Erwerb kanonischen Wissens setzt zudem die aktive Anwendung des Arbeitsgedächtnisses unter Einbeziehung der phonologischen Schleife und des visuell-räumlichen Notizblocks voraus. Dies benötigt im Vergleich zum Lernen von Fakten viel Zeit. Da weiterhin für die Abspeicherung im Langzeitgedächtnis eine mehrfache Wiederholung in der Konsolidierungsphase (an mehreren Tagen) des Speicherprozesses notwendig ist, erklärt sich der hohe Zeitaufwand für das Erlernen kanonischen Wissens.

Strategisches Wissen

Sind die Regeln hinter Fakten und ihren Hintergründen erkannt, so kann sich ein weiterer Lernprozess anschließen. Mit Hilfe des Arbeitsgedächtnisses können nämlich nun virtuelle Aktionen geplant werden. Was wäre, wenn Regeln, die für einen bestimmten Satz von Fakten und Hintergründen erkannt wurden, auf einen anderen Satz von Fakten mit anderem Kontext angewendet würden? Würden daraus sinnvolle Ergebnisse resultieren? Oder, noch aufregender, was wäre, wenn Regeln gebrochen würden? Ergebnis dieser Fragen sind wieder Aktionslisten, die abgespeichert werden können. Die so entstehende Wissenskategorie heißt nach [4] strategisches Wissen. Strategisches Wissen ist der Schlüssel zu kreativem Handeln.

Lernzyklen und Lernebenen

Mit der Kenntnis obiger Wissenskategorien kann nun der Ablauf von unterschiedlich komplexen Lernprozessen analysiert werden. Im einfachsten Fall gestaltet sich Lernen wie in Abbildung 2 dargestellt. Zunächst wird Faktenwissen erworben, dieses wird um Hintergrundwissen (konzeptionelles Wissen) ergänzt. Darauf aufbauend werden automatische Reaktionen (prozedurales Wissen) trainiert. Danach kann weiteres Faktenwissen erworben werden usw. Es stellt sich ein Lernzyklus ein, welcher kurz als Training ohne tieferes Verständnis klassifiziert werden kann.

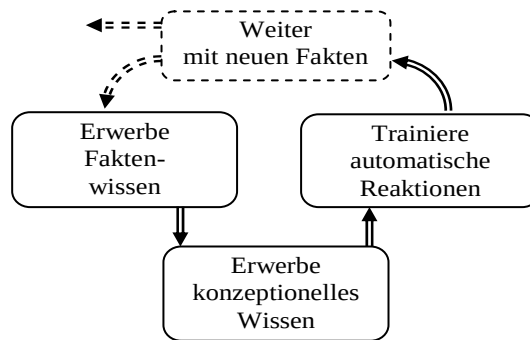


Abbildung 2: Trainingszyklus, adaptiert aus [4].

In Abbildung 3 ist im Gegensatz zum Trainingszyklus der in diesem fehlende Teil der Regelfindung mit eingebaut. Dadurch, dass nun der Lernende auch lernt, die Regeln hinter den Fakten, Hintergründen und Prozeduren erkennen, wird ein besseres Verständnis vermittelt.

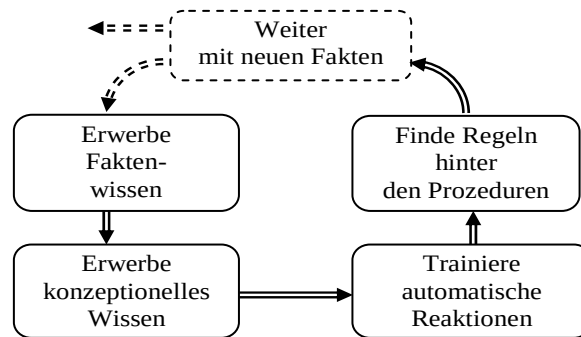


Abbildung 3: Verständnisfördernder Lernzyklus, adaptiert aus [4].

Wird schließlich noch die Phase des Erwerbs von strategischem Wissen gefördert, dann entsteht ein Lernzyklus entsprechend Abbildung 4.

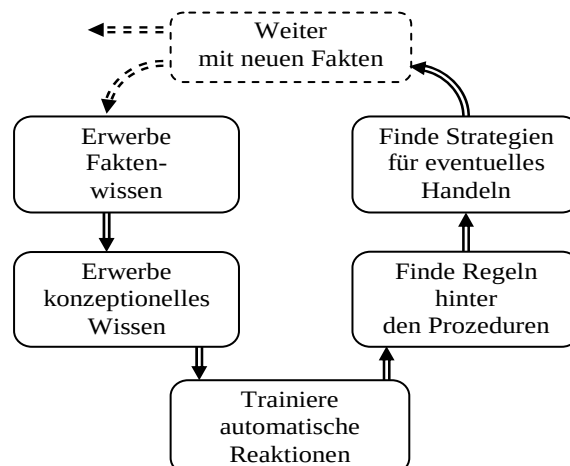


Abbildung 4: Lernzyklus für tiefgehendes Verständnis, adaptiert aus [4].

Je nachdem, ob ein weiterer Lernzyklus mit parallelem oder auf den ersten Fakten aufbauendem, neuem Faktenwissen fortfährt, findet der neue Zyklus auf derselben oder auf einer höheren Eben als vorher statt. Im ersten Fall wird eine flache, im zweiten wird eine hierarchische Wissensstruktur erlernt.

Lernzyklen und Curricula

Mit Hilfe dieser Lernzyklen können nun die Probleme analysiert werden, die bei der Umstellung der ingenieurwissenschaftlichen Curricula von zehn bzw. neun durchgehenden Regelstudiensemestern auf ein zweistufiges System mit insgesamt zehn Semestern einhergehen.

Auf den ersten Blick hat dies durchaus seinen Charme, stehen doch zunächst gleich viele oder sogar ein Semester mehr zur Verfügung, und ermöglicht dieses System doch den vorzeitigen Ausstieg mit Abschlussgrad aus einem Studium, das von einigen Bildungspolitikern als zu lange und zu teuer angesehen wird. Bei näherem Hinsehen erweist sich Beides jedoch als Illusion.

Rein buchhalterisch geht nämlich bei Umsetzung der staatlichen Vorgaben und durch faktischen Zwang der Interessenverbände der Industrie ein ganzes Semester verloren. Ist bisher die sechsmonatige Fachpraxis kein anrechenbarer Bestandteil des Studiums, so muss diese künftig, falls vorhanden, auf das Studium angerechnet werden. Die Fachpraxis aus dem Curriculum zu entfernen ist nicht nur wegen des Drucks durch die Akkreditierungsorganisationen schwierig, sondern würde auch einen wesentlichen Teil des „sozialen Lernens“ aus dem Curriculum streichen.

Dabei kommt es nicht von ungefähr, dass Firmen, die Praktikantenplätze zur Durchführung der Fachpraxis anbieten, zunehmend auf einer Mindestdauer von sechs Monaten bestehen. Die ersten Wochen sind nämlich, was das Fachliche angeht, auf Trainingszyklen gemäß Abbildung 2 ohne größeren Wert für den beteiligten Fachbetrieb ausgelegt. Parallel dazu und im Anschluss daran aber findet ein ganz eindeutig Verständnis fördernder Lernprozess nach Abbildung 3 im sozialen Bereich statt, welcher im Grunde als Vermittlung einer Schlüsselqualifikation gesehen werden muss. Die durchführende Firma erhält dadurch u.a. einen Überblick über die sozialen Qualifikationen potenzieller Arbeitnehmer, aber gleichzeitig auch eine preisgünstige Arbeitskraft.

Die Reduktion der Fachpraxis auf wenige Wochen würde also die Vermittlung der sozialen Qualifikation und den wirtschaftlichen Anreiz, der für die ausbildenden Betriebe wichtig ist, in erheblichem Maße stören.

Will man darauf nicht verzichten, bleibt also im zweistufigen System effektiv nur eine Gesamtdauer von neun Semestern eines konsekutiven Curriculums.

Die Frage stellt sich nun, an welcher Stelle im Curriculum der Trennstrich zu ziehen ist zwischen einem auf eine Anstellung vorbereitenden Studium, das mit Bachelorgrad abschließt, und einem für den Beruf qualifizierenden Studium, das mit einem Mastergrad abschließt. Das gesetzliche Minimum für die Dauer des Bachelorstudiums beträgt sechs Semester. Aber kann man in diesen sechs Semestern Studierende für den Beruf qualifizieren?

Einige Geisteswissenschaftler würden diese Frage zunächst eindeutig mit Ja beantworten, Man müsse eben nur den Stoffumfang reduzieren. Unterstützt würden sie dabei von Umfragen unter im Berufsleben stehenden Ingenieuren, die angeben, von dem im Studium gelernten Stoff nur einen Teil im Beruf genutzt zu haben.

Dieser Beurteilung liegen aber zwei völlige Fehleinschätzungen zu Grunde, die durch die oben beschriebenen Lernmodelle aufgedeckt werden können.

Zum einen sind ingenieurwissenschaftliche Studiengänge völlig anders aufgebaut als viele andere Studiengänge, in denen Wissen in einer relativ flachen Hierarchie vermittelt wird. Faktenwissen kann in diesen sehr viel öfter parallel aufgebaut werden als in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen. Ein Geisteswissenschaftler oder Jurist kann beispielsweise oft den Umfang seiner Lehrveranstaltung alleine dadurch reduzieren, dass er statt von – sagen wir – neun Fällen nur sechs Fälle abhandelt. Dadurch gehen dann zwar auch einzelne Details verloren, es leidet aber im Prinzip weder der Erwerb prozeduralen noch der Erwerb kanonischen Wissens darunter.

Dies sieht bei einem Ingenieurstudium völlig anders aus. Hier bauen viele Fakten und Regeln stark auf anderen Fakten und Regeln auf. Weiter können Regeln oftmals erst erkannt werden, wenn Lernzyklen über mehrere Ebenen durchgeführt wurden.

Folglich besteht im Ingenieurstudium die einzige Chance, ein verkürztes Studium anzubieten, darin, schneller durch den gleichen Stoff zu gehen oder Teile des Stoffs nicht mehr zu vermitteln.

Da aber Lernen Zeit braucht, ist die zwangsläufige Folge bei verkürztem Zeitaufwand die, dass an vielen Stellen der Verständnis fördernde Lernzyklus nach der Phase des prozeduralen Lernens abgekürzt wird: Es bleiben dann – wenn überhaupt – nur noch kurze Zeiträume für den Prozess des Erwerbs von kanonischem Wissen, schon gar nicht mehr für den Erwerb strategischen Wissens.

Die Folge ist, dass das Wenige, was an kanonischem Wissen erworben wurde, nach einigen Wochen wieder vergessen wird, weil es während der Konsolidierungsphase des Gedächtnisses nicht mehr abgerufen wird. Am Ende erhält man einen Bachelor, der wohl gut trainiert ist, der aber nur noch wenig tiefer gehendes Verständnis des Gelernten mit sich bringt.

Nun könnte man meinen, dass das, was im Bachelorstudium versäumt wurde, ja ohne Schwierigkeiten im Masterstudium nachgelernt werden könnte. Diese Rechnung geht aber nicht auf, weil bis dahin das nicht konsolidierte Wissen wieder vergessen wurde. Die reinen Fakten, ihre Verbindung mit anderen Fakten und die automatischen Prozeduren sind zwar noch abrufbar, es fehlt aber das kanonische Wissen, das nun erst zeitaufwändig wieder erlernt werden muss. Selbst wenn man also die Fachpraxis nicht mit in das Curriculum einrechnet, geht unter diesen Umständen leicht mehr als ein Semester verloren.

Wie steht es nun mit der Aussage, dass doch längst nicht alles, was im Studium gelernt wurde, in der Praxis benötigt wird? Kann man nicht einfach Teilgebiete des zu vermittelnden Stoffs weglassen?

An einigen wenigen Stellen mag dies in der Tat gehen. Tatsache ist aber, dass bereits in den letzten zwei Dekaden engagierte Kollegen, Fakultätentage und die Ministerien streng auf eine Straffung des Studiums geachtet haben. Was ohne Schwierigkeiten weggelassen werden kann, wurde bereits weggelassen, um dem ständig wachsenden Wissen in der Technik Rechnung zu tragen.

Es bleiben somit einige Stoffgebiete, über deren Notwendigkeit man streiten kann. Hier gilt jedoch zu bedenken, dass gemeinsame Regeln, die als Regelwerk hinter unterschiedlichen Wissensgebieten liegen, nur dann eigenständig gefunden werden können, wenn mindestens zwei solcher Wissensgebiete mit ihren Fakten, Hintergründen und Abläufen bekannt sind. Wenn es darauf ankommt, diese Regeln aktiv zu erarbeiten, dann ist es letztendlich gleichgültig, an welchen von zwei oder mehreren Stoffgebieten dies vorgenommen wird: das Wichtige ist, dass die Regeln überhaupt erkannt werden.

Ein Beispiel soll dies erläutern. Wer Anfang der 1970er Jahre Elektrotechnik und Informationstechnik studiert hat, hat die Regeln des Entwurfs linearer Schaltungen am Beispiel passiver linearer Systeme und am Beispiel von Verstärkern mit Vakuumröhren gelernt. Bereits Anfang der 1980er Jahre waren Röhrenschaltungen veraltet. Es konnte also durchaus passieren, dass Ingenieure den Entwurf aktiver

Schaltungen mit Röhren erlernten, dies aber in ihrem Berufsleben nie einsetzen mussten. Dennoch war das erlernte kanonische Wissen für sie von allergrößtem Nutzen, nämlich beim Entwurf von Schaltungen mit Halbleitern, weil ein großer Teil der Regeln, welche sie für passive Schaltungen und Röhrenschaltungen gelernt hatten, sich auf Transistorschaltungen übertragen ließ. Anhand der Unterschiede zwischen Röhren- und Transistorschaltungen lernten sie dann wieder, über die Übertragung von Regeln auf andere Stoffgebiete nachzudenken und sich so strategisches Wissen anzueignen. War also das nie angewandte Faktenwissen über Röhren wertlos? Mit Sicherheit nicht. Im Gegenteil!

Die Konsequenz, die sich aus diesen Ausführungen ziehen lässt, ist also, dass bei etwa gleichlanger Studiendauer dasjenige Curriculum nachhaltigeres Lernen ermöglicht, welches in durchdachter Weise die Ausnutzung und Konsolidierung von kanonischem und strategischem Wissen optimiert. Dies ist ein Curriculum, welches den Ausstieg aus dem Studium mit Bachelor-Abschluss erst so spät wie möglich erlaubt, um die Verzahnung verschiedener Wissensgebiete und damit den aktiven Abruf des Wissens zu optimieren.

Unter diesen Umständen wird nun klar, dass ein sechssemestriges Bachelorstudium mit nachfolgendem viersemestrigem Masterstudium weniger optimal ist, als ein siebensemestriges Bachelorstudium, das von einem dreisemestrigem Masterstudium gefolgt ist. Am besten erscheint dann allerdings immer noch das durchgehende zehensemestriges Studium, das jedoch im Moment von der Politik nicht unterstützt wird.

Man hört hin und wieder, dass in einem Ingenieurstudium ein Masterstudium mit weniger als vier Semestern Dauer nicht dazu geeignet sei, sinnvolles Lernen in Gang zu setzen. Dies stimmt nur unter der Prämisse, dass ein solches Studium völlig unabhängig von dem vorangehenden Bachelorstudium durchgeführt wird. In der Tat würde dann die Vermittlung neuer Fakten, deren Einbettung in einen Faktenhintergrund und die Erlernung prozeduralen Wissens zu lange dauern, um den Erwerb kanonischen Wissens in nennenswertem Umfang zuzulassen. Tatsächlich macht ein Masterstudium von weniger als vier Semestern Dauer nur in einem integrierten konsekutiven Studium mit auf die Gesamtdauer optimiertem Curriculum Sinn.

Daher muss bereits deutlich vor Ende des Bachelorstudiums eine Beratung der Studierenden erfolgen, um durch Auswahl geeigneter Wahlpflichtfächer die verbleibende Zeit im Bachelorstudium entweder auf einen Ausstieg aus dem Studium nach dem Bachelor-Abschluss oder auf das Weiterstudium im konsekutiven Programm zu optimieren. Hier kommen dem Curriculum-Designer und dem Studienberater entscheidend wichtige Rollen zu.

Es wird nun aber auch klar, dass ein Masterstudium in einer Studienrichtung, die sich nicht logisch und konsequent als Fortsetzung des Bachelorstudiums begreifen lässt, eine entsprechend längere Zeit braucht. Dies rechtfertigt die Dauer von vier Semestern für ein nicht-konsekutives Masterstudium.

Politiker befürworten auch Kombinationen verschiedener Fächer durch ein Bachelor- und ein Masterstudium. Was ist davon im Sinne der obigen Lerntheorie zu halten? Man macht sich dies leicht an einem Extremfall klar.

Angenommen, ein Student hat erfolgreich ein sechssemestriges Bachelorstudium in Germanistik absolviert und möchte nun Elektrotechnik/Informationstechnik in einem Masterstudium aufsatteln. Selbst wenn dieser Student sich im Laufe seines Bachelorstudiums verbesserte Lerntechniken angeeignet hat, dann ist doch klar, dass er oder sie sich in den höchstens vier verbleibenden Semestern eines Masterstudiums niemals das Wissen aneignen könnte, das erforderlich wäre, um auch nur die Anforderungen an einen Bachelor der Elektrotechnik /Informationstechnik zu erfüllen, geschweige denn an einen Master in diesem Gebiet. Eine solche Kombination wäre absolut unsinnig, ja geradezu lächerlich (und wird wohl auch nicht ernsthaft gefordert).

Die Frage nach der umgekehrten Reihenfolge, erst Elektrotechnik/Informationstechnik und dann ein anderes Gebiet, beispielsweise „Business Administration“, lässt sich an dieser Stelle mangels Wissen um die Anforderungen eines MBA nicht beantworten. Die Tatsache aber, dass ein Diplomstudium der Betriebswirtschaft in der Regel auch neun Semester beansprucht, lässt eher Skepsis aufkommen, dass vier Semester eines Masterstudiums in diesem Fach für profunden Erwerb von kanonischem oder gar strategischem Wissen ausreichen. Eine Ausnahme wäre gegeben, wenn ein solches viersemestriges Studium ausschließlich als Training angelegt wäre. Dann aber müsste man sich fragen, inwiefern die Berechtigung der Erteilung eines Mastertitels gegeben ist.

Zusammenfassung

Zur Beantwortung der Frage nach der Konstruktion guter Curricula in den Ingenieurwissenschaften wurde ein modernes Modell des Lernens herangezogen. In ihm wird der Aufbau von Wissen in fünf verschiedene Kategorien eingeteilt: das Faktenwissen, das konzeptionelle oder Kontext-Wissen, das prozedurale Wissen, das kanonische Wissen und das strategische Wissen. Damit konnte der Unterschied klar gemacht werden zwischen Lernen als Training, Studium als Lernen im Sinn des Erwerbs von Wissen um Zusammenhänge und schließlich wissenschaftlichem Wissenserwerb durch kreative Fragestellung.

Die Frage nach einer Optimierung des Lernerfolgs von ingenieurwissenschaftlichen Curricula wurde dahin gehend beantwortet, dass Wissen systematisch und mit hinreichend großer Förderung des Verständnisses von Zusammenhängen erworben werden sollte. Dies bevorzugt im Rahmen eines konsekutiven Bachelor-Master-Studiums eher eine längere als eine kürzere Dauer des Bachelorstudiums. Optimal wäre aber eine Lösung, wie sie inzwischen an einigen amerikanischen Spitzenuniversitäten angeboten wird, und die eine traditionelle kontinentaleuropäische Errungenschaft nachahmt : dort erhalten Studenten in speziellen Studiengängen der Elektrotechnik/Informationstechnik nach einer Regelstudienzeit von zehn Semestern zum Abschluss des Studiums am selben Tag zunächst das Bachelorzeugnis und daran anschließend das Masterzeugnis. Die optimale Lösung wäre also weder eine Dauer von 6 + 4 Semestern, noch eine von 7 + 3 Semestern, sondern eine Dauer von 10 + 0 Semestern!

Referenzen

- [1] Kutas, M. and Federmeier, K. D., "Minding the body", *Psychophysiology*, 35, 1998, pp. 135-150.
- [2] Anderson, L. W., Krathwohl, D. R. and Bloom, B. S., *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*, New York: Longman, 2001.
- [3] Shuell, T. J., "Cognitive Conceptions of Learning", *Review of Educational Research*, 56, 1986, pp. 411-436.
- [4] Hoffmann, M.: An Engineering Model of Learning. In.: *Proceedings of ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference (FIE 2005)*, Indianapolis, IN, October 19-22, 2005. ISBN: 0-7803-9077-6, pp. T2C-1 – T2C-6.
- [5] Leonard, D.C., *Learning theories, A to Z*, Westport, Conn.: Oryx Press, 2002.
- [6] Dewey, J., *Experience and education*, New York: The Macmillan Company, 1938.
- [7] Lewin, K., *Selected theoretical papers*, New York: Harper, 1951.
- [8] Inhelder, B., Chipman, H., Zwingmann, C., and Piaget, J., *Piaget and his school: a reader in developmental psychology*, New York, Springer-Verlag, 1976.
- [9] Gagné, R.M., *The conditions of learning*, New York: Holt, Rinehart and Winston, 1965.
- [10] Bandura, A., *Social learning theory*, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1977.

- [11] Maslow, A.H.: *Toward a psychology of being*, Princeton, N.J: Van Nostrand, 1962
- [12] C.R. Rogers, *Freedom to learn: a view of what education might become*, Columbus, Ohio: Merrill, 1969.
- [13] Skinner, B. F., "Operant behavior", *American Psychologist*, 18, 1963, pp. 505 - 515.
- [14] Atkinson, R. C., Shiffrin, R. M., "Human Memory: A Proposed System and its Control Processes," in Spence, K. W., Spence, J. T. (eds), *The psychology of learning and motivation*, New York, London: Academic Press, 1968, pp. 89 - 195.
- [15] Schneider, W., Shiffrin, R. M., "Controlled and Automatic Human Information Processing: I. Detection, Search and Attention", *Psychological Review*, vol. 84, 1977, pp. 1 – 66.
- [16] Shiffrin, R. M., Schneider, W., "Controlled and Automatic Human Information Processing: II. Perceptual Learning, Automatic Attending and a General Theory", *Psychological Review*, vol. 84, 1977, pp. 127 – 190.
- [17] Craik, F.I.M., Lockhart, R. S., "A framework for memory research", *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, vol. 11, 1972, pp. 671 – 684.
- [18] Vygotskii, L.S., *Thought and language*, Cambridge: M.I.T. Press, 1962.
- [19] Bruner, J.S., "The act of discovery", *Harvard Educational Review*, vol. 31, pp. 21-32.
- [20] Gagné, R.M., Driscoll, M.P., *Essentials of learning for instruction*, Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1988.
- [21] Zwicker, E. Fastl, H., *Psychoacoustics: facts and models*, Berlin, New York: Springer, 1999
- [22] Goldstein, E.B., *Sensation and perception*, Pacific Grove, CA: Wadsworth-Thomson Learning, 2002.
- [23] Yvert, B. et al., "Simultaneous intracerebral EEG recordings of early auditory thalamic and cortical activity in human," *Eur J Neurosci*, vol. 16, pp. 1146-50, 2002.
- [24] Alitto, H.J., Usrey, W.M., "Corticothalamic feedback and sensory processing," *Curr Opin Neurobiol*, vol. 13, pp. 440-445, 2003.
- [25] Bloomfield, L., *Language*, New York: H. Holt and Company, 1933.
- [26] Duden Bd. 6, *Aussprachewörterbuch*, ISBN 3-411-04064-5.
- [27] Potter, R., Steinberg, J., "Toward the Specification of Speech," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 22, pp. 807-820, Nov. 1950.
- [28] Schafer, R.W., Rabiner, L.R., "System for automatic formant analysis of voiced speech," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 47, pp. 1867-1873, No. 2 (part2) 1970.
- [29] Rabiner, L.R., Juang, B.H., *Fundamentals of speech recognition*, Englewood Cliffs, N.J: PTR Prentice Hall, 1993.
- [30] Jackendoff, R., *Foundations of language: brain, meaning, grammar, evolution*, Oxford, New York: Oxford University Press, 2002.
- [31] Peterson, L. R. and Peterson, M. J., "Short-term retention of individual verbal items", *Journal of Experimental Psychology*, 58, 1959, pp. 193-198.
- [32] Postman, L. and Phillips, L. W., "Short-term temporal changes in free recall", *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 17, 1965, pp. 132-138.
- [33] Cornette, L. et al., "Separate neural correlates for the mnemonic components of successive discrimination and working memory tasks," *Cereb Cortex*, vol. 11, pp. 59-72, 2001.
- [34] Rodriguez-Fornells, A., Rotte, M., Heinze, H. et al., "Brain potential and functional MRI evidence for how to handle two languages with one brain", *Nature*, 415, 6875, 2002, pp. 1026-1029.
- [35] Baddeley, A. and Hitch, G., "Working Memory", in: Bower, G., *Recent advances in learning and motivation*, New York: Academic Press, 1974.
- [36] Johansson, B.B., "Brain plasticity in health and disease," *Keio J Med*, vol. 53, pp. 231-246, 2004.
- [37] Squire, L.R., Zola, S.M., "Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 93, pp. 13515-22, 1996