

Kapitel 4: Zweitausend Jahre Regeln des Wissenserwerbs im Licht der Neurowissenschaft

Randolf Menzel

Vorbemerkung

Für Lernen ist das Gehirn zuständig. Die Wissenschaft, die sich mit dem Gehirn beschäftigt – die Neurowissenschaft – hat in den letzten 20 Jahren große Fortschritte im Verständnis der Gehirnfunktionen gemacht. Es liegt also nahe zu erwarten, dass die Neurowissenschaft einen Beitrag zur Didaktik und Pädagogik liefern kann. Dieser so selbstverständlichen Aussage wird außerhalb und innerhalb der Neurowissenschaft mit großer Skepsis begegnet. Außerhalb wird argumentiert, dass die Neurowissenschaft bei solchen Unternehmungen ihre Kompetenzen weit überschreitet, denn es gehe ja um den Geist und nicht um das Gehirn, und zum Geist kann die Neurowissenschaft keine Aussagen machen. Diese cartesianisch-dualistische Position nimmt eine wesentliche Trennung zwischen Geist und Gehirn an, gerät aber in große Argumentationsprobleme, wenn die selbstverständlichen und alltäglichen Erfahrungen mit den Gehirnfunktionen berücksichtigt werden (Smith Churchland 2002). Unter den Neurowissenschaftlern wurde daher diese historische Position zu den Akten gelegt. Innerhalb der Neurowissenschaft herrscht durchgehend große Zurückhaltung, ihre Laborerkenntnisse auf so wesentliche zwischenmenschliche Beziehungen anzuwenden, wie sie in der Unterweisung, in der Erziehung und im Schulalltag eine Rolle spielen. Diese Einstellung beruht nicht auf einem Zweifel, dass in ferner Zukunft auf der Grundlage viel weitergehender Erkenntnisse die Gehirnforschung auch diese sozialen menschlichen Phänomene auf Gehirnfunktionen zurückführen wird und sich aus dieser Erkenntnis vielfältige Anregungen für die Verbesserung von Didaktik und Pädagogik ergeben werden. Da zurzeit aber diese Erkenntnisse nur in kryptischer Form vorliegen, ist Zurückhaltung geboten. So ehrenwert diese Position ist, darf aber nicht übersehen werden, dass wohl jede Hilfe willkommen ist, wenn wir versuchen unsere Unterrichtsformen zu verbessern, unsere Lehrer besser auszubilden und lebenslang zu motivieren und unsere Schüler zu besseren Formen des Lernens und des Einsatzes ihres Gedächtnisses zu bewegen. Zudem liefert auch die heutige Neurowissenschaft bereits Ansätze für eine mechanistische Erklärung empirischer Regeln, die in die Didaktik als Erfahrungswissen, jedoch ohne Begründung eingehen. Über solche Ansätze möchte ich berichten.

Ich werde hier als Neurowissenschaftler den Versuch unternehmen, altehrwürdige Regeln der Wissensvermittlung und der Wissensanwendung auf ihre neuronalen Bezüge hin zu untersuchen. Daraus ergibt sich (noch) keine Begründung solcher Regeln auf der Grundlage neuronaler Mechanismen und Prozesse. Vielmehr soll im Sinne eines Arbeitsprogramms deutlich werden, wie die Neurowissenschaft argumentiert, welche Bezüge sie zu kognitiven Gehirnvorgängen herstellt, wo sie ihre unterstützenden Erkenntnisse hernimmt und welche Aufgaben für die Zukunft anstehen. Die „altehrwürdigen“ Regeln formuliere ich mit Bezug auf die Denkweise der späten römischen Rhetoriker, insbesondere des letzten großen Rhetorikers Quintilian (35-96 a.d.). In seinem wichtigsten Werk „Institutio oratoria“ bezieht er sich auf Cicero, erweitert aber seine praktischen Anregungen zu einer Didaktik, die die Erziehung vom Kind bis zum Erwachsenen einschließt. Sein Bemühen, das Interesse des Kindes zu wecken und seine Individualität unter Berücksichtigung des Entwicklungsstandes zu fördern, führt ihn zu einem Unterricht, der die aktive Teilnahme fördert. Diese Anregungen sind in den vergangenen 2000 Jahren vielfältig aufgegriffen worden, aber Begründungen stehen nach wie vor aus. Ein Weg zu solchen Begründungen führt über die Gehirnfunktionen, und diese möchte ich hier exemplarisch aufzeigen.

Die Neurowissenschaft schöpft ihre Erkenntnisse aus vergleichenden Studien an vielen verschiedenen Tierarten, zu denen sie in diesem biologischen Bezug auch den Menschen zählt. Dieser Ansatz spiegelt keine Degradierung des Menschen wider, sondern stellt ihn in den historischen Vorgang der biologischen Evolution. Für die Argumentationsweise der Neurowissenschaft ist wichtig, dass sich molekulare, zelluläre und das Netzwerk der Nervenzellen bestimmende Vorgänge in Tier- und Menschengehirnen nicht wesentlich unterscheiden. Auch Tiere lernen, bilden langzeitige Gedächtnisse und richten ihre Aufmerksamkeit auf äußere und innere Zustände. Viele Tierarten erwarten Ereignisse und planen Verhaltensweisen auf der Grundlage von vielfältigen Lernvorgängen. Sie erleben positive (freudige) und negative (unangenehme) Zustände und richten ihr Verhalten danach aus. Sie kommunizieren miteinander auf mannigfache Weise und berücksichtigen dabei ihre individuellen Erfahrungen mit der Umwelt und im sozialen Bezug. Auch wenn sie nicht über eine Sprache im menschlichen Sinne verfügen, sind ihre Kommunikationsformen reichhaltig und anpassungsfähig. Die Einschätzung, ob es Tierarten gibt, bei denen sich die Individuen in der sozialen Gemeinschaft trainieren und voneinander lernen, hängt von dem Verständnis solcher „Lehrformen“ ab und kann hier nicht weiter diskutiert werden. Unabhängig davon steht es nach der kognitiven Wende in den Verhaltens- und Neurowissenschaften außer Frage, dass viele Tierarten über mentale Zustände verfügen, die wesentliche Elemente enthalten, die den von uns introspektiv und subjektiv erfahrenen entsprechen (nach Animal Thinking: Menzel/Fischer 2011).

Aufmerksamkeit auslösen

Für Quintilian war das Erregen von Aufmerksamkeit einer der wesentlichen Punkte: Ein Redner sollte durch sprühende Rede, blitzende Augen und vielfältige, engagierte Körpersprache seine Zuhörer in den Bann ziehen. Für den Zuhörer bedeutet dies, dass seine Aufmerksamkeit auf den Redner und dessen mitgeteilte Botschaft gerichtet wird. Ohne Aufmerksamkeit keine Wahrnehmung und kein Lernen. Grundlage für die gerichtete Aufmerksamkeit sind die modulatorischen neuronalen Systeme, die unter dem Einfluss äußerer Reize und innerer Zustände aktiviert werden. Im Säugerhirn kommt mehreren aus dem Stammhirn aufsteigenden, sich weit in Neuronenbündeln eine koordinierende und selektiv aktivierende Rolle zu. Auf der kortikalen Ebene, insbesondere einer Region im präfrontalen Kortex, führen diese modulatorischen Systeme gemeinsam mit den für die aktuelle Situation relevanten sensorischen Systemen zu Erwartungen, die dann im Arbeitsgedächtnis zu unterstützenden oder hemmenden neuronalen Aktivitäten führen. Eine Reihe von Neuropathologien kann dieses Wechselspiel beeinflussen und dazu führen, dass geschwächte Aufmerksamkeit generiert wird oder diese nicht genügend selektivierend wirkt. Ein anschauliches Bild vergleicht die gerichtete Aufmerksamkeit auf der kortikalen Ebene mit einem Scheinwerfer, der bestimmte Regionen beleuchtet und andere im Dunklen lässt. Wie wir alle wissen, lässt sich dieser Scheinwerfer trainieren. Ein wichtiger Faktor hierbei ist die Überraschung, also das Eintreten eines nicht erwarteten Zustandes. Hierbei spielt die zeitliche Spanne des Arbeitsgedächtnisses eine wichtige Rolle, die weiter unten besprochen wird.

Neugier anregen

Einsteins bekannter Ausspruch „Ich habe keine besondere Begabung, sondern bin nur leidenschaftlich neugierig“ verdeutlicht, welches Potenzial die Entdeckerfreude hat. John Locke charakterisierte die Entdeckerfreude von Kindern in seiner 1693 erschienenen Schrift „Some thoughts concerning education“ so: Will man Kindern einen, wie Locke es nennt, „happy state in this world“ ermöglichen, sollte man ihre natürliche Wissbegierde so sorgfältig wie möglich pflegen. Man sollte Vorsorge treffen, dass man ihren von frühester Kindheit an vorhandenen „Appetit nach Wissen“ täglich neu befriedigt und dass man ihr kindliches „Vergnügen am Erkennen von Dingen“ wachhält und fördert (zitiert nach Overhoff 2009: 34). Die Welt erkunden ist eine lebensnotwendige Funktion des Gehirns, bei Tieren wie beim Menschen. Reduziert man die Vielfalt der Erlebenswelt, verkümmert das Gehirn, bildet weniger neuronale Verknüpfungen aus und leistet nicht einmal die basalen Pro-

zesse für das Überleben. Wie Locke und Einstein richtig erkannten, sind Gehirne darauf angelegt, sich mit Information zu füttern. Diese Funktion betrifft alle Teile des Gehirns, von den Sinnesorganen bis zu den motorischen Steuerinstanzen, und schließt damit die Fülle der nicht bewusstwerdenden Prozesse mit ein. Für das bewusstwerdende Lernen, wie es im Unterricht eine dominante (aber sicher nicht ausschließliche) Rolle spielt, ist die Neugier ein Antrieb, der sich in einer Reihe von Prozessen niederschlägt, die im Folgenden besprochen werden sollen.

Neues Erkennen ist mit einem Glücksgefühl verbunden. Dies bedeutet, dass das Entdecken von Zusammenhängen das neuronale Belohnungssystem im Stammhirn des Menschen (insbesondere die dopaminergen Bahnen des ventralen Tegmentums) aktiviert, ein Vorgang, der durch geeignete Methoden bei Tieren wie dem Menschen nachgewiesen werden konnte. Die Verhaltensforschung hat viele Beispiele dafür zusammengetragen, dass Tiere allein durch die Befriedigung ihrer Neugier einen Belohnungseffekt erreichen und manche Anstrengung auf sich nehmen, um zu dieser inneren Belohnung zu gelangen. Die phylogenetischen Wurzeln für diese Mechanismen der inneren Belohnung liegen wohl in den belohnenden Effekten des Explorierens der Umwelt. Auch Nicht-Wirbeltiere wie Insekten und Krebse explorieren ihre Umwelt ohne erkennbare äußere Belohnung. Tolman (1948) zeigte, dass Ratten und Mäuse allein durch Explorieren eines Irrgartens sehr schnell die effektiven Wege erlernen, wenn bestimmte Orte darin eine Bedeutung erlangen. Hier wird eine Brücke zu der Einordnung von Gedächtnisinhalten in räumliche Zusammenhänge sichtbar, auf die weiter unten noch eingegangen wird.

An Bekanntes anknüpfen

Lernen führt im Gehirn zu einer Gedächtnisspur, die sich in den veränderten Verschaltungen der Neuronen untereinander sowie deren jeweiligen funktionellen Eigenschaften und Strukturen niederschlägt. Eine solche Gedächtnisspur muss so angelegt werden, dass sie auch wieder aufgerufen werden kann. Keine noch so neuartige Gedächtnisspur ist völlig verschieden von bereits vorhandenen. Auch ein Säugling kommt mit einer Fülle von phylogenetischen Gedächtnisspuren auf die Welt, die die genetischen Entwicklungsprogramme im Gehirn unter dem Einfluss der Umwelt steuern. Das Zusammenspiel von angeborenen und erworbenen Gedächtnisspuren wird im weiteren Lebensverlauf immer lockerer und verschiebt sich zu den erworbenen. Eine wesentliche Komponente für die Verknüpfung von vorhandenen mit neuen Gedächtnisspuren ist ihre inhaltliche Überlappung, weil sich Inhalte im Gehirn in Form von Verknüpfungen in assoziativen Netzen niederschlagen. Da in diese assoziativen Netze auch Kontextbedingungen (Ort, Zeit, soziale Situation, eigene Zustände und Reaktionen, emotionale Anteile und vieles

mehr) eingehen, stehen viele Hilfsmittel zur Verfügung, um Assoziationsketten zu bilden.

Die ersten Schritte im Verknüpfen von bekannten und neuen Inhalten bestehen darin, bereits Erlerntes aufzurufen. Allein dieser Vorgang des erfolgreichen Erinnerns enthält bereits einen belohnenden Charakter. Die neuronale Ursache dieses wohlbekannten Phänomens (man denke nur an die Lust, Kreuzworträtsel oder Sudokus zu lösen) beruht auf der Tatsache, dass auch die belohnenden neuronalen Systeme erlernt haben, auf die Lerninhalte zu reagieren. Wenn also ein gelernter Inhalt erfolgreich aufgerufen wird, dann werden auch die Belohnungsneurone aktiv und erzeugen auf diese Weise eine innere Belohnung. Auch dieser Mechanismus der inneren Belohnung durch Erinnern ist keine Besonderheit des menschlichen Gehirns, vielmehr findet man ihn bei Säugetieren allgemein und auch bei Insekten.

Möglichst viele Sinneserfahrungen einbeziehen

Das Gedächtnis ist im Gehirn nicht an einem bestimmten Ort lokalisiert, vielmehr verteilt es sich über seine sensorischen, assoziativen und motorischen Areale mit all ihren vielfältigen Substrukturen. Auch wenn die Neurowissenschaft noch nicht recht weiß, was diese vielen Gedächtnisspuren zu einem kohärenten Inhalt zusammenbindet, so ist doch klar, dass die verschiedenen Komponenten füreinander einspringen können und sich im Falle von unvollständigen oder beim Aufrufen nicht aktivierbaren Teilfunktionen ergänzen können. In der Neurowissenschaft gibt es zahlreiche Beispiele für dieses Ergänzen von partiellen Gedächtnisinhalten bis hin zu unzutreffenden und mit den Erwartungen des Tieres oder Menschen zusammenhängenden „falschen“ Erinnerungen.

Wir Menschen sind in unserer bewusst wahrgenommenen Welt vor allem Augen„tiere“. Unser visuelles Gedächtnis ist außerordentlich gut entwickelt. Menschen mit einem Supergedächtnis unterliegen meist einem Zwang, alles Wahrgenommene in Bilderfolgen zu übersetzen (Luria 1979). Bildhafte Vorstellungen stärken („anschaulich machen“) ist daher ein altbewährtes Rezept, das schier unerschöpfliche bildhafte Gedächtnis zu nutzen. Neuroanatomien haben abgeschätzt, dass gut die Hälfte des menschlichen Gehirns mit der Verarbeitung und Speicherung visueller Erfahrung beschäftigt ist. Immer wieder werden in diesen reich vernetzten und in wechselhaften Beziehungen stehenden Arealen unterschiedliche Aspekte der visuellen Welt und des visuellen Gedächtnis repräsentiert. Die topographische Struktur der Sehwelt ist dabei ein durchgehendes Prinzip, bei dem die Nachbarschaftsbeziehungen erhalten bleiben. Auch in den visuellen Systemen sind die Gedächtnisspuren zu den gleichen Inhalten vielfältig gespeichert, und auch hier

stellt sich wieder die offene Frage, wie sich denn diese mannigfaltigen Spuren zu einem Perzept formen.

Unser Wissen ist in Raum und Zeit organisiert. Episodische Gedächtnisse beziehen sich auf einen Ort und eine Zeit. Die organisierende Rolle von Raum und Zeit auch bei der Gedächtnisbildung wird einem paarigen kortikalen Areal in den temporalen Loben zugeschrieben, dem Hippokampus. Hier ist der Raum, in dem wir Erfahrungen machen, in multiplen geometrisch geordneten Ortsrepräsentationen kodiert, die eine kognitive Karte als Organisationsprinzip für das Gedächtnis bilden. Auch serielle Erfahrungen hinterlassen hier ihre spezifischen Spuren. Für die Wahrnehmung von Raum haben wir kein einzelnes Sinnesorgan. Viele, wohl alle, Sinnesorgane wirken zusammen, um die sequenziellen Erfahrungen in kognitiven Karten niederzulegen. Der Neurowissenschaftler und Nobelpreisträger Eric Kandel beschreibt die Funktionsweise des Hippokampus treffend so:

„Unlike Vision, touch, or smell, which are prewired and based on Kantian a priori knowledge, the spatial map presents us with a new type of representation, one based on a combination of a priori knowledge and learning. The general capability for forming spatial maps is built into mind, but the particular map is not. Unlike neurons in a sensory system, place cells [die neuronalen Elemente der kognitiven Karte, R.M.] are not switched on by sensory stimulation. Their collective activity represents the location where the animal thinks it is“ (Kandel 2006: 309).

Beim Menschen kommt die Besonderheit hinzu, dass die bewussten Wissensformen den Beitrag des Hippokampus einschließen. Der Hippokampus ist allerdings nicht der endgültige Speicherort für diese Gedächtnisse. Vielmehr stellt er eine dynamische Durchgangsstruktur während der Gedächtnisbildung dar. Die Verknüpfung des Hippokampus mit neokortikalen Arealen sorgt dafür, dass die kurzzeitigen Gedächtnisinhalte mit dem zeitlich-räumlichen Ordnungsschema des Hippokampus in anderen Kortexarealen langfristig niedergelegt werden. Es ist nicht verwunderlich, dass die gemeinsamen Eindrücke, vermittelt durch viele Sinnesorgane, die Gedächtnisbildung und den Gedächtnisabruf fördern und sich dies besonders auf bewusstwerdende Inhalte bezieht.

Die Wiederholung ist die Mutter der Weisheit

Repetitio est mater studiorum. Meist wird diese Weisheit als Beschreibung eines mühevollen Vorganges verstanden. Dies ist es aber nicht. Wie oben beschrieben, vermittelt jedes erfolgreiche Erinnern einen Belohnungseffekt. Wiederholen kann also eine lustvolle Unternehmung sein, wenn es gelingt, durch Verknüpfen mit anderen bereits gut beherrschten Inhalten das innere Belohnungssystem genügend stark zu aktivieren.

Eine der wichtigsten Regeln der assoziativen Lerntheorie ist die von Rescorla und Wagner (1972) formulierte Differenzregel. Sie besagt, dass das gelernt wird, was nicht erwartet wird, wenn also ein neuer Lerninhalt einen Überraschungseffekt auslöst. Diese einfache Regel erklärt eine Fülle von assoziativen Lernvorgängen. Da sie sich zudem recht einfach formalisieren lässt, bietet sie das algorithmische Gerüst für formales Lernen, wie es etwa eine Rolle in Robotern und adaptiven Programmen spielt (Churchland/Sejnowski 1992). Nun könnte man einwenden, dass solche einfachen Regeln des assoziativen Lernens beim deklarativen Lernen im Schulunterricht keine Rolle spielen, schließlich werden die Schüler ja nicht mit Zuckerstückchen belohnt, wenn sie Vokabeln lernen oder einen Text erfolgreich übersetzen. Für das Gehirn ist es allerdings von untergeordneter Bedeutung, ob das Belohnungssystem von außen aktiviert wird (Zuckerstückchen) oder sich als „innere“ Belohnung – wie oben dargestellt – manifestiert. In beiden Fällen kommt es auf die optimale Paarung von neuen Lerninhalten und Belohnung an, und auf die Wiederholungen solcher Paarungen.

Wenn man die neuronalen und zellulären Mechanismen betrachtet, die dem assoziativen Lernen zugrunde liegen, dann stellt man fest, dass wiederholte Paarungen von neuen (und überraschenden) Inhalten und den entsprechenden Aktivitäten der belohnenden Neurone die Gedächtnisspur festigen. Seit den bahnbrechenden Entdeckungen von Eric Kandel (2006) hinsichtlich der molekularen Reaktionskaskaden in bestimmten Neuronen der marinen Nacktschnecke *Aplysia* und den (von anderen Forschern erarbeiteten) molekulargenetischen Befunden an der Fruchtfliege *Drosophila* wissen wir bereits schon sehr viel über die beteiligten Proteine und Gene. Es zeigte sich zudem, dass diese Befunde in weitem Rahmen auf die Gehirne anderer Tiere und des Menschen übertragbar sind. Die meisten Neurowissenschaftler gehen von der Annahme aus, dass alle Lernformen Elemente solcher assoziativen neuronalen Plastizität als zelluläre Bausteine enthalten. Die Bedeutung dieser Annahme und die Auswirkungen auch auf bewusstwerdende Formen des Lernens und der Gedächtnisbildung werden in den weiteren Abschnitten noch klarer werden.

Möglichst viel selbst tun und „begreifen“

Die behavioristische Lerntheorie unterscheidet zwischen zwei Formen des assoziativen Lernens, der klassischen Konditionierung (auch Pavlov'sche Konditionierung genannt) und der instrumentellen (oder operanten) Konditionierung. Im ersten Fall wird eine assoziative Verknüpfung zwischen einem zu lernenden Stimulus und einer Bewertung hergestellt, im zweiten Fall entdeckt das Tier (oder der Mensch) durch Ausprobieren einen Lösungsweg für ein Problem und erfährt da-

durch eine Bewertung seines eigenen Tuns. Hierbei stellt sich ein Netz von assoziativen Verknüpfungen zwischen mehreren Zuständen ein: (1) den Stimuli, die die Umwelt charakterisieren, während die Lösung gefunden wird, (2) den Verhaltensprogrammen, die den Lösungsweg ausmachen, und der Bewertungssituation. Instrumentelles Lernen unterstützt daher schon in seinen einfachsten Strukturen eine intensivere und mannigfaltigere Verknüpfung von neuronalen Wegen als die klassische Konditionierung. Hinzukommt, dass instrumentelles Lernen stets einen aufmerksamen Organismus voraussetzt, in dem das Ausprobieren von Verhaltensweisen zu jeweils unterschiedlichen Erwartungen für die generierte Verhaltensweise führt, die mit gerichteten und spezifischen Formen der Aufmerksamkeit verbunden sind. Wie oben dargestellt, selektioniert Aufmerksamkeit die beteiligten neuronalen Areale und hilft damit bei der Bildung der relevanten Gedächtnisspuren.

Wie übersetzt sich das in den Schulalltag? Nun, wir Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wissen, was uns antreibt, die Entdeckerfreude, das Selbst_Aufspüren von Zusammenhängen, das Aufblitzen eines eigenen Gedankens, der eine Erklärung für ein Erfahrungsphänomen darstellt. Im Kontext der Schuldidaktik nennt man das so schön „discovery based education“, entdeckenden Unterricht. Und genau daran fehlt es (meist) im Schulalltag auf allen Jahrestufen.

Für ein Kind ist die Welt fast im Minutentakt voller neuer Entdeckungen. Jede dieser Entdeckungen wird in unserem Gehirn mit einem Schwall von Bedeutung übertragenden Signalen verbunden, die mit der Empfindung von Begeisterung verbunden sind. Die Schule ist die Institution, in der diese belohnende Begeisterung für einen systematischen Kulturgewinn eingesetzt werden soll. Vielfach gelingt das vor allem mit Kindern vor der Pubertät, und vielfach scheitert es. Wie kommt es, dass die Begeisterung so leicht verloren geht?

Wie oben ausgeführt, ist die Voraussetzung für Lernen die neuronale Zuweisung von „neu“ und „bedeutsam“. Eine Einsicht oder Fertigkeit muss also neu sein und als bedeutsam für uns selbst eingestuft werden. Alltägliche Routine und ermüdende Vorgaben von Wissensstoff dämpfen die Signale unserer neuronalen Belohnungssysteme und lassen sie leicht ganz versiegen. Eine gute Lehrerin, ein guter Lehrer wird die Begeisterung seiner Schülerinnen und Schüler durch Überraschungen, Angebote zum Selbst-Entdecken und Durchbrechen der Routine fördern.

Nicht zu viel auf einmal lernen und verteilt üben

Lernen ist die Voraussetzung für Gedächtnis, aber das Gedächtnis ist nicht sofort mit dem Lernen vorhanden. Die molekularen und zellulären Prozesse der Gedächtnisbildung und solche auf der Systemebene des ganzen Gehirns erstrecken sich

über mehrere Zeitspannen. Zuerst wird das wenige Minuten dauernde Kurzzeitgedächtnis gebildet. Dieses in seiner Kapazität begrenzte Gedächtnis ist sehr störanfällig für Interferenzen der verschiedensten Art, neue Lernvorgänge, Aufmerksamkeitsverschiebungen, emotionale Zustände, Störungen der normalen Gehirnfunktion (z.B. durch einen mechanischen oder psychischen Schock) und manches mehr. In dieser Phase spielt der Hippokampus eine besonders wichtige Rolle für bewusstwerdendes Wissen. Mit dem Übergang zu einem mittelzeitigen Gedächtnis sind aber die Bildungsvorgänge noch nicht abgeschlossen. Diese involvieren nun die Kommunikation zwischen den Gehirnarealen und in den beteiligten Arealen die zellulären Vorgänge, die aus den transienten Gedächtnisspuren stabile Formen, die vor allem auf Strukturveränderungen in den Neuronennetzen beruhen. Die Neurowissenschaft erarbeitete in den letzten beiden Jahrzehnten gerade über diese Vorgänge eine Fülle von aufregenden Ergebnissen, die sie unter dem Begriff der zellulären und systemischen Konsolidierung des Gedächtnisses zusammenfasst.

Solche Konsolidierungsprozesse stellen selbstorganisierte Vorgänge im Gehirn dar, die dann am besten ablaufen, wenn sie nicht gestört werden. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts erkannte der Berliner Lernpsychologe Hermann Ebbinghaus (1885), dass er dann die meisten seiner Gedächtnisinhalte (Listen von sinnlosen Silben) erinnerte, wenn er solche Listen in größeren Zeitabständen lernte und sein Gehirn nach dem Lernen schonte. Die beste Weise der Schonung ist der Schlaf, wie wir heute wissen (Born 2010). Es wäre eine wichtige Aufgabe der Didaktik, solche basalen Erkenntnisse in den alltäglichen Schulunterricht eingehen zu lassen. Dies muss ja nicht zu Schlafstunden führen, sondern sollte sich in der sinnvollen Aufeinanderfolge von Unterrichtseinheiten widerspiegeln. Auch für jeden einzelnen Schüler insbesondere kurz vor Prüfungen wäre es eminent wichtig, über die Gründe der alten Rhetorikerregel unterrichtet zu sein, dass komplexe und umfangreiche Lerninhalte nicht auf einmal „gepaukt“ werden können.

Die Umgebung des Lernens derjenigen beim Abrufen ähnlich machen

Ich habe oben bereits darauf hingewiesen, dass Raum und Zeit über die Funktion des Hippokampus Gedächtnisinhalte strukturieren. In unserem episodischen Gedächtnis wird dies besonders deutlich. Wir erinnern uns nicht nur an eine bestimmte Sache, sondern auch wann und wo und unter welchen Umständen wir diese erfahren haben. Wenn uns bestimmte Begriffe oder Zusammenhänge nicht einfallen, dann hilft es häufig, sich gedanklich in die Situation hineinzusetzen, in der wir diese gelernt haben. Kontextstimuli im weiteren Sinne fördern also das Abrufen aus dem Gedächtnis. Die Gründe hierfür lassen sich aus dem Obengesagten über die weit verteilten assoziativen Netze, die einem Gedächtnisinhalt zugrunde liegen, ent-

nehmen. Die Fähigkeit solcher assoziativen Netze, fehlende Komponenten zu ergänzen, kann auch als neuronaler Mechanismus des Entdeckens von versteckten Zusammenhängen, ja als wichtige Komponente der Phantasie betrachtet werden, und stellt sich erst im Verlaufe der Konsolidierung des Gedächtnisses ein. Ein Übermaß kann wie im Falle von Gedächtniskünstlern pathologische Züge annehmen. Im Normalfall aber hilft es, uns Gedächtnis- und Abrufücken zu überbrücken und versteckte Zusammenhänge zu erkennen.

Kontextbedingungen sind nicht nur äußere Zustände. Starke Raucher wissen, dass sie sich besser erinnern können, wenn sie rauchen. Das Umfeld, besonders das soziale, versetzt unser Nervensystem in bestimmte Zustände, die gleichermaßen zu den Kontextbedingungen gehören. Soziale Einstellungen werden hormonell gesteuert und sind in ein Rückkopplungssystem über die Umwelt eingebunden. Ein spannungsfreies soziales Umfeld ist daher von eminenter Bedeutung. Die Neurowissenschaft betont die hormonellen und neuronal-modulatorischen Prozesse und zeigt, welche Bedeutung sie für das Erlernen und für das Erinnern spielen. Wir sollten solchen mechanistischen Betrachtungen nicht skeptisch gegenüberstehen. Sie werden uns in Zukunft noch viel reichhaltigere Information über die Prozesse in unserem Gehirn zur Verfügung stellen, und dennoch wird damit die kognitive Ebene der sozialen Interaktionen, des Lernens, Erinnerns und der Phantasie in keiner Weise eingeschränkt. In diesem Zusammenhang möchte ich an die Frage des „Gehirndopings“ erinnern, einen Problemkreis, den ich aber nicht ausführen kann.

Abschließende Bemerkung

Der Erfolg des Homo sapiens in der biologischen Evolution hat viele Wurzeln. Eine von ihnen – und sicher eine der wichtigsten – ist die phylogenetische Vorbereitung für die kulturelle Evolution. Eine Triebfeder der kulturellen Evolution ist die unstillbare Neugier des Menschen. Befriedigung der Neugier und Entdecken von kausalen Zusammenhängen ist mit einem Glückserlebnis verbunden, das aus der Aktivierung der neuronalen Belohnungssysteme im Stammhirn erwächst. John Locke hatte vollkommen Recht, in der Weitergabe unseres Wissens über die Generationen hinweg geht es vor allem um die Erhaltung des „happy state in this world“ bei den Kindern. Solche Glückserlebnisse müssen nicht mit irgendwelchen didaktischen Tricks erzeugt werden, sie stellen sich automatisch ein, wenn wir sie zulassen, indem wir die eigenständigen Entdeckungen nicht vorwegnehmen, Bedingungen schaffen, in denen Erlernen aus Einsichten gefördert wird, und wenn wir die Freude am Zuwachs des Wissens ermöglichen. Die Neurowissenschaft wird weitere Erkenntnisse vor allem über die Funktionsweise der Belohnungssysteme erarbeiten und Anregungen für den Schulalltag geben können. Im Besonderen wird

sie eine Begründung für manche empirischen Regeln liefern, die über die Jahrhunderte zur Förderung des Wissenserwerbs formuliert wurden.

Wissen ist gespeichertes und abrufbares Gedächtnis. „Groß ist die Macht des Gedächtnisses, gewaltig groß, mein Gott ein Tempel, weit und unermesslich ... Eine Kraft meines Geistes ist's, zu meiner eigenen Natur gehörig“ (Aurelius Augustinus, *Bekenntnisse*). Dieser Tempel ist das Gehirn, *der* Teil unseres Körpers, der uns zu dem macht, was wir sind, der aus der Vergangenheit Zukunft werden lässt und der trotz seiner geistbefähigenden Eigenschaften ein lebendes Organ darstellt, also den Gesetzen der Biologie (und damit auch denen der Physik) unterliegt. Da die Gedächtnisinhalte weit verteilt und verzahnt im Gehirn vorliegen, ist der Vorgang des Erinnerns ein konstruktiver, ja ein entdeckender Vorgang. „Remembering is not the re-excitation of innumerable fixed, lifeless and fragmentary traces. It is an imaginative reconstruction, or construction, built out of the relation of our attitude towards a whole active mass of organized past reactions or experience, and for a little outstanding detail which commonly appears in image or in language form.“, so der britische Psychologe Frederic Bartlett (zitiert nach Baddeley 1986). Die Tatsache, dass dieses konstruierende Erinnern die Belohnungssysteme aktiviert, erklärt, warum Wissen in sich bereits eine beglückende Erfahrung ist, und umso mehr so, wenn durch Verwenden des Wissens neue Einsichten entstehen.

Die Neurowissenschaft steht noch ganz am Anfang ihrer Bemühungen, altehrwürdige Regeln der Wissensvermittlung mechanistisch zu erklären. Wie weit eine solche mechanistische Erklärung einmal gehen wird, lässt sich jetzt noch nicht vorhersehen, aber es kann nicht bezweifelt werden, dass dies sehr weitreichende Erklärungen sein werden. Eine Verteidigung der Descartes'schen Position nach wesenhafter Verschiedenheit von Gehirn und Geist wird nicht hilfreich sein auf diesem Weg, auch wenn ein vorsichtiger Neurowissenschaftler heute offenlassen muss, wie eine Gehirnthorie aussehen wird, die den Geist mit einschließt.

Literatur

- Baddeley, A.D. (1986): Working Memory. Oxford. (auf Deutsch erschienen unter dem Titel: So denkt der Mensch. München, 1988)
- Born, J. (2010): Slow-wave sleep and the consolidation of long-term memory. In: 15. World Biology Psychiatry 11. Supplement 1. S. 16-21.
- Churchland, P.S./Sejnowski, T.J. (1992): The Computational Brain. Cambridge.
- Ebbinghaus, H. (1885): Human Intelligence. Leipzig.
- Kandel, E.R. (2006): In Search of Memory. New York. (auf Deutsch erschienen als: Auf der Suche nach dem Gedächtnis. Die Entstehung einer neuen Wissenschaft des Geistes. München 2006)

- Luria, A.R. (1979): Neuropsychology of complex forms of memory. In: Nilsson, L. (Hrsg.): Perspectives on memory research: Essays in honor of Uppsala University's 500th anniversary. S. 279-289.
- Menzel, R./Fischer, J. (2011 Hrsg.): Animal Thinking. Contemporary Issues in Comparative Cognition. Cambridge.
- Overhoff, J. (2009): Vom Glück, lernen zu dürfen. Stuttgart.
- Rescorla, R.A./Wagner, A.R. (1972): A theory of classical conditioning: variations in the effectiveness of reinforcement and non-reinforcement. In: Black, A.H./Prokasy, W.F. (Hrsg.): Classical conditioning II: Current research and theory. New York. S. 64-99.
- Smith Churchland, P. (2002): Brain Wise: Studies in Neurophilosophy. Cambridge.
- Tolman, E.C. (1948): Cognitive maps in rats and men. In: Psychological Review, 55. S. 189-208.