

Lernen aus neurowissenschaftlicher Sicht: Von der Assoziation zur Kognition

Caterina Breitenstein



Caterina Breitenstein

Zusammenfassung

Lernen findet über die gesamte Lebensspanne hinweg statt. Die meisten alltäglichen Lernprozesse (wie Erwerb motorischer Bewegungsabfolgen, Faktenwissen und sozialer Konventionen) erfolgen „automatisiert“ und werden hier unter dem Begriff „assoziatives Lernen“ zusammengefasst. Der folgende Beitrag gibt zunächst einen Überblick über die neurowissenschaftlichen Grundlagen assoziativen Lernens. Im Anschluss wird beispielhaft am Spracherwerb dargestellt, wie neues Wissen erfolgreich über assoziatives Lernen vermittelt werden kann. Drittens wird eine non-pharmakologische Möglichkeit der Verstärkung assoziativen Lernens durch körperliche Voraktivierung vorgestellt. Abschließend wird auf die Anwendungsmöglichkeiten dieser Lernprinzipien im Schulalltag eingegangen.

Schlagerworte: Assoziatives Lernen, Motorische Voraktivierung, Kognitive Neurowissenschaften, Lernverbesserung, Langzeitpotenzierung

Learning from a neuroscientific point of view: From association to cognition

Abstract

Learning takes place at all stages of life. The majority of daily learning processes, like learning new motor sequences or the acquisition of facts and social conventions, occur automatically and are summarized here under the term “associative learning”. The following article first gives an overview of the neuroscientific basis for associative learning. Taking language acquisition as an example, the successful acquisition of a new mini-vocabulary by associative learning principles is then demonstrated. A third section presents a non-pharmacological strategy to promote associative learning by motor coactivation. Finally, the application of associative learning principles in educational settings is described.

Keywords: Associative Learning, Motor Preactivation, Cognitive Neuroscience, Improvement of Learning, Longterm Potentiation

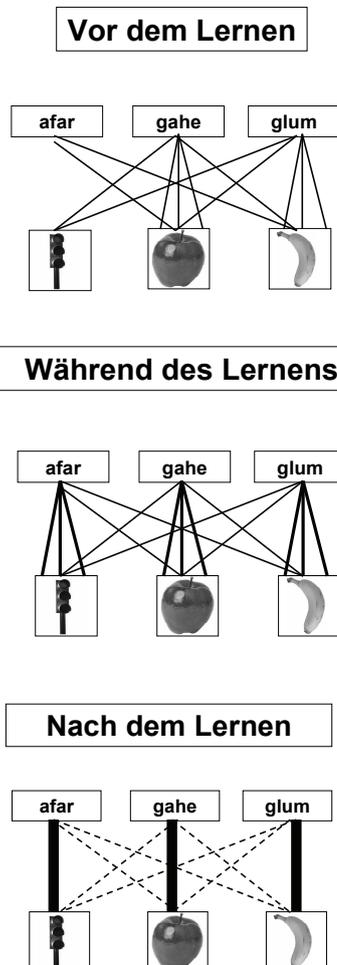
1 Einleitung

Lernen ist ein lebenslang andauernder Prozess. Neben der „instruierten“ Wissensvermittlung erfolgt Lernen im Alltag größtenteils „en passant“, d.h. ohne Bewusstsein für den eigentlichen Lernprozess, indem Gesetzmäßigkeiten über Zusammenhänge von Ereignissen im Gehirn gespeichert werden. Im Gegensatz zum bewussten Lernprozess benötigt Lernen „en passant“ die häufige Wiederholung von Reizkonstellationen in unterschiedli-

chen Situationen (im folgenden „assoziatives Lernen“⁴¹ genannt) und benötigt somit mehr Zeit als das klassische „Pauken“ von Fakten. Bewusstes Lernen benötigt häufig weniger Lerndurchgänge als Lernen „en passant“, die Gedächtnisspur ist dafür störanfälliger (Squire 2004). Ein Beispiel für assoziatives Lernen „en passant“ ist der Fremdspracherwerb in einem Land mit für den Besucher unbekannter Sprache. Initial werden die neuen Sprachlaute der Umgebung für den Besucher keinen Sinn ergeben; bei längerer Verweildauer erklingen bestimmte Lautäußerungen wiederholt in Zusammenhang mit bestimmten Alltagsobjekten oder Ereignissen. In nur wenigen Tagen Aufenthalt werden beiläufig die ersten Vokabeln dieser neuen Sprache gelernt, ohne dass klassisches „Vokabel-Pauken“ erforderlich ist. Abbildung 1 veranschaulicht diesen Prozess modellhaft.

Abb. 1: Assoziatives Lernen am Beispiel des Vokabellernens

Beispiel: Vokabellernen



Bei Eintreffen in einem Land mit unbekannter Sprache machen Lautäußerungen in Zusammenhang mit Objekten zunächst keinen Sinn; alle assoziativen Verknüpfungen sind gleichermaßen schwach. Bei längerer Verweildauer treten bestimmte Laut-Ereignis-Kopplungen häufiger aus, diese Verbindungen werden gestärkt. Nach erfolgreichem Lernen neuer Vokabeln bestehen feste Verbindungen zwischen Lauten und semantischen Konzepten; alle anderen Verbindungen von Lauten und Konzepten wurden abgeschwächt (inhibiert). Im Folgenden werden die neurowissenschaftlichen Grundlagen dieses Lernvorgangs dargestellt.

2 Neurowissenschaftliche Grundlagen des assoziativen Lernens

Das Gehirn des Menschen umfasst über 100 Milliarden Nervenzellen (Neurone), deren Kommunikation die Grundlage für alle bewussten sowie unbewussten Lernprozesse bildet. Ein Neuron besteht aus einem Körper (Soma) und einer unterschiedlichen Anzahl an Dendriten, die dem Informationsempfang dienen. Die Weiterleitung von Informationen erfolgt über das so genannte Axon (Neurit) (vgl. *Schandry* 2003). Die Kommunikation zweier (oder mehr) Neurone eines Neuronenverbandes erfolgt über Synapsen. Die 100 Milliarden Nervenzellen unseres Gehirns umfassen ca. 100 Billionen Synapsen, d.h. jede Nervenzelle ist durchschnittlich mit 1000 anderen Nervenzellen verbunden. Man spricht hier von neuronalen Netzwerken. Bei der Weiterleitung von Informationen von einer Nervenzelle zu benachbarten Nervenzellen werden chemische Botenstoffe (Transmitter) in den synaptischen Spalt zwischen diesen benachbarten Nervenzellen abgegeben. Die Botenstoffe bewirken auf der Empfängerseite (den Dendriten einer Nervenzelle) eine kurzzeitige Veränderung der elektrischen Erregbarkeit und führen (bei hinreichender Transmitterausschüttung) zum „Feuern“ dieser postsynaptischen Nervenzellen. Die Gedächtnisspur kann durch diese so genannte Neurotransmission nur für wenige Minuten aufrechterhalten werden (so genanntes Kurzzeit- oder Arbeitsgedächtnis).

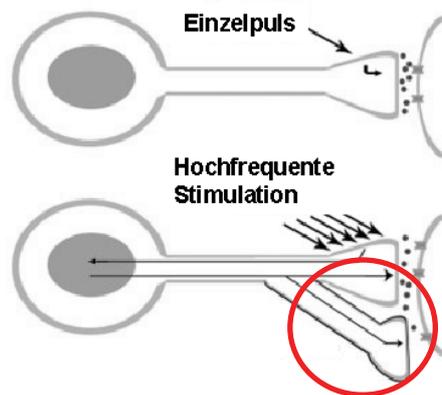
Die langfristige Gedächtnisspeicherung erfordert im Gegensatz zu Kurzzeitgedächtnisleistungen *strukturelle* Veränderungen der Synapsen. Diese umfassen neben einer Veränderung der Rezeptordichte (d.h. eine Zu- oder Abnahme von Rezeptoren der postsynaptischen Membran zwecks Stärkung der synaptischen Effizienz) die Neubildung synaptischer Verbindungen zwischen Nervenzellen, z.B. durch dendritische Aussprossung.

Bei häufiger, synchroner Erregung präsynaptischer Nervenzellen wird die postsynaptische Nervenzelle dauerhaft in ihrer Erregbarkeitsschwelle verändert. In der Folge kommt es zu einer Langzeitpotenzierung („longterm potentiation“/LTP), d.h. zu einem verstärkten und länger andauerndem Aktionspotential (vgl. *Bliss/Lomo* 1973). Bei einer Langzeit-Depression („longterm depression“/LTD) hingegen wird die Stärke des postsynaptischen Potentials reduziert und die Erregungsausbreitung begrenzt, im Sinne einer Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses bei der Informationsübertragung. Im Tiermodell konnten die Mechanismen und die Modulierbarkeit der LTP bereits 1973 durch elektrische Stimulation von Nervenfasern des Hippokampus der Ratte demonstriert werden (vgl. *Bliss/Lomo* 1973). Für den Menschen konnte der Mechanismus der LTP erst in diesem Jahrtausend nachgewiesen werden (vgl. *Esser* u.a. 2006). Kürzlich gelang mit Hilfe eines gehirnbildgebenden Verfahrens (Diffusionstensor-Messung) erstmalig der Nachweis, dass Veränderungen der Nervenfaserdichte in den lernrelevanten Nervenzell-

verbänden bereits nach einem zweistündigem Training (hier in einem virtuellen Autorennen) messbar sind (vgl. *Sagi* u.a. 2012). Die Verbindungsstärke innerhalb solcher Nervenzell-Verbände ist dabei unabhängig von der räumlichen Nähe der Nervenzellen; häufig befinden sich Gruppen eng gekoppelter Nervenzellen in weit verzweigten Netzwerken des Gehirns (vgl. *Garagnani/Wennekers/Pulvermüller* 2009).

Die späte Phase der LTP ist an der Aktivierung verschiedener gedächtnisrelevanter Transkriptionsfaktoren, wie dem cAMP response element binding proteine (CREB), in der Nervenzelle beteiligt. Infolge der Phosphorylierung von CREB kommt es zur Transkription verschiedener Gene in der Nervenzelle, deren Endprodukte die synaptische Aussprossung der Nervenzelle (s. Abbildung 2) sowie die molekulare Überführung des Lernmaterials in das Langzeitgedächtnis steuern (vgl. *Kandel* 2001; *Stough/Shobe/Carew* 2006).

Abb. 2: Beispiel für die Neubildung von Synapsen durch hochfrequente Stimulation



Während ein Einzelpuls (oben) nur zu einer Transmitterausschüttung in den synaptischen Spalt führt, stimulieren hochfrequente Folgen von Nervenpulsen die Aussprossung neuer synaptischer Verbindungen. Dies erhöht den Einfluss auf die postsynaptische Nervenzelle.

Sowohl für instruiertes sowie für beiläufiges Lernen gilt somit, je *häufiger* zwei (oder mehr) Nervenzellen synchron aktiviert werden, desto *stärker* ist die Verbindung zwischen diesen Nervenzellen (so genanntes „Hebb’sches Lernen“ nach dem Erstbeschreiber *Donald O. Hebb*) (vgl. *Hebb* 1949; *Taub/Uswatte/Elbert* 2002). Diese neuronalen Netzwerke ermöglichen den schnellen und zuverlässigen Abruf von Informationen, selbst wenn in der Folge *nur Teile* des Netzwerkes aktiviert werden (vgl. *Pulvermüller* 1999). Neben einer hohen Lernintensität (d.h. einer hohen Anzahl von Lerndurchgängen) begünstigt eine hohe Wiederholungsrate von Ereigniskonstellationen eine stabile Gedächtnisrepräsentation des Gelernten (vgl. *Luscher* u.a. 2000). Auf den schulischen Alltag übertragen bedeutet dies, dass eine häufige Wiederholung einzelner Wissensinhalte (vermittelt in unterschiedlichen Kontexten, zur Entwicklung eines weit verbreiteten neuronalen Netzwerkes) Grundvoraussetzung für die Stärkung synaptischer Effizienz und somit einer langfristigen Behaltensleistung ist.

Menschen und Tiere verfügen darüber hinaus über wirksame *intrinsische* Mechanismen der Lern- und Gedächtnissteigerung. Wenn eingehende sensorische Reize für das Individuum *neuartig* sind oder mit einer *unvorhergesehenen Belohnung* einhergehen („internes Belohnungssystem“), werden dopaminerge Neurone im Mittelhirn aktiviert, die durch Modulation subkortikaler, limbischer und kortikaler Zielneurone das Lernen neuer Assoziationen verstärken (vgl. *Tobler/Fiorillo/Schultz* 2005; *Fiorillo/Tobler/Schultz* 2003; *Schultz* 2002). Dieser Mechanismus der Neuromodulation bietet Angriffspunkte für eine pharmakologische Verstärkung von Lernprozessen (vgl. *Tully* u.a. 2003). Neuromodulatorisch wirksame Pharmaka, wie Cholinergika und monoaminerge Substanzen, entfalten ihre Wirkung insbesondere am postsynaptischen Neuron. Die Neuromodulatoren lösen dabei keine direkte Erregungsweiterleitung aus, sondern verändern die Erregbarkeitsschwelle der postsynaptischen Zelle bei anschließender (physiologischer) Stimulation durch einen Neurotransmitter. Der lernverstärkende Mechanismus der (intrinsischen und pharmakologischen) Neuromodulation besteht somit in einer Förderung synaptischer Effizienz durch Fazilitierung von LTP oder LTD (vgl. *Kelley* 2004), in dessen Folge es zu einer Verstärkung häufig genutzter Nervenverbindungen bei gleichzeitiger Abschwächung selten genutzter Verbindungen kommt (s. Schema in Abb. 1).

Neuroanatomisch spielt die Hippokampus-Formation im medialen Temporallappen des Gehirns bei Lernen und Gedächtnisbildung die wichtigste Rolle (vgl. *Jeneson/Squire* 2012). Vor allem die glutamatergen NMDA-Rezeptoren der CA1-Region des Hippokampus sind an der Gedächtnisbildung beteiligt (vgl. *Jay* 2003). Vergleichbare zelluläre Prozesse wurden jedoch auch für andere Regionen des Gehirns dokumentiert, wie zum Beispiel im Kleinhirn (vgl. *Salin/Malenka/Nicoll* 1996). In Tierexperimenten konnte zudem gezeigt werden, dass synaptische Veränderungen ausschließlich eine Verzweigung eines Axons betreffen können (vgl. *Rosenzweig/Barnes* 2003) und Lernprozesse im Gehirn somit hochspezifisch ablaufen.

Auch Gen-Umwelt-Interaktionen („ecogenetic context“) sind von großer Bedeutung für das allgemeine Lernpotential einer Person sowie das interindividuell unterschiedliche Ansprechen auf lernfördernde Interventionen (für eine Übersicht siehe *Goldberg/Weinberger* 2004). Einfluss auf die direkte Signalübertragung (Neurotransmission) zwischen Nervenzellen hat beispielsweise eine genetische Variation im Catechol-O-methyltransferase (COMT)-Metabolismus (ein am Dopaminabbau im synaptischen Spalt beteiligtes Enzym) (vgl. *Egan* u.a. 2001); die Langzeitpotenzierung im Hippokampus wird u.a. beeinflusst durch Varianten des Brain-derived-neurotrophic-factor (BDNF) (vgl. *Egan* u.a. 2003) oder des KIBRA- (vgl. *Papassotiropoulos* u.a. 2006; *Schaper* u.a. 2008) oder des Arc-Gens (*Bramham* u.a. 2010).

3 Assoziatives Lernen im Alltag am Beispiel des Fremdspracherwerbs

Statistisches Lernen ist ein grundlegender Mechanismus der Informationsverarbeitung im menschlichen Gehirn. Dabei werden aus der Flut eingehender Sinneserfahrungen probabilistische Regelmäßigkeiten ermittelt. Dies geschieht, ohne dass dem Lernenden das zugrunde liegende probabilistische Prinzip bewusst ist: der Lernprozess läuft automatisch ab (vgl. *Kim* u.a. 2009). Ein alltagsnahes Beispiel ist, dass Kinder bereits vor dem Alter

von drei Jahren allein durch statistische Kovariationen die Ursache und die Wirkung von Ereignissen unterscheiden lernen (vgl. *Gopnik* u.a. 2004).

Wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, ist das Grundprinzip erfolgreichen Lernens eine hohe Intensität (viele Lerndurchgänge innerhalb einer dichten Zeitspanne), gepaart mit einer hohen Wiederholungsfrequenz gleichartiger Reizkonstellationen. Im Folgenden werden diese Prinzipien am Beispiel des auf assoziativen Lernprinzipien beruhenden Fremdspracherwerbs bei jungen Erwachsenen veranschaulicht.

Für viele der am Spracherwerb beteiligten Prozesse (Worterbwerb, Erwerb grammatischer Regeln) sind statistische Extraktionsmechanismen bedeutsam. Die Extraktion dieser Kovariationen aus der Umwelt ist umso erfolgreicher, je größer die zur Verfügung stehende Datenbasis ist, d.h. je mehr Lerndurchgänge durchlaufen wurden. Von der Autorin wurde vor einem Jahrzehnt ein auf assoziativen Lernprinzipien basierendes, intensives Training zum Erwerb des Miniatur-Lexikons „Wernicko“ entwickelt (vgl. *Breitenstein/Knecht* 2002) und in zahlreichen Untersuchungen an gesunden erwachsenen Probanden validiert (vgl. *Breitenstein* u.a. 2006; *Breitenstein* u.a. 2005; *Knecht* u.a. 2004; *Breitenstein* u.a. 2004a; *Breitenstein* u.a. 2004b). Das Lernmodell basiert auf Beobachtungen zur kindlichen Sprachentwicklung. Aus diesen geht hervor, dass dem Erwerb eines neuen Vokabulars assoziative Lernprinzipien zugrunde liegen (vgl. *Gershkoff-Stowe* 2002; *Vermeer* 2001; *Breitenstein/Knecht* 2003).

Im Rahmen des assoziativen Vokabeltrainings werden den Probanden Bilder von Alltagsobjekten (z.B. das Bild eines Baumes) gezeigt, gepaart mit der auditorischen Präsentation eines phonologisch korrekten Pseudowortes (z.B. /alep/). Durch Drücken einer Taste auf der Computertastatur (ja- oder nein-Taste), in einem Intervall von bis zu 1000 ms nach Präsentationsbeginn, entscheiden die Probanden, ob das Pseudowort den auf dem Bild dargestellten Gegenstand korrekt benennt. Die zeitliche Restriktion der Reaktion dient der Kontrolle von Reaktionsstilen, z.B. langsames Reagieren zwecks Erhöhung der Trefferquote. Alle 1.5 sec wird ein neues Pseudowort-Bild Paar für die Dauer von 1 sec präsentiert. Auf diese Weise werden innerhalb eines 10-minütigen Trainingsdurchgangs mehrere hundert Bild-Pseudowort Kopplungen, im Verlauf des gesamten Trainings mit fünf Durchgängen mehrere tausend Kopplungen von Pseudowörtern und bildlich dargestellten Gegenständen präsentiert. Die fünf Trainingsdurchgänge können dabei innerhalb einer einzigen Sitzung stattfinden oder über mehrere aufeinanderfolgende Tage verteilt sein.

Das assoziative Lernprinzip des Sprachtrainings besteht darin, dass „korrekte“ Zuordnungen zwischen bildlich dargestellten Alltagsgegenständen und unbekanntem Pseudowörtern über die Trainingsblöcke hinweg häufiger auftreten als „inkorrekte“ Zuordnungen (sogenanntes latentes „Stimulus-Stimulus-Lernen“ im Gegensatz zu einer anderen Form des assoziativen Lernens, dem „Stimulus-Reaktion-Lernen“). Innerhalb eines Trainingsblocks werden die „korrekten“ Zuordnungen viermal präsentiert, während jede „inkorrekte“ Zuordnung nur zweimal präsentiert wird. Die „korrekten“ Zuordnungen wiederholen sich in den vier folgenden Trainingseinheiten, während jede „inkorrekte“ Zuordnung nur in jeweils einer der Trainingseinheiten vorkommt. Damit beträgt das Verhältnis korrekter zu inkorrektener Zuordnungen am ersten Trainingstag 4:2 und steigt bis zum fünften Trainingstag auf ein Verhältnis von 20:2 an. Die Probanden lernen durch das Häufigkeitsprinzip intuitiv, welches Pseudowort die korrekte Bezeichnung für das jeweils dargestellte Objekt ist. Am letzten Trainingstag findet zusätzlich ein Test zum Transfer semantischen Wissens statt. Dazu wird anstelle eines Bildes der deutsche Objektname für

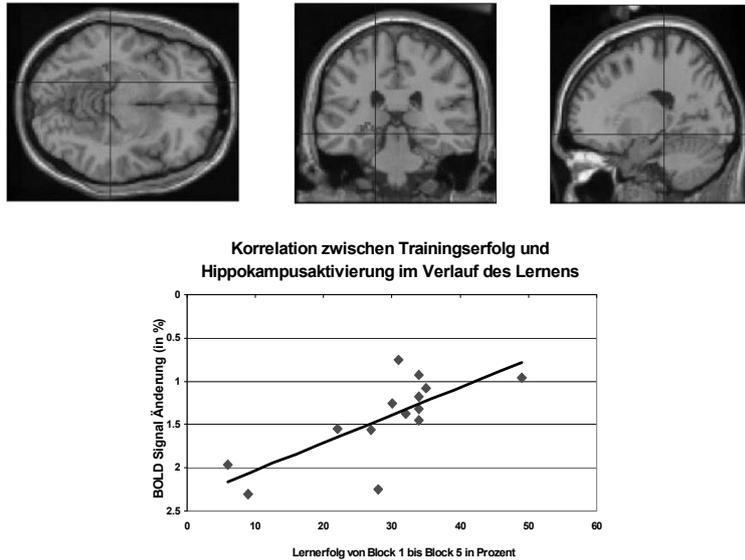
eines in der Lernphase gesehenen Objektes akustisch dargeboten (z.B. /Baum/). Nach einem Intervall von 1 sec wird, ebenfalls auditorisch, entweder die korrekte (z.B. /alep/) oder eine inkorrekte (z.B. /bini/) Übersetzung des deutschen Wortes in die Kunstsprache dargeboten. Die Probanden müssen wieder per Tastendruck (Ja- oder Nein-Taste) entscheiden, ob es sich um die korrekte Übersetzung handelt oder nicht. Dieser Transfer-Test dient der Überprüfung, ob in dem Pseudowort-Bild-Assoziationstraining tatsächlich semantisches Wissen auf das jeweilige gelernte Pseudowort übertragen wurde oder ob nur eine spezifische auditorisch-visuelle Assoziation zwischen dem jeweiligen Pseudowort und dem zugehörigen Bild gelernt wurde.

Die Ergebnisse für inzwischen mehrere hundert gesunde erwachsene Probanden (18 bis 70 Jahre) zeigen, dass sich ein Vokabular von bis zu 50 neuen Namen für Alltagsobjekte innerhalb weniger Trainingssitzungen mittels assoziativer Lernprinzipien erfolgreich und über mehrere Monate hinweg sehr stabil vermitteln lässt (vgl. *Breitenstein/Knecht* 2002). Auch die Einbindung in bestehende lexikalische und konzeptuelle neuronale Netzwerke der Probanden konnte mittels geirnbildgebender Verfahren (Magnetenzephalographie) aufgezeigt werden (vgl. *Dobel* u.a. 2009).

Für den Lernerfolg ist es nicht erforderlich, dass die Probanden Rückmeldung während der Aufgabendurchführung erhalten (vgl. *Breitenstein* u.a. 2004a). Somit sind die kognitiven Anforderungen eines assoziativen Trainingsprogramms an den Lernenden gering, und die Lernmethode ist grundsätzlich auch für Personen mit eingeschränkten Aufmerksamkeitsressourcen (z.B. bei Aufmerksamkeitsdefiziten in Folge einer Gehirnschädigung wie bei Schlaganfallpatienten geeignet) (vgl. *Breitenstein* u.a. 2004a; *Menke* u.a. 2009). Die geringen kognitiven Anforderungen sowie die hohe Stabilität des Lernerfolgs sind die Stärken des assoziativen Lernens (vgl. *Breitenstein* u.a. 2004a).

Trotz der relativ homogenen Lernkurven bei assoziativen Lernansätzen unterscheiden sich Personen bekannterweise in der Leichtigkeit des Spracherwerbs (Stichwort „Sprachbegabung“). Erkenntnisse über die biologischen Grundlagen dieser Spracherwerbsvariabilität bilden die Voraussetzung zur Entwicklung neuer Strategien zur Förderung des Sprachlernens. Wir trainierten deshalb junge Erwachsene in dem Miniaturlexikon „Wernicko“, während deren Hirnaktivität mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie gemessen wurde (vgl. *Breitenstein* u.a. 2005). Personen mit der initial sowie im Verlauf des Lernens stärksten Aktivität des linken (sprachdominanten) Hippokampus (dem „Manager“ der Gedächtniseinspeicherung, s.o.) lernten nicht nur das neue Vokabular effizienter (s. Abbildung 3), sondern wiesen auch bessere sprachliche Leistungen in ihrer Muttersprache auf (z.B. bei der Definition von Begriffen). Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Stärke der Hippokampusaktivität der sprachdominanten Hemisphäre beim Spracherwerb ein stabiler Marker für individuelle Unterschiede in der Leichtigkeit des Spracherwerbs ist.

Abb. 3: Hippokampusaktivität beim Vokabellernen mittels assoziativer Prinzipien



Oben: Im Schnittpunkt der beiden Geraden dargestellt ist das Aktivitätsmaximum im linken Hippokampus während des assoziativen Lernens neuer Vokabeln (dargestellt auf dem 'canonical SPM99 T1-template' für die drei Raumdimensionen axial – koronar - sagittal).

Unten: Je stärker die Hippokampusaktivität im Verlauf des Lernens aufrechterhalten wird (Y-Achse: BOLD Signal Änderung in % vom 1. zum 5. Block), desto besser fällt der Trainingserfolg im Vokabellernen (X-Achse) aus.

In der Literatur gibt es viele weitere Beispiele für den Wissenserwerb über assoziative Lernprinzipien. Neben dem Vokabellernen von Nomen (s.o.) und Verben (vgl. *Liuzzi* u.a. 2010) werden auch *Wortgrenzen* innerhalb eines Lautstroms (vgl. *Saffran/Aslin/Newport* 1996), die *Unterscheidung menschlicher Sprache* von Tierlauten (vgl. *Vouloumanos* u.a. 2009) sowie *grammatikalische Regeln* „en passant“ über statistische Kovariationen gelernt. Dies wurde gleichermaßen für wenige Monate alte Säuglinge (vgl. *Friederici/Mueller/Oberecker* 2011) und Vorschulkinder (vgl. *Kidd* 2012) wie für Erwachsene (vgl. *de Vries* u.a. 2010) gezeigt. Auch das Wissen über harmonische und disharmonische *Musiksequenzen* wird offenbar im Alltag beiläufig über statistische Kovariationen vermittelt, selbst bei musikalisch unversierten Personen (vgl. *Maess* u.a. 2001; *Loui* u.a. 2010).

Außerhalb der sprachlichen und musikalischen Domäne ist das Prinzip assoziativen Lernens auf das erfolgreiche Lernen von *Bewegungsfolgen* (vgl. *Hunt/Aslin* 2001), *visueller Sequenzen* (vgl. *Canfield/Haith* 1991; *Kirkham/Slemmer/Johnson* 2002) sowie *visueller Regeln* (vgl. *Younger/Cohen* 1983) und *sozialer Konventionen* (vgl. *Ruffman/Taoumpeau/Perkins* 2012) anwendbar.

4 Lernen braucht Bewegung

Die Steigerung von Lern- und Gedächtnisleistungen („Neuroenhancement“) ist gegenwärtig eines der am meisten diskutierten Themen in den Neurowissenschaften. Am wenigsten Eigenanstrengung im Hinblick auf effizientes Lernen verlangt es, für einen ausreichenden Nachtschlaf zwischen den Lernphasen zu sorgen. Neuere Untersuchungen zeigen, dass die langfristige Abspeicherung von Lerninhalten in das Gedächtnis während des Schlafs stattfindet und dass selektiver Schlafentzug entsprechend zu Gedächtniseinbußen führt (vgl. *Marshall/Born* 2007).

Durch die Kopplung assoziativer Lernansätze mit pharmakologischen Substanzen (wie d-Amphetamin oder Dopamin) konnte der Lernerfolg junger Erwachsener um bis zu 20 Prozent gesteigert werden (vgl. *Breitenstein* u.a. 2004b; *Knecht* u.a. 2004). Dies wirft die Frage auf, ob nicht die mit körperlicher Aktivität einhergehenden endogen ausgeschütteten Neurotransmitter (Adrenalin, Dopamin) zu einer vergleichbaren Verbesserung kognitiver Funktionen führen.

Regelmäßige körperliche Aktivität steigert nicht nur kardiovaskuläre Fitness, sondern fördert über direkte neuronale Mechanismen auch kognitive Leistungen (vgl. *Ratey/Loehr* 2011). Weniger bekannt ist bislang, inwieweit auch kurzzeitige sportliche Aktivität Konzentration und Lernen verbessern kann. Wissen um solche Zusammenhänge wäre u.a. für die Gestaltung von Schulunterricht hilfreich. In einer eigenen Studie der Verfasserin wurde untersucht, inwieweit unterschiedlich intensive Sportinterventionen (Joggen versus Sprints) einen Einfluss auf die anschließende Lern- und Behaltensleistung eines Miniatur-Vokabulars haben (vgl. *Winter* u.a. 2007). Dabei zeigte sich, dass nur ein kurzer Laufsprint von wenigen Minuten (und nicht ausdauerndes Joggen für 40 min) das Lernen neuer Vokabeln bei jungen männlichen Erwachsenen statistisch nachweisbar verbesserte. Der Grad der Lernverbesserung und die Langzeitbehaltensleistung nach einer Woche korrelierte mit dem bewegungsinduzierten Anstieg verschiedener Botenstoffe (Adrenalin, Dopamin) und dem Nervenwachstumsfaktor BDNF (s. Abschnitt zu neurowissenschaftlichen Grundlagen oben) im Blutplasma.

In einer Folgearbeit einer anderen Arbeitsgruppe konnte gezeigt werden, dass das Vokabellernen *während* gleichzeitigen Fahrradfahrens (auf einem „spinning“-Fahrrad) erfolgreicher war als Vokabellernen während passiven Sitzens (vgl. *Schmidt-Kassow* u.a. 2010). Zusammenfassend liegen somit erste wissenschaftliche Hinweise dafür vor, dass kurzzeitige intensive sportliche Interventionen zu einer Verbesserung von Lern- und Gedächtnisleistungen führen. Diese Erkenntnisse legen die Integration kurzer intensiver Bewegungseinheiten in den schulischen Alltag nahe.

5 Anwendungsmöglichkeiten assoziativer Lernprinzipien im Schulalltag

Die Ergebnisse der vorgestellten neurowissenschaftlichen Studien belegen unisono den Erfolg und die Nachhaltigkeit eines intensiven, auf assoziativen Lernprinzipien basierenden kognitiven Trainings unterschiedlicher Modalitäten (visuell, auditiv) sowie Domänen (Sprache, Musik, soziale Konventionen etc.). Für den Schulalltag ergeben sich darauf

folgende Implikationen: Hochfrequentes assoziatives Lernen ist höchst effektiv, und der Lernerfolg bleibt nachhaltig stabil. Zudem kann eine begleitende, nicht-pharmakologische Zusatzstrategie, wie kurzzeitige körperliche Aktivierung, den Lernerfolg statistisch nachweisbar steigern.

Wie können die in den Neurowissenschaften gewonnenen Lernprinzipien in den Schullalltag eingebettet werden? Hier bieten sich grundsätzlich zwei Strategien an: Zum einen können neurowissenschaftlich fundierte Strategien der Lernförderung im schulischen „setting“ wissenschaftlich evaluiert werden. Derzeit in Deutschland untersuchte konkrete Beispiele sind neurodidaktische Untersuchungen im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Schwerpunkts zur empirischen Bildungsforschung. Diese gehen beispielsweise der Frage nach, ob kurzzeitige sportliche Interventionen während des Unterrichts oder ob kurzzeitige Rekapitulationen der schulischen Lerninhalte (des Vormittags) vor dem Schlafengehen zu einer besseren Gedächtnisleistung dieser Inhalte im nachfolgenden Unterricht führen.

Zum anderen können verschiedene Unterrichtsmethoden (z.B. Frontalunterricht versus Gruppenarbeit) in gehirnbildgebenden Untersuchungen verglichen werden. Dies kann Aufschlüsse über die jeweils beteiligten Gehirnstrukturen und den Grad der neuronalen Effizienz (fokussierte versus diffuse Aktivität) der Verarbeitung geben. Zusätzlich können anhand der Gehirnaktivitätsmuster bildgebender Studien Erkenntnisse über interindividuelle Unterschiede in der Aufgabenbearbeitung gewonnen werden, z.B. unterschiedliche neurale Profile der Dyslexie (vgl. *Power* u.a. 2012). Dieses Wissen kann zukünftig die Entwicklung individuell angepasster Lehr- und Fördermaßnahmen im schulischen Alltag informieren.

Beide Strategien werden seit dem Jahr 2005 im Förderprogramm „Neurowissenschaften – Instruktion – Lernen (NIL)“ des Bundesministerium für Bildung und Forschung (derzeit in Phase 3) verfolgt. Neurowissenschaftliche Erkenntnisse zum Lernen sind darüber hinaus in wenigen Untersuchungen bereits auf schulische Szenarien übertragen und empirisch überprüft worden. Assoziatives Lernen benötigt häufige Wiederholungen von Ereigniskonstellationen in unterschiedlichen Kontexten. Dies kann am ehesten darüber erreicht werden, dass Wissensinhalte gleichzeitig fächerübergreifend vermittelt werden. Ein Beispiel ist die interdisziplinäre Einbettung von Kunst in den Chemieunterricht (vgl. *Danipog/Ferido* 2011). Weitere Eckpfeiler für die Implementierung assoziativer Lernprinzipien in den Schulalltag sind (a) die Anknüpfung neuer Lerninhalte an bereits vorhandene Assoziationen (z.B. durch die Verknüpfung von persönlichen Erfahrungen mit einem bestimmten Thema) und (b) die häufige Reaktivierung gelernter Informationen. Allgemein gilt, dass nach der initialen Lernphase das häufige Abrufen gelernter Inhalte effizienter ist als wiederholte Lernphasen (vgl. *Karpicke/Roediger III* 2008; *Karpicke/Blunt* 2011). Lernfördernde Effekte erzielen auch die multimodale, d.h. akustische sowie visuelle oder taktile, Vermittlung von Lerninhalten, z.B. in Form von Sach-Filmen, mit dem Ziel einer Ausweitung des beteiligten neuronalen Netzwerkes. Die Aktivierung des „internen Belohnungssystems“ (s. Abschnitt 1) durch humorvolle Comics oder andere unerwartete positive Überraschungen während einer Unterrichtseinheit sorgt ebenfalls für eine besonders stabile Gedächtnisverankerung zeitnah vermittelter Lerninhalte. Stressbehaftete Situationen hingegen, insbesondere sozialer Stress, führen nachweislich zu einer Verschlechterung kognitiver Leistungen (vgl. *Buwalda* u.a. 2005; *Schwabe* u.a. 2011).

Einige der neurowissenschaftlichen Erkenntnisse sind bereits in die Lehrerbildung in Deutschland eingeflossen. Dazu zählen insbesondere die von *Helmke* (2008) vorge-

stellten Merkmale „Angebotsvielfalt“ (multiple Verknüpfungsmöglichkeiten) sowie „Umgang mit Heterogenität“ (Berücksichtigung interindividueller Unterschiede bei der Unterrichtsmethode) bei der Beurteilung der Unterrichtsqualität im schulischen Kontext. Für den vorschulischen Bereich liegen zudem bereits erste empirische Ergebnisse vor, dass die spielerische hochfrequente Assoziation von Zahlen mit geometrischen Formen („Wohnort“), Mustern, Figuren usw. in dem Spiel „Komm mit ins Zahlenland“ zu besseren mathematischen Leistungen (Umgang mit Mengen, Zahlen, Ziffern) im Vergleich zu einer nicht geförderten Kontrollgruppe von Vorschulkindern beiträgt (vgl. *Pauen/Herber* 2009).

Die „Risiken“ der oben beschriebenen „neurowissenschaftlichen Interventionen“, insbesondere kurzzeitiger motorischer Aktivierungsphasen oder eine hohe Lernintensität mit vielen Wiederholungen innerhalb eines kurzen Zeitrahmens, sind so begrenzt, dass ein praktischer Einsatz im Schulunterricht bereits jetzt gerechtfertigt erscheint.

Danksagung

Diese Arbeit entstand mit Unterstützung des Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen: 01GY1144).

Anmerkung

- 1 In der Gedächtnistaxonomie von *Squire* (2004) wird nicht explizit auf diese Form des statistischen Lernens durch Reiz-Kovariationen eingegangen. Statistisches/assoziatives Lernen kann am ehesten den „non-deklarativen“ Formen des Lernens zugeordnet werden, insbesondere den „skills/ habits“ sowie dem „priming/perceptual learning“. In der Psychologie bezeichnet man häufig klassisches und operantes Konditionieren als Formen assoziativen Lernens. Bei Konditionierungsprozessen wird ein Zusammenhang zwischen einem Reiz und einer *Reaktion* hergestellt. Assoziatives Lernen wird in der vorliegenden Arbeit für die Verknüpfung zweier *Reize* (Stufe 1 des latent „S-S-learning“, vgl. *Rizley/Rescorla* 1972) verwendet.

Literatur

- Bliss, T. V. P./Lomo, T.* (1973): Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *J Physiol Lond*, 232, pp. 331-356.
- Bramham, C. R./Alme, M. N./Bittins, M./Kuipers, S. D./Nair, R. R./Pai, B./Panja, D./Schubert, M./Soule, J./Tiron, A./Wibrand, K.* (2010): The Arc of synaptic memory. *Exp Brain Res*, 200, pp. 125-140.
- Breitenstein, C./Jansen, A./Deppe, M./Foerster, A. F./Sommer, J./Wolbers, T./Knecht, S.* (2005): Hippocampus activity differentiates good from poor learners of a novel lexicon. *Neuroimage*, 25, pp. 958-968.
- Breitenstein, C./Kamping, S./Jansen, A./Schomacher, M./Knecht, S.* (2004a): Word learning can be achieved without feedback: Implications for aphasia therapy. *Restor Neurol Neurosci*, 22, pp. 445-458.
- Breitenstein, C./Knecht, S.* (2002): Development and validation of a language learning model for behavioral and functional-imaging studies. *J Neurosci Methods*, 114, pp. 173-179.
- Breitenstein, C./Knecht, S.* (2003): Spracherwerb und statistisches Lernen. *Nervenarzt*, 74, S. 133-143.
- Breitenstein, C./Korsukewitz, C./Floel, A./Kretschmar, T./Diederich, K./Knecht, S.* (2006): Tonic dopaminergic stimulation impairs associative learning in healthy subjects. *Neuropsychopharmacology*, 31, pp. 2552-2564.

- Breitenstein, C./Wailke, S./Bushuven, S./Kamping, S./Zwitserslood, P./Ringelstein, E. B./Knecht, S. (2004b): D-amphetamine boosts language learning independent of its cardiovascular and motor arousing effects. *Neuropsychopharmacology*, 29, pp. 1704-1714.
- Buwalda, B./Kole, M. H./Veenema, A. H./Huininga, M./de Boer, S. F./Korte, S. M./Koolhaas, J. M. (2005): Long-term effects of social stress on brain and behavior: a focus on hippocampal functioning. *Neurosci Biobehav Rev*, 29, pp. 83-97.
- Canfield, R. L./Haith, M. M. (1991): Young infants' visual expectations for symmetric and asymmetric stimulus sequences. *Dev Psychol*, 27, pp. 198-208.
- Danipog, D. L./Ferido, M. B. (2011): Using Art-Based Chemistry Activities To Improve Students' Conceptual Understanding in Chemistry. *J Chem Educ*, 88, pp. 1610-1615.
- de Vries, M. H./Barth, A. C./Maiworm, S./Knecht, S./Zwitserslood, P./Floel, A. (2010): Electrical stimulation of Broca's area enhances implicit learning of an artificial grammar. *J Cogn Neurosci*, 22, pp. 2427-2436.
- Dobel, C./Junghofer, M./Breitenstein, C./Klauke, B./Knecht, S./Pantev, C./Zwitserslood, P. (2009): New Names for Known Things: On the Association of Novel Word Forms with Existing Semantic Information. *J Cogn Neurosci*, 22, pp. 1251-61.
- Egan, M. F./Goldberg, T. E./Kolachana, B. S./Callicott, J. H./Mazzanti, C. M./Straub, R. E./Goldman, D./Weinberger, D. R. (2001): Effect of COMT Val108/158 Met genotype on frontal lobe function and risk for schizophrenia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 98, pp. 6917-6922.
- Egan, M. F./Kojima, M./Callicott, J. H./Goldberg, T. E./Kolachana, B. S./Bertolino, A./Zaitsev, E./Gold, B./Goldman, D./Dean, M./Lu, B./Weinberger, D. R. (2003): The BDNF val66met polymorphism affects activity-dependent secretion of BDNF and human memory and hippocampal function. *Cell*, 112, pp. 257-269.
- Esser, S. K./Huber, R./Massimini, M./Peterson, M. J./Ferrarelli, F./Tononi, G. (2006): A direct demonstration of cortical LTP in humans: a combined TMS/EEG study. *Brain Res Bull.*, 69, pp. 86-94.
- Fiorillo, C. D./Tobler, P. N./Schultz, W. (2003): Discrete coding of reward probability and uncertainty by dopamine neurons. *Science*, 299, pp. 1898-1902.
- Friederici, A. D./Mueller, J. L./Oberecker, R. (2011): Precursors to natural grammar learning: preliminary evidence from 4-month-old infants. *PLoS One*, 6, pp. e17920.
- Garagnani, M./Wennekers, T./Pulvermuller, F. (2009): Recruitment and Consolidation of Cell Assemblies for Words by Way of Hebbian Learning and Competition in a Multi-Layer Neural Network. *Cognit Comput*, 1, pp. 160-176.
- Gershkoff-Stowe, L. (2002): Object naming, vocabulary growth, and the development of word retrieval abilities. *J Mem Lang*, 46, pp. 665-687.
- Goldberg, T. E./Weinberger, D. R. (2004): Genes and the parsing of cognitive processes. *Trends Cogn Sci*, 8, pp. 325-335.
- Gopnik, A./Glymour, C./Sobel, D. M./Schulz, L. E./Kushnir, T./Danks, D. (2004): A theory of causal learning in children: causal maps and Bayes nets. *Psychol. Rev.*, 111, pp. 3-32.
- Hebb, D. O. (1949): *The organization of behavior: a neuropsychological theory.* – New York.
- Helmke, A. (2008): *Unterrichtsqualität. Erfassen, Bewerten, Verbessern.* – Kallmeyer.
- Hunt, R. H./Aslin, R. N. (2001): Statistical learning in a serial reaction time task: access to separable statistical cues by individual learners. *J Exp Psychol Gen*, 130, pp. 658-680.
- Jay, T. M. (2003): Dopamine: a potential substrate for synaptic plasticity and memory mechanisms. *Prog Neurobiol*, 69, pp. 375-390.
- Jenison, A./Squire, L. R. (2012): Working memory, long-term memory, and medial temporal lobe function. *Learn Mem*, 19, pp. 15-25.
- Kandel, E. R. (2001): The molecular biology of memory storage: a dialogue between genes and synapses. *Science*, 294, pp. 1030-1038.
- Karpicke, J. D./Blunt, J. R. (2011): Retrieval practice produces more learning than elaborative studying with concept mapping. *Science*, 331, pp. 772-775.
- Karpicke, J. D./Roediger III, H. L. (2008): The critical importance of retrieval for learning. *Science*, 319, pp. 966-968.
- Kelley, A. E. (2004): Memory and addiction: shared neural circuitry and molecular mechanisms. *Neuron*, 44, pp. 161-179.
- Kidd, E. (2012): Implicit statistical learning is directly associated with the acquisition of syntax. *Dev Psychol*, 48, pp. 171-184.

- Kim, R./Seitz, A./Feenstra, H./Shams, L. (2009): Testing assumptions of statistical learning: is it long-term and implicit? *Neurosci Lett*, 461, pp. 145-149.
- Kirkham, N. Z./Slemmer, J. A./Johnson, S. P. (2002): Visual statistical learning in infancy: evidence for a domain general learning mechanism. *Cognition*, 83, pp. B35-B42.
- Knecht, S./Breitenstein, C./Bushuven, S./Wailke, S./Kamping, S./Floel, A./Zwitserlood, P./Ringelstein, E. B. (2004): Levodopa: Faster and better word learning in normal humans. *Ann Neurol*, 56, pp. 20-26.
- Liuzzi, G./Freundlieb, N./Ridder, V./Hoppe, J./Heise, K./Zimerman, M./Dobel, C./Enriquez-Geppert, S./Gerloff, C./Zwitserlood, P./Hummel, F. C. (2010): The involvement of the left motor cortex in learning of a novel action word lexicon. *Curr Biol*, 20, pp. 1745-1751.
- Loui, P./Wessel, D. L./Hudson Kam, C. L. (2010): Humans Rapidly Learn Grammatical Structure in a New Musical Scale. *Music.Percept*, 27, pp. 377-388.
- Luscher, C./Nicoll, R. A./Malenka, R. C./Muller, D. (2000): Synaptic plasticity and dynamic modulation of the postsynaptic membrane. *Nat Neurosci*, 3, pp. 545-550.
- Maess, B./Koelsch, S./Gunter, T. C./Friederici, A. D. (2001): Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nat Neurosci*, 4, pp. 540-545.
- Marshall, L./Born, J. (2007): The contribution of sleep to hippocampus-dependent memory consolidation. *Trends Cogn Sci.*, 11, pp. 442-450.
- Menke, R./Meinzer, M./Kugel, H./Deppe, M./Baumgärtner, A./Schiffbauer, H./Thomas, M./Kramer, K./Lohmann, H./Floel, A./Knecht, S./Breitenstein, C. (2009): Imaging short- and long-term training success in chronic aphasia. *BMC Neurosci*, 10, pp. 118.
- Papassotiropoulos, A./Stephan, D. A./Huentelman, M. J./Hoernndli, F. J./Craig, D. W./Pearson, J. V./Huyh, K. D./Brunner, F./Corneveaux, J./Osborne, D./Wollmer, M. A./Aerni, A./Coluccia, D./Hanggi, J./Mondadori, C. R./Buchmann, A./Reiman, E. M./Caselli, R. J./Henke, K./de Quervain, D. J. (2006): Common Kibra alleles are associated with human memory performance. *Science*, 314, pp. 475-478.
- Pauen, S./Herber, V. (Hrsg.) (2009): *Offensive Bildung: vom Kleinsein zum Einstein.* – Stuttgart.
- Power, A. J./Mead, N./Barnes, L./Goswami, U. (2012): Neural entrainment to rhythmically presented auditory, visual, and audio-visual speech in children. *Front Psychol*, 3, pp. 216.
- Pulvermüller, F. (1999): Words in the brain's language. *Behav Brain Sci*, 22, pp. 253-279.
- Ratey, J. J./Loehr, J. E. (2011): The positive impact of physical activity on cognition during adulthood: a review of underlying mechanisms, evidence and recommendations. *Rev Neurosci*, 22, pp. 171-185.
- Rizley, R. C./Rescorla, R. A. (1972): Associations in second-order conditioning and sensory preconditioning. *J Comp Physiol Psychol*, 81, pp. 1-11.
- Rosenzweig, E. S./Barnes, C. A. (2003): Impact of aging on hippocampal function: plasticity, network dynamics, and cognition. *Prog.Neurobiol.*, 69, pp. 143-179.
- Ruffman, T./Taumoepeau, M./Perkins, C. (2012): Statistical learning as a basis for social understanding in children. *Br J Dev Psychol*, 30, pp. 87-104.
- Saffran, J. R./Aslin, R. N./Newport, E. L. (1996): Statistical learning by 8-month-old infants. *Science*, 274, pp. 1926-1928.
- Sagi, Y./Tavor, I./Hofstetter, S./Tzur-Moryosef, S./Blumenfeld-Katzir, T./Assaf, Y. (2012): Learning in the fast lane: new insights into neuroplasticity. *Neuron*, 73, pp. 1195-1203.
- Salin, P. A./Malenka, R. C./Nicoll, R. A. (1996): Cyclic AMP mediates a presynaptic form of LTP at cerebellar parallel fiber synapses. *Neuron*, 16, pp. 797-803.
- Schandry, R. (2003): *Biologische Psychologie.* – Weinheim.
- Schaper, K./Kolsch, H./Popp, J./Wagner, M./Jessen, F. (2008): KIBRA gene variants are associated with episodic memory in healthy elderly. *Neurobiol Aging*, 29, pp. 1123-1125.
- Schmidt-Kassow, M./Kulka, A./Gunter, T. C./Rothermich, K./Kotz, S. A. (2010): Exercising during learning improves vocabulary acquisition: behavioral and ERP evidence. *Neurosci Lett*, 482, pp. 40-44.
- Schultz, W. (2002): Getting formal with dopamine and reward. *Neuron*, 36, pp. 241-263.
- Schwabe, L./Joels, M./Roozendaal, B./Wolf, O. T./Oitzl, M. S. (2011): Stress effects on memory: An update and integration. *Neurosci Biobehav Rev*, 36, pp. 1740-9.
- Squire, L. R. (2004): Memory systems of the brain: a brief history and current perspective. *Neurobiol Learn Mem*, 82, pp. 171-177.
- Stough, S./Shobe, J. L./Carew, T. J. (2006): Intermediate-term processes in memory formation. *Curr Opin Neurobiol*, 16, pp. 672-678.

- Taub, E./Uswatte, G./Elbert, T.* (2002): New treatments in neurorehabilitation founded on basic research. *Nat Rev Neurosci*, 3, pp. 228-236.
- Tobler, P. N./Fiorillo, C. D./Schultz, W.* (2005): Adaptive coding of reward value by dopamine neurons. *Science*, 307, pp. 1642-1645.
- Tully, T./Bourtchouladze, R./Scott, R./Tallman, J.* (2003): Targeting the CREB pathway for memory enhancers. *Nat.Rev.Drug Discov.*, 2, pp. 267-277.
- Vermeer, A.* (2001): Breadth and depth of vocabulary in relation to L1/L2 acquisition and frequency of input. *Appl Psycholing*, 22, pp. 217-234.
- Vouloumanos, A./Druhen, M. J./Hauser, M. D./Huizink, A. T.* (2009): Five-month-old infants' identification of the sources of vocalizations. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.*, 106, pp. 18867-18872.
- Winter, B./Breitenstein, C./Mooren, F. C./Voelker, K./Fobker, M./Lechtermann, A./Krueger, K./Fromme, A./Korsukewitz, C./Floel, A./Knecht, S.* (2007): High impact running improves learning. *Neurobiol Learn Mem*, 87, pp. 597-609.
- Younger, B. A./Cohen, L. B.* (1983): Infant perception of correlations among attributes. *Child Dev*, 54, pp. 858-867.