

Entscheiden mit implizitem Wissen¹

Das Gehirn verfügt über viele Wissensformen. Für Geisteswissenschaftler ist es selbstverständlich, dass das Wissen bewusst zugänglich ist und in Sprache ausgedrückt wird (deklaratives bzw. explizites Wissen). Dies ist aber nur eine Wissensform. Eine Fülle von anderen Wissensformen wird als implizites Wissen bezeichnet, all jenes Wissen, das dem Menschen nicht bewusst zugänglich ist, über das auch Tiere verfügen und das unser Verhalten (inklusive unseres Denkens und unserer Emotionen) in hohem Maße bestimmt. Ich stelle hier die Frage: Was leistet das implizite Wissen und in welchem Bezug steht es zum expliziten Wissen? Wie ist es organisiert und wie steuert es Verhalten so, dass zwischen zwei oder mehreren Optionen entschieden wird? Auf welchen Ebenen der Kognition spielen sich Operationen an implizitem Wissen ab? Es wird sich herausstellen, dass es angemessen ist, Begriffe wie Planen, Wählen, Entscheiden nicht auf explizites Wissen zu beschränken. Dies ist für unser Nachdenken über die Naturgeschichte der Freiheit in zweierlei Hinsicht von eminenter Bedeutung. Einmal wird die Vorstellung korrigiert, dass nur bewusst werdende Vorgänge unsere Entscheidungen bestimmen. Zum anderen werden die bewusst werdenden Entscheidungen in eine Kontinuität neuronaler Vorgänge eingebettet, für die eine Dichotomie zwischen „freien“ bewussten Entscheidungen und „unfreien“ vorbewussten Entscheidungen wenig Sinn macht.

Um die Radikalität meines Ansatzes gleich zu Anfang deutlich zu machen: Meine Argumente werden mich dazu führen, die Differenzierung in implizites und explizites Wissen als eine vorübergehende, pragmatische und nicht grundsätzliche Unterscheidung von Wissensformen zu betrachten. Das hat weitreichende Folgen. So entfällt dann auch die häufig zitierte Unterscheidung zwischen leichten und schweren Problemen bei der Suche nach den Ursachen und Prozessen des Bewusstseins. Aller-

¹ Wiederabdruck des Beitrags von Randolph Menzel in Naturgeschichte der Freiheit, hrsg. von Jan-Christoph Heilinger, Berlin, New York 2007, S. 75–93.

dings werde ich ebenfalls aus pragmatischen Gründen statt von „dem bewusst werdenden Teil der Gehirnarbeit“ abgekürzt von „Ich“ reden.

Die Unterscheidung zwischen implizitem und explizitem (deklarativem) Wissen, die in der kognitiven Neurowissenschaft heute eine zentrale Rolle spielt, hat ihre Wurzeln im 19. Jahrhundert und begann mit der Einsicht von Johannes Müller, wonach für jede Erfahrung eine für das betreffende Sinnessystem spezifische neuronale Leitungsbahn zuständig ist (er nannte das die „spezifische Nervenenergie“). Sein Schüler Hermann von Helmholtz, der als erster die Leitgeschwindigkeit der Aktionspotentiale maß, erklärte für den Sehsinn, dass ein Großteil der geistigen Prozesse, die mit der visuellen Wahrnehmung und dem Handeln zusammenhängen, auf unbewusster Ebene stattfinden. Diesen Gedanken griff Sigmund Freud in seinen Traumdeutungen auf und machte ihn zur zentralen Prämisse seiner psychoanalytischen Theorie. Der englische Psychologe William James unterschied in seinem klassischen Lehrbuch *The Principles of Psychology* zwischen Gewohnheiten (unbewusstes, mechanisches, reflexhaftes Handeln) und Gedächtnis (bewusstes Handeln aus der Kenntnis der Vergangenheit) (James, 1981). In der Mitte des 20. Jahrhunderts führte der Philosoph Gilbert Ryle die Unterscheidung zwischen „Wissen wie“ (Kenntnis von Fertigkeiten) und „Wissen was“ (Kenntnis von Fakten und Ereignissen) ein (Ryle 1969). Für die heutige Begriffsbestimmung, wie sie in der Neurowissenschaft verwendet wird, ist die von Squire und Schacter vertretene Differenzierung bedeutsam, in der zwischen bewusst erlebtem Erinnern (explizites oder deklaratives Gedächtnis), das sich beim Menschen auf Orte, Objekte, Fakten und Ereignisse bezieht, und unbewusstem Erinnern (implizites oder prozedurales Gedächtnis), das Habituation, Sensitivierung, Konditionierung, Wahrnehmungs- und Bewegungsfertigkeiten umfasst, unterschieden wird (Squire 1987; Schacter 1999). Diese Begriffsbestimmungen wurden wesentlich geprägt durch Analysen neurologischer Patienten wie dem Patienten H. M. (Milner et al. 1998), bei denen die Bildung des bewusst werdenden Langzeitgedächtnisses in Folge einer Zerstörung des Hippocampus beeinträchtigt ist, aber das prozedurale Gedächtnis nicht gestört ist. Letzteres beruht auf Funktionen anderer Gehirnstrukturen wie zum Beispiel der Amygdala beim Furchtlernen oder dem Striatum und Kleinhirn beim motorischen Lernen. Auf der Grundlage solcher Struktur-Funktionsbeziehungen lässt sich dieses Begriffspaar auch auf Säugetiere (und über evolutive Argumente auf Vögel, Reptilien, Amphibien und Fische) anwenden.

Ich werde in meinem Beitrag unter implizitem Wissen all jene Wissensformen subsumieren, die beim Menschen unbewusst bleiben (oder wieder unbewusst werden, wie das bei vielen automatisierten Wahrnehmungs- und Bewegungsleistungen der Fall ist), und über die auch Tiere verfügen. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass ich mich zuerst in die Denkweise der Neurobiologie einklinken kann und die Frage

erst einmal offen lasse, ob es einen prinzipiellen Unterschied zwischen Handeln mit implizitem oder explizitem Wissen gibt. Ich werde am Ende meiner Ausführungen schließen, dass ich keine erkenntnistheoretisch begründbaren Argumente für eine solche Unterscheidung sehe. Die Begrifflichkeit erscheint mir ausschließlich pragmatischer Natur, so etwa wie in der Neurowissenschaft zwischen Willkürmotorik und nicht-willkürlicher Motorik unterschieden und dann gezeigt wird, dass damit auf die unterschiedliche Beteiligung von Gehirnarealen Bezug genommen wird. Das Gehirn mit seinem impliziten Wissen passt Verhalten an neue Bedingungen an, erwartet zukünftige Ereignisse und wählt Wahrnehmungs- und Handlungsweisen entsprechend den erwarteten Zuständen aus mehreren Optionen aus. Dabei lernt das implizite Wissenssystem (fügt also neues Wissen dem Gedächtnis zu), selektiert innere und äußere Zustände und entscheidet, ohne dass uns von all dem etwas bewusst wird. Hierbei verwende ich die Begriffe „Erwarten“, „Selektieren“, „Wählen“, „Entscheiden“ nicht im übertragenen oder metaphorischen Sinne, sondern genau so wie die Begriffe es in ihrer ursprünglichen Aussage ausdrücken: nämlich, dass da ein „Etwas“ ist (das sind natürlich Teile des Gehirns und ihre Verschaltungen), das die relevante Information gespeichert hat, diese situationsgerecht aufruft, über eine Ebene zur Verhandlung zwischen erwarteten und bewerteten Optionen verfügt und Wahrnehmungen wie auch Handlungen steuert. Im Verlaufe meines Beitrages wird deutlich werden, warum es mir gerechtfertigt erscheint, diese Begriffe ohne Einschränkung auf das implizite Wissen anzuwenden. Ich werde am Schluss auf diese Frage nochmals eingehen.

1 Informationsquellen des impliziten Wissens

Stellen Sie sich folgende Situation vor: Sie gehen eine Treppe hinunter, plötzlich erschrecken Sie, weil Sie ins Leere treten. Viel später als Ihr Körper (Gehirn, Muskel), der dem drohenden Stolpern und Hinfallen entgegengewirkt hat, wird Ihnen bewusst, dass „Sie“ keine weitere Treppenstufe erwartet hatten, dass da aber eine war und „Sie“ deshalb fast gestürzt wären, hätten „Sie“ nicht eine geschickte und schnelle Ausweichbewegung gemacht. Allerdings wird Ihnen das erst bewusst, nachdem der ganze Vorgang längst abgelaufen ist und der Schrecken Ihnen in die Glieder gefahren ist. Ihr bewusstes „Ich“ war an dem ganzen Vorgang nicht beteiligt, weder beim Erwarten der weiteren Stufe noch bei den schnellen Ausweichbewegungen. Erst der Schrecken und der Rückblick auf das gerade Geschehene werden Ihnen bewusst.² Wo kam also die Information über die Erwartung der weiteren Treppenstufe

² An dieser Stelle möchte ich das gerade Gesagte in der unpraktischen Formulierungsweise wiederholen, weil sie zutreffender wäre: Der Körper und sein Gehirn gehen eine Treppe

her und was hat die schnellen Bewegungen gesteuert? Natürlich war es Ihr Nervensystem, das aufgrund vorangegangener Lernerfahrungen all die komplexen Vorgänge beim Treppensteigen erlernte und die entsprechenden Prädiktionen für die nächsten Bewegungsabfolgen und Sinneserfahrungen erzeugte. Auch die schnellen Ausweichbewegungen hat Ihr Nervensystem mit rasanter Geschwindigkeit und zum Vorteil für Ihre Knochen generiert.

Verhaltensbiologen haben in den letzten 150 Jahren Begriffssysteme entwickelt, mit denen die Quellen der Information, die für die Verhaltenssteuerung eingesetzt werden, erfasst werden. Ethologen betonen die angeborenen Verhaltensweisen, die Auslösemechanismen, die unbedingten Reflexe, die rhythmischen Koordinationen, die genetische/phylogenetische Vorbereitung von Lernvorgängen und die Spontaneität der Verhaltensgenerierung nach inneren Bedürfnissen. All diese Quellen der Information können wir als das „phylogenetische Gedächtnis“ zusammenfassen, jenes Gedächtnis, das im Verlaufe der Evolution der Spezies zukommt und das Gehirn mit Information ausstattet bevor individuelles Lernen einsetzt, und das auch Anweisungen enthält, wie und was gelernt werden kann. Pavlov in Russland und die experimentellen Psychologen in Amerika (erst Thorndike, dann Skinner, Hull und andere) betonten den Informationsgewinn durch assoziatives Lernen. Stimuli und eigene Verhaltensweisen werden durch diesen Vorgang mit prädikativer Stärke ausgestattet, die von der Kontiguität (der zeitlichen Paarung der Ereignisse) und der Kontingenz (der Wahrscheinlichkeit ihrer Paarung) abhängt. Damit dieses „Individualgedächtnis“ erweitert werden kann, bedarf es einer Abweichung von der Erwartung: Nur das, was nicht bereits sicher erwartet wird (vom Individualgedächtnis sicher vorhergesagt wird), wird gelernt (Rescorla & Wagner 1972). Diese *Differenzregel* stellt die Grundlage für außerordentlich starke Theorien der Verhaltensgenerierung dar, die zunehmend mit neuronalen Mechanismen untermauert werden (Schultz 2006). Grundlage dieser Theorien ist die Annahme, dass jede Verhaltensweise mit Bezug auf den erwarteten Effekt generiert wird, also vor ihrer motorischen Verwirklichung „innerlich verhandelt“ wird. Bei einfachen Handlungsabläufen ist dies ein

hinunter, plötzlich erschrickt der bewusst werdende Teil des Gehirns, weil der Körper ins Leere getreten ist. Die Diskrepanz zwischen Erwartungszustand des Gehirns und tatsächlichem Zustand der Welt wurde von dem nicht bewusst machenden Teil des Gehirns schnell reguliert, der Körper wurde am Abstürzen mit einer schnellen Ausweichbewegung gehindert und erst viel später hat der bewusst machende Teil des Gehirns die unzutreffende Vorhersage des nicht bewusst machenden Gehirns als Schrecken registriert. Es ist offenkundig, warum wir mit dem jetzigen Kenntnisstand der Neurowissenschaften und der Art der sprachlichen Mitteilung die pragmatische Formulierung mit Bezug auf ein „Ich“ wählen.

neuronales Signal, das als Efferenzkopie (eine Kopie derjenigen neuronalen Erregungsmuster, die an den motorischen Apparat geschickt werden) die zu erwartende sensorische Konstellation *nach* Ausführen der Handlung bereits enthält, vom zentralen Nervensystem generiert wird und an neuronale Instanzen geschickt wird, in denen es mit den später sich tatsächlich einstellenden sensorischen Rückmeldungen verglichen wird. Für komplexere Verhaltensweisen ist die Ebene der „inneren Verhandlung“ das Arbeitsgedächtnis, auf das ich unten eingehe.

„Inneres Verhandeln“ auf der impliziten Ebene spielt auch bei der spontanen Generierung von Verhaltensweisen eine Rolle. Die Konzepte der experimentellen Psychologen der amerikanischen Schule sind letztlich daran gescheitert, dass sie die Spontaneität der Verhaltensgenerierung durch das Nervensystem ignorierten oder unterbewerteten. Gehirne produzieren sinnvolle Verhaltensweisen auch ohne äußere Auslöser, mögen dies so einfache Bewegungsabfolgen wie rhythmische motorische Muster, erhöhte Sensibilität für bestimmte sensorische Eingänge oder gerichtete Aufmerksamkeit sein. Hier soll nicht der Frage nachgegangen werden, welche Ursachen diese Spontaneität des Gehirns hat, obwohl dies eine spannende Thematik wäre und sich zeigen ließe, dass es keinen Grund gibt, vom „radikalen Physikalismus“, wie ihn Alfred Gierer in seinem Beitrag im Humanprojekt vertreten hat, abzuweichen. Entscheidend für unsere Argumentation ist, dass solche spontanen Aktionen und Wahrnehmungseinstellungen jeweils der aktuellen inneren wie äußeren Situation des Menschen/Tieres angemessen sind, dass also auch diese „innerlich verhandelt“ werden bevor sie sich auswirken und dass sie durch Vergleich zwischen Erwartung aufgrund des vom Nervensystem generierten Signals und den Rückmeldungen aus Umwelt und Körper angepasst werden.

Zwei Prinzipien wirken zusammen, um sinnvolles und eindeutiges Verhalten und Wahrnehmung zu erzeugen, das oben genannte Prinzip der Efferenzkopie und das der lateralen Hemmung, auf beide werde ich noch eingehen. Im hungrigen Zustand zum Beispiel werden Erwartungsbilder (-gerüche, -töne) für die Ernährung vom Gehirn generiert, diese werden dann besonders sensibel und differenzierend wahrgenommen und von anderen Eindrücken durch spezifische Hemmung hervorgehoben. Andere Wahrnehmungs- und Verhaltensoptionen werden durch laterale Hemmung unterdrückt. Diese Mechanismen sind zielorientiert, enthalten also Informationen über die erwarteten Umweltereignisse, werden vom Gehirn als Prädiktionen zukünftiger Ereignisse erzeugt, und alle Abweichungen in der Umwelt werden durch Differenzbildung zur Efferenzkopie selektiv verstärkt.

2 Wie wird mit implizitem Wissen entschieden: Die Rolle des Arbeitsgedächtnisses

Oben habe ich zwischen phylogenetischem und individuellem Gedächtnis unterschieden. Für die neuronalen Mechanismen der Informationsspeicherung ist diese Differenzierung nicht bedeutsam. Für die Verhaltenssteuerung über implizites Wissen ist es eher nebensächlich, ob die Inhalte des Gedächtnisses mehr oder weniger aus dem phylogenetischen oder individuellen Gedächtnis stammen, da die neuronalen Mechanismen, die für die Speicherung und Nutzung im Nervensystem von Bedeutung sind, sich, nach all dem, was wir wissen, nicht grundlegend unterscheiden. Im obigen Beispiel der unerwarteten Stufe stammt die Erwartung aus dem Individualgedächtnis, während die schnellen Schutzreaktionen überwiegend mit Informationen aus dem phylogenetischen Gedächtnis gesteuert werden. Was uns von all dem im Nachhinein bewusst wird, hängt nicht davon ab, aus welcher Informationsquelle die Reaktionen gesteuert wurden (allerdings wird es Bereiche des phylogenetischen Gedächtnisses und des frühkindlichen, erworbenen Gedächtnisses geben, die uns nicht bewusst zugänglich sind, ebenjene, die Sigmund Freud so nachhaltig beschäftigt haben). Ich werde daher im Weiteren von „dem“ Gedächtnis sprechen und darunter einen Informationsspeicher verstehen, der sich aus phylogenetisch und individuell erworbener Information speist.

Das Gedächtnis ist keine einheitliche Funktion und hat keinen einzelnen Ort im Gehirn. Vielmehr stellt es eine dynamische Eigenschaft des Nervensystems dar. Für unsere Gedankengänge sind folgende Eigenschaften bedeutsam: (1) Gedächtnis entsteht durch Lernvorgänge, in die phylogenetisches Gedächtnis mit eingeht (nicht alles kann gelernt werden; bestimmte Lernvorgänge führen schnell, andere nur sehr langsam zur Gedächtnisbildung, in manchen Entwicklungsphasen kann ein Gedächtnis rasch und effektiv gebildet werden, in anderen nicht). (2) Die Gedächtnisbildung ist ein dynamischer Vorgang, in dem sich die selbstorganisierende Funktion des Nervensystems ausdrückt. Dies spiegelt sich in der zeitlichen Aufeinanderfolge von Kurz-, Mittel- und Langzeitgedächtnis wider, denen verschiedene physiologische Mechanismen und unterschiedliche Orte im Gehirn zukommen, und während deren die Gedächtnisinhalte sowohl hinsichtlich ihrer Stabilität wie auch hinsichtlich ihrer Inhalte verändert werden. (3) Gedächtnisinhalte sind im Gehirn örtlich verteilt, wobei vor allem solche Lokalisationen in unserem Zusammenhang von Interesse sind, die sich auf abgeleitete, nicht direkt mit sensorisch-motorischen Leistungen zusammenhängende Eigenschaften beziehen. Ein Beispiel hierfür wäre die Rolle des Hippocampus beim Menschen für die Bildung (nicht aber die langzeitige Speicherung) von deklarativem (explizitem) Gedächtnis. (4) Für das Aufrufen aus dem Langzeit-

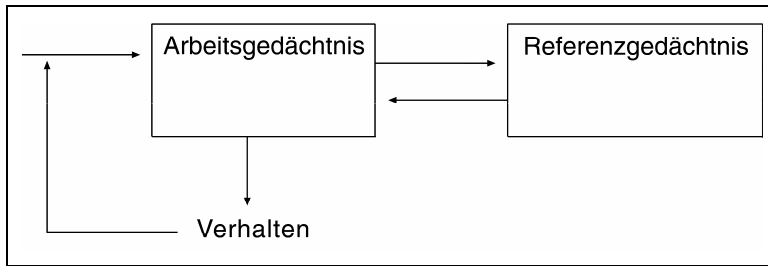


Abbildung 1
Schema der Verknüpfung des Arbeitsgedächtnisses mit dem Referenzgedächtnis der Außenwelt.

speicher, den Vergleich mit der aktuellen äußeren und körpereigenen Situation und das „Verhandeln“ von zielgerichteten Optionen ist das Arbeitsgedächtnis zuständig. Dem Arbeitsgedächtnis kommen folgende Funktionen zu (Abb. 1): (1) Vorübergehender Speicher mit begrenzter Kapazität (Kurzzeitgedächtnis); (2) Wechselseitige Kommunikation mit dem Referenzgedächtnis (Langzeitgedächtnis), wobei relevante Inhalte aus dem Referenzgedächtnis aufgerufen werden und solche aus dem Arbeitsgedächtnis ins Referenzgedächtnis übergeführt werden; (3) „Inneres Verhandeln“ durch Produzieren von Verhaltensoptionen, die „innerlich“, das heißt auf der Ebene des Arbeitsgedächtnisses ausgeführt werden, und deren erwartete Folgen mit den Zielvorgaben verglichen werden; (4) Entscheiden nach wenigen oder vielen Iterationen des „inneren Verhandeln“.

Auf der Verhaltensebene werden die Funktionen des Arbeitsgedächtnisses durch eine Reihe standardisierter Tests untersucht, zu denen etwa das Vergleichslernen (matching-to-sample, MTS bzw. matching-to-non-sample MTNS), der sternförmige Irrgarten und der serielle Positionstest gehören. In all diesen Tests merkt sich ein Tier oder ein Mensch einen Stimulus oder ein Verhalten für einige Zeit und richtet sein folgendes Verhalten nach einer entsprechenden Regel aus. Beim MTS Test besteht die Regel etwa darin, dass derselbe Stimulus zu wählen ist, beim MTNS muss gerade ein verschiedener Stimulus gewählt werden; im sternförmigen Irrgarten gilt die Regel, nicht wieder den bereits gewählten Arm erneut zu wählen. Im seriellen Positionstest drückt sich das Arbeitsgedächtnis darin aus, dass beispielsweise in Wortlisten oder in Bilderfolgen die jeweils ersten und letzten Items besonders gut erinnert werden. Das Arbeitsgedächtnis ist also nicht nur ein zeitlich begrenzter Speicher, sondern enthält auch Regeln, nach denen Entscheidungen an den Inhalten getroffen werden sollen. Dass die Regeln, nach denen das Arbeitsgedächtnis seine Entscheidungen an Inhalten fällt, die sprachlich zugänglich sind, nicht bewusst werden müssen, wird zum Beispiel mit folgender Beobachtung belegt: Versuchspersonen werden lange Listen von Buchstaben gezeigt (etwa H D S S O H D F S S A H D...), wobei nach einiger Zeit gefragt wird, welcher Buchstabe einem anderen folgt. Die Versuchs-

personen geben an zu raten und erkennen keinerlei Struktur in der Buchstabenfolge, nennen aber solche Buchstabenfolgen häufiger, die einer Regel unterliegen (im obigen Beispiel, dass auf H ein D folgt, dass auf S ein Vokal folgt und dass Vokalen stets ein H folgt). Das Arbeitsgedächtnis wendet also implizit Regeln an, nach denen seine Operationen verlaufen.

Die begrenzte Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses wird durch die berühmte 7 ± 2 Formel von Inhalten (items) charakterisiert. Bereits 1890 wurde die „Intelligenz“ von Schülern von einem Londoner Lehrer mit dem so genannten „digit span test“ untersucht, wobei die Aufgabe darin bestand, vorher genannte Zahlenreihen rückwärts zu wiederholen. Dabei erreichten „intelligente“ Schüler eine digit span von 6–7 (Baddeley 1986). Heute weiß man, dass die so gemessene Kapazität des Arbeitsgedächtnisses von der Komplexität der zu merkenden Objekte abhängt (etwa bei Sehobjekten) und dass verschiedene Gehirnregionen für abstrakte Objekte, wie Zahlen, und konkrete Objekte, wie Sehobjekte, zuständig sind.

Baddeley und Hitch schlugen 1974 eine Struktur des Arbeitsgedächtnisses vor, die sie aus Beobachtungen und Messungen von sprachlichem und visuellem Lernen beim Menschen ableiteten (Baddeley & Hitch 1974) (Abb. 2).

Im Zentrum steht ihre Annahme, dass das Arbeitsgedächtnis Substrukturen aufweist und dass diese in rückgekoppelter Weise miteinander verknüpft sind. Diese Rückkopplungsschleifen können über die Außenwelt laufen (äußeres Handeln) oder auf die „Innenwelt“ des Gehirns beschränkt sein („inneres Handeln“). Letztere Schleifen dienen in ihrem Modell den drei zentralen Funktionen des Arbeitsgedächtnisses, der Prädiktion, der Selektion und der Entscheidung.

Für diese zentralen Funktionen des Arbeitsgedächtnisses lassen sich korrespondierende neuronale Mechanismen angeben, die auf einer elementaren Ebene als ursächlich für die damit beschriebenen Leistungen betrachtet werden können. Hierauf will ich im Folgenden kurz eingehen.

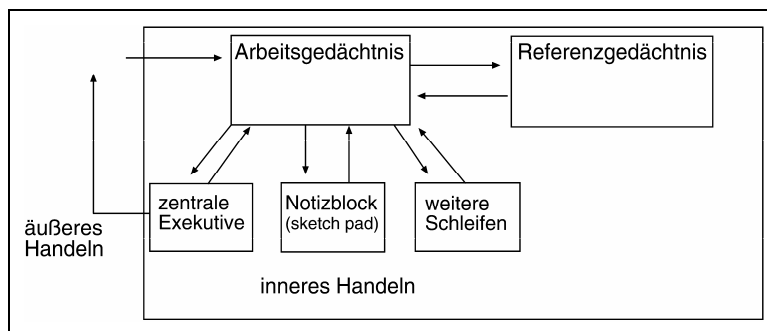


Abbildung 2
Schema der Vernetzung des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley & Hitch (1974).

Prädiktion: Wie bereits oben betont, nimmt jedes neuronale Kommando zum Handeln bereits die Folgen des Handelns vorweg (Efferenzkopie), ein Ausdruck des impliziten Erwartens der Folgen. Die Neurowissenschaft kennt eine riesige Anzahl von Beispielen. Ich will hier noch ein im Anschluss an Helmholtz besonders detailreich untersuchtes Beispiel nennen. Wenn Tiere und Menschen eine Augenbewegung (Sakkade) durchführen, dann erscheint ein Gegenstand anschließend auf einer anderen Stelle der Retina und damit in einem anderen räumlichen Bezug zu dem visuellen Referenzsystem im Auge und Gehirn. Das Kommando, das die Sakkade auslöst, verstellt gleichzeitig die Raumwahrnehmung so, dass sie der erwarteten Raumverschiebung entspricht. Diese Verstellung der Raumwahrnehmung lässt sich bis auf die Ebene der rezeptiven Felder in der primären visuellen Cortex-Region verfolgen, in der nun die Position der rezeptiven Felder so verschoben wird, dass sie der erwarteten nach der durchgeführten Augenbewegung entspricht (Sundberg et al. 2006). Ich habe dieses Beispiel gewählt, weil man den Effekt im Selbstversuch gut feststellen kann: Bei leichtem seitlichen Druck auf Ihren Augapfel fehlt diese Efferenzkopie und die Welt bewegt sich, die neuronale Raumverstellung wird also nicht prospektiv eingestellt. Ein weiterer Grund für die Wahl dieses Beispiels ist, dass Helmholtz dieses Phänomen als Ausgangspunkt für seine oben zitierte Schlussfolgerung von der Fülle der nicht bewusst werdenden Vorgänge im Gehirn nahm. Der Efferenzkopie-Architektur kann man eine sehr wichtige Rolle bei der Identifikation des Gehirns mit seinem Körper, also der Generierung eines „Ichs“, zuschreiben. Diese Architektur führt notwendigerweise zu einer Klassifizierung von Signalen als entweder extern oder intern generiert und liefert damit die Grundlage, eine innere Verursachung („Agency“) zu vermuten. Gäbe es nämlich keine Efferenzkopie-Architektur, gäbe es auch keine Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen „Selbst“ und dessen Taten, und keine zwischen der Welt und ihren Ereignissen.

Selektion: Wenn zwei oder mehrere Handlungs- oder Wahrnehmungsoptionen durch Aufrufen aus dem Referenzgedächtnis ähnlich wahrscheinlich sind, dann muss eine Selektion erfolgen. Das elementare Schaltprinzip wurde bereits genannt, die laterale Inhibition. Ich will wieder nur ein Beispiel geben, das ebenfalls auf der neuronalen Ebene beim Tier sehr genau untersucht wurde. In unserer Wahrnehmung ist dies das Phänomen der Kippbilder. Sie kennen das Bild einer Vase, deren Konturen auch als zwei gegenüberstehende Gesichter wahrgenommen werden können. Diese beiden Wahrnehmungen treten nie gemeinsam auf, sondern kippen von dem einen in den anderen Zustand, bei längerem Hinsehen häufig in einem regelmäßigen Rhythmus. Vergleichbare Phänomene ließen sich aus dem motorischen Bereich anführen, wenn es also darum geht, zwischen zwei möglichen Bewegungsabfolgen eine auszuwählen. Die neuronale Implementierung der lateralen Inhibition lässt sich auf der Ebene der einzelnen Neurone, der Netzwerke von Neuronen und der Verschaltung zwischen

Arealen des Gehirns verfolgen. Es handelt sich demnach um ein universelles Prinzip mit dem im Nervensystem Eindeutigkeit erzeugt wird, eine Eindeutigkeit, die grundlegend wichtig für die Verhaltenssteuerung ist, kann doch zu jedem gegebenen Zeitpunkt nur eines getan werden. Die so erzielte Eindeutigkeit ist bei nahe beieinander liegenden Optionen häufig mit einem rhythmischen Wechsel zwischen diesen Optionen verbunden, eine Eigenschaft, die weiter unten nochmals von Bedeutung sein wird.

Entscheiden: Voraussetzung für eine Entscheidung ist die Wahl zwischen zwei oder mehreren Optionen und ein Prüfen der Folgen dieser Wahl ohne ein äußeres Handeln im Sinne eines Ausprobierens. Aus dem oben Gesagten wird ersichtlich, dass dem Arbeitsgedächtnis bei nahe beieinanderliegenden Optionen ein zeitlicher Wechsel in der neuronalen Aktualität der Optionen zur Verfügung steht, wie uns dies etwa bei den Kippbildern in der Wahrnehmung zugänglich wird. Entscheiden besteht nun auf der neuronalen Ebene des Arbeitsgedächtnisses darin, dass die nacheinander aktivierten Optionen die für sie relevanten Handlungsabfolgen so auslösen, dass nur die Efferenzkopie entsteht, nicht aber das motorische Muster ausgeführt wird. Die Efferenzkopie wird nun mit den Erwartungen verglichen, die aus dem Referenzgedächtnis aufgerufen werden, wobei das Referenzgedächtnis die Funktion der (inneren) Wirklichkeit übernimmt. Dieser Vergleich führt nun zu einer spezifischen Aktivierung, und das tatsächliche Ausführen einer der Optionen wird mehr oder weniger wahrscheinlich. Welche Hinweise für solch ein inneres Verhandeln an impliziten Inhalten auf der Ebene des Arbeitsgedächtnisses gibt es? In der Neurowissenschaft wurde eine Reihe von Paradigmen experimentell überprüft, die einen Hinweis auf neuronale Korrelate des nicht bewussten Entscheidens an Optionen geben. Eine lezenswerte Zusammenstellung findet man bei Smith-Churchland (Smith-Churchland 2002, S. 142–156). Ein weiteres Beispiel sind die von Rizzolatti gefundenen Spiegelneurone. Vielleicht ist Ihnen schon einmal aufgefallen, dass zwei Gesprächspartner häufig die gleiche Körperhaltung einnehmen (Arme verschränken, Hände in die Hosentaschen, etc.). Im inferioren parietalen Lobus (IPL), einem Bereich des prämotorischen Kortex, wurden von Rizzolatti Neurone im Affengehirn (und neuerdings mit fMRI auch im menschlichen Gehirn) entdeckt, die er als Spiegelneurone bezeichnete. Sie sind für die gleichen Arm-Hand-Bewegungen zuständig, ob nun diese Bewegung von dem Tier ausgeführt werden oder ob das Tier diese bei einem anderen Tier (oder beim Menschen) beobachtet (Rizzolatti & Craighero 2004). Diese Neurone erhalten ihre Eingänge von visuellen Neuronen im superioren temporalen Sulkus (STS) und senden eine Efferenzkopie für geplante Aktionen zurück zu den STS Neuronen, wo sie mit der erwarteten Bewegung verglichen werden (Iacoboni, 2005), sie stellen also neuronale Implementierungen von Entscheidungsstrukturen dar. Auch wenn die Bewegungen nicht ausgeführt werden, sind sie aktiv und stellen Optionen

für Handlungen im sozialen Kontext zur Verfügung. Subjektiv zugänglich ist uns der Vorgang des Entscheidens an impliziten Entscheidungsvorgängen bei dem Phänomen des Namensuchens. Ihnen fällt ein Name oder Begriff nicht ein. Sie sagen vielleicht, 'das blockiere ich gerade', geben die Suche auf, und nach einer gewissen Zeit stellt sich der Name oder Begriff wie von selbst ein, wenn Sie gerade nicht daran denken oder bewusst danach suchen. Der Suchvorgang war also kein bewusster und hat sich in ihrem Arbeitsgedächtnis „automatisch“ abgespielt.

3 Die globale Struktur des Arbeitsgedächtnisses

Die bisher genannten Teilfunktionen des Arbeitsgedächtnisses wurden in einem Schema zusammengefasst, in dem den Teilfunktionen bestimmte Gehirnareale des Säuger- und Menschengehirns zugeordnet werden (Abb. 3).

Zwei Schaltkreise sind für zwei Aspekte des Arbeitsgedächtnisses, seine eher starren und seine hoch flexiblen Eigenschaften, zuständig: (1) Die „modellfreien Systeme“, bei denen die Funktion des Auslesens aus dem Referenzgedächtnis (mit seinen phylogenetisch *und* individuell erworbenen Inhalten) im Vordergrund steht. Diese werden zum Beispiel von den Basalganglien (etwa dem Belohnungssystem im ventralen Tegmentum mit seinen Dopamin-Neuronen) dominiert. (2) Die „modellbasier-

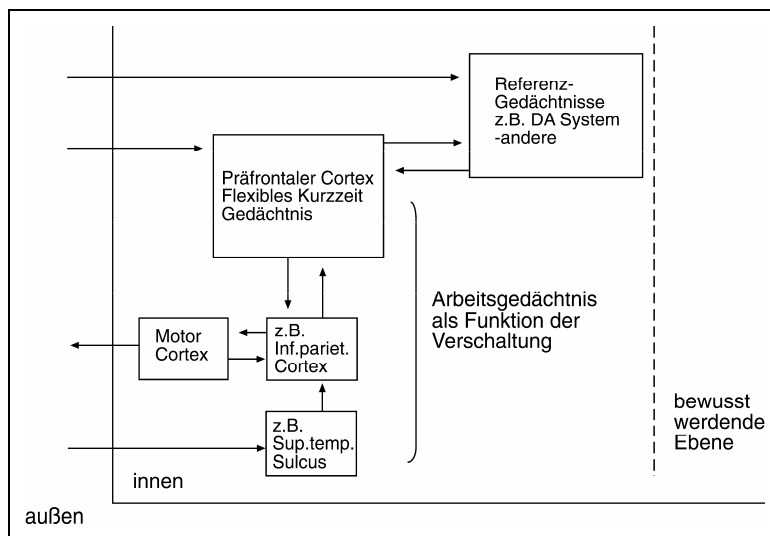


Abbildung 3 Die globale Struktur des Arbeitsgedächtnisses. Abkürzungen: DA: System der Dopamin-Neurone im ventralen Tegmentum; Inf. Priet.: Inferiorer parientaler frontaler Cortex; Sup. temp.: Superiorer temporaler Sulkus.

ten Systeme“ im präfrontalen Cortex mit ihrem flexiblen Umgang mit nur kurze Zeit zurückliegenden Ereignissen. In beiden Systemarten ergeben sich die Funktionen des Arbeitsgedächtnisses aus den Verschaltungen insbesondere über die rekurrenten Schleifen zwischen den Gehirnarealen (Abb. 3). Die Dopamin-Neurone des ventralen Tegmentums passen sich zum Beispiel nach der Differenzregel für Lernen (s. o.) an, integrieren über längere Zeit und stellen so ein Referenzgedächtnis für die erwartete Belohnung einer geplanten Aktion dar (Daw et al. 2005). Der präfrontale Cortex speichert kürzlich erfahrene Signal-Bewertungszusammenhänge in Form von anhaltenden, hochspezifischen neuronalen Erregungen (Wang et al. 2006; Fransen et al. 2006). Diese neuronale Aktivität wird als das Substrat für zielgerichtete Lernvorgänge betrachtet, bei denen ein „inneres Modell“ dem Lernvorgang zugrunde liegt. Die rekurrenten Schleifen werden als das Substrat für die Abschätzung der Sicherheit der Vorhersage angesehen. Je sicherer die Vorhersage, je mehr also die einzelnen Instanzen in ihren Prädiktionen übereinstimmen, desto rascher und mit höherer Wahrscheinlichkeit wird entschieden und die Aktion ausgeführt. Je widersprüchlicher die jeweiligen Meldungen sind, umso langsamer wird entschieden und umso unterschiedlicher fallen wiederholte Entscheidungen aus (Dehaene et al. 1998).

Alle diese Überlegungen gelten für implizites Wissen. Wie wird nun die Verbindung zum expliziten Wissen hergestellt? In Abbildung 3 markiert die gestrichelte vertikale Linie auf der rechten Seite den Kontakt zur bewusst werdenden Ebene, ein Übergang, der noch weitgehend unbekannt ist. Ralph Schumacher³ beleuchtet dieses Problemfeld von psychologischer Seite und betrachtet hierbei besonders die Rolle der Aufmerksamkeit für den Übergang von nicht bewusst werdenden und bewusst werdenden Vorgängen. Ich will hier nur auf zwei Aspekte hinweisen. (1) In Verhaltensanalysen lässt sich zeigen, dass bei einem stärkeren Priming (also dem unbewussten Wiedererkennen beispielsweise von vorher gezeigten Bildern oder Abfolgen von Zahlen wie in dem oben angegebenen Beispiel) auch das bewusste Erinnern an die Testobjekte stärker ist. Daraus kann man schließen, dass die implizite Ebene des Arbeitsgedächtnisses die explizite antreibt. (2) Die besondere Rolle des Hippocampus beim Menschen für den Übergang von der impliziten auf die explizite Ebene wird auch durch fMRI Studien belegt, die zeigen, dass Bilder, die eine stärkere Aktivierung einer für Sehobjekte zuständigen Region des Hippocampus beim Lernen von Bildfolgen auslösen, später besser bewusst erinnert werden. Daraus kann man ebenfalls schließen, dass sich die Stärke des impliziten Wissens auf das explizite auswirkt, möglicherweise im Sinne einer Schwellenfunktion. Die impliziten Funktionen des Arbeitsgedächtnisses sind aber von denen des expliziten Arbeitsgedächtnisses unabhängig.

³ In seinem Vortrag im Rahmen der AG *Humanprojekt* am 16. Mai 2006.

4 Ebenen der Kognition mit implizitem Wissen

Nun könnte eingewandt werden, dass all diese Funktionen des impliziten Verhandeln von Wissen elementare Formen der Kognition betreffen, so dass die hier vorgetragene Argumente nicht wirklich für die dem Menschen explizit zugänglichen Gehirnvorgänge relevant sind. Um sich dieser Frage zu nähern, kann man verschiedene Forschungsstrategien anwenden. Auf eine habe ich bereits am Ende des vorigen Abschnitts hingewiesen: Man sucht nach Korrelaten für implizites Verhandeln im Arbeitsgedächtnis (Priming, fMRI Studien) und fragt dann, wie diese mit den bewusst werdenden Vorgänge zusammenhängen. Oder man betrachtet die Zeitebene etwa so wie dies in den berühmten Experimenten von Libet geschieht (Libet 1990), bei denen sich ergibt, dass ein elektrophysiologisch messbares Ereignis der bewusst werdenden Entscheidung vorangeht. Oder man betrachtet die neuronalen Bedingungen, die eine bewusst werdende Leistung verhindern, so wie dies Crick und Koch mit dem Paradigma der binokularen Konkurrenz getan haben (Crick & Koch 2005). Hierbei werden den beiden Sehfeldern unserer Augen zwei verschiedene Sehobjekte gezeigt (z. B. horizontale und vertikale Streifen). Wir können unsere Aufmerksamkeit bewusst auf das eine oder andere Bild lenken. Hierbei stellt sich mit fMRI heraus, dass die frontale und parietale Cortexregion in besonderer Weise beteiligt ist (Lumer et al. 1998). Menschen mit einer Schädigung in diesem Bereich haben Schwierigkeiten mit dieser Aufgabe.

Ich möchte mit zwei Beispielen auf einen weiteren Zugang zu dieser Frage eingehen. Hierbei stellt man die Frage, ob Tiere über kognitive Leistungen verfügen, die wir aus unserer Introspektion eindeutig als bewusste Leistungen erfahren.

Episodisches Gedächtnis: Tulving und Wheeler et al. prägten den Begriff „episodisches Gedächtnis“ und beschrieben damit unser explizites Wissen um frühere Ereignisse und das Wissen darum, dass es sich um solche früheren Ereignisse handelt (Tulving 1985; Wheeler et al. 1997). Wichtige Aspekte dieses Gedächtnisses sind, *was* geschah, *wann* es geschah und *wo* es geschah. Es lässt sich fragen, ob Tiere über ein solches wann-, wo- und was-Gedächtnis verfügen. Clayton und Dickinson nennen das ein „episodic-like memory“ und zeigen, dass Eichelhäher und andere Tiere, die Futter verstecken, über ein solches Gedächtnis verfügen (Clayton & Dickinson 1989). Sie erinnern sich nicht nur an tausende von Futterverstecken, die sie angelegt haben, sondern auch, wann sie welche Art von Futter (eine leicht verderbliche Mehlwurmlarve oder ein dauerhaftes Futterkorn) versteckt haben. Darüber hinaus beobachten sie andere Eichelhäher, wenn diese Futter verstecken, und räubern die Verstecke aus. Das wiederum beobachten Tiere, wenn sie Futter verstecken und merken sich, wer sie beobachtet hat (Dally et al. 2006). Wenn sie erfahren, dass sie an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit hungrig sein werden, dann speichern sie

dort ein anderes und mehr Futter als an einem Ort, an dem sie nicht hungrig sein werden. Für diese Art von Gedächtnis übernimmt der Hippocampus bei Vögeln wie bei Nagern und Menschen eine wichtige Rolle. Da der Hippocampus beim Menschen eine essenzielle Struktur für deklaratives (explizites) Wissen ist, lässt sich vermuten, dass es zwischen dem episodischen Gedächtnis des Menschen und dem „episodic-like memory“ der Tiere keine prinzipiellen sondern nur graduelle Unterschiede gibt (Suzuki 2006).

Kausales Schließen: Tiere lernen aus der Kontiguität und der Kontingenz von Ereignissen die kausalen Zusammenhänge dieser Ereignisse in der Umwelt (s. o.). Haben sie aber auch ein Verständnis für solche kausalen Zusammenhänge? Blaisdell et al. zeigten kürzlich, dass Ratten kausale Schlüsse nach dem Erlernen einfacher Dressuraufgaben ziehen, in denen sie das Angebot von Futter entweder als Folge von selbst erzeugten Signalen oder nicht von ihnen verursachten Signalen einzuordnen hatten (Blaisdell et al. 2006). Dies bedeutet, dass die Tiere den kausalen Zusammenhang zwischen der eigenen Aktion erkannten. Die kausale Verknüpfung haben die Ratten nach mehrmaligen Lerndurchgängen erschlossen. In anderen Situationen werden solche Zusammenhänge ohne vorheriges Probieren erkannt. Berühmte Beispiele hierfür sind die in allen Lehrbüchern der Verhaltensbiologie angeführten Schimpansen von Wolfgang Köhler, die Stäbe zusammen stecken und Kisten aufeinander türmen, um Futter zu erreichen. Ein anderes Beispiel sind die Raben von Heinrich und Bugnyar (Heinrich & Bugnyar 2005). Sie beobachteten Raben, die an ein Stück Fleisch gelangen, das an einem Strick befestigt ist, indem sie schrittweise mit dem Schnabel den Strick ein Stück hochziehen, dann diesen mit einem Fuß festhalten und die Prozedur solange wiederholen bis sie das Futter erreichen. Dies tun sie nicht, indem sie schrittweise das Verhalten erlernen, sondern bereits beim ersten Mal und mit vollständigem Ablauf aller komplizierten Bewegungen.

Mit diesen Beispielen will ich das Argument vertreten, dass implizites Handeln nach Strukturen erfolgt, die wir als charakteristisch, ja geradezu als für bewusst werdendes Handeln reserviert erachten.

5 Erwarten, Planen, Entscheiden: Eine abschließende Bemerkung

Neurobiologen argumentieren, dass explizite Willensentscheidungen zur Gänze (oder in überwiegenden Teilen, darüber wird innerhalb der Neurobiologie diskutiert) post-hoc-Erfahrungen sind, mit denen sich die Teile des Gehirns, die das Substrat des bewussten Ichs darstellen, mit seinem übrigen Gehirn und seinem Körper derartig innig identifizieren, dass sich das bewusste Ich die alleinige Urheberschaft für alle Entscheidungen zuschreibt (Smith-Churchland 2002; Kandel 2006; Roth 2001; Singer

2004; Wegner 2002). Wenn dem so ist, dann stellt sich natürlich die Frage, wer verhandelt und entscheidet denn zur Gänze (oder überwiegend), damit im Nachhinein eine solche Zuschreibung erfolgen kann? Die hier vorgetragenen Charakterisierungen der Operationen an implizitem Wissen sollen verdeutlichen, dass die Reichhaltigkeit und Komplexität der nicht bewusst werdenden Gehirnaktivitäten genügend Raum für die als willentlich und als frei empfundenen Entscheidungen geben. Es ist gerade diese Nicht-Kennntnis der impliziten Operationen, die das Freiheitsgefühl erzeugt, und es muss gute evolutive Gründe für diese Unabhängigkeit in der Wahrnehmung der Aktionen des eigenen Gehirns gegeben haben. Möglicherweise stellt sie eine Voraussetzung für die enge Identifikation zwischen einem Gehirn und seinem Körper dar. Ich wollte weiterhin verdeutlichen, dass „inneres Verhandeln“ bei implizitem Wissen nicht mit einfachen Ursache-Wirkungs-Gefügen gleichgestellt werden kann. Die Aktivierung verschiedener, auch widersprüchlicher Gedächtnisinhalte, ihr iteratives und zyklisches Aktivieren und Deaktivieren, die Vergleiche über rekurrente Schleifen (Edelman 1993, nennt dies die „reentrant loops“) und die Spontaneität der neuronalen Netzwerke, angetrieben von Motivation und Aufmerksamkeit kontrollierenden Gehirnstrukturen, bedingen Ursache-Wirkungs-Ketten, die einen Grad an Komplexität erreichen, der uns zur Zeit Grenzen der Erkenntnis auferlegt. Ein Eindringen in diese Ursache-Wirkungs-Ketten wird zu einer Erweiterung, nicht zu einer Verengung der Kenntnisse führen, gibt aber keinen Anlass zur Annahme von nicht-physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Voraussetzung für dieses Eindringen ist allerdings eine radikale Abkehr von einem kartesischen Dualismus und einer wie auch immer versteckten Annahme einer nur dem Menschen zukommenden geistigen Tätigkeit. So ist es auch nicht angemessen, Begriffe wie „Wählen“, „Planen“, „Abwägen“, „Verhandeln“, „Entscheiden“ auf die explizite und deklarative Ebene zu begrenzen. Dies sind Eigenschaften des Gehirns im Umgang mit allem Wissen, mag es nun als implizit oder explizit erfahren werden. Die Erfahrung von Wille und Freiheit im Entscheiden sind wie alle Gehirnleistungen Produkte der Evolution von Gehirnen. Insofern ist auch die Frage, wie ausgehend von diesen Operationen die Empfindung der Freiheit von eben denselben Operationen entsteht, eine originäre neurobiologische Fragestellung. Biologen werden daher nach den proximalen und ultimativen Ursachen suchen.

Bibliographie

- Baddeley, Alan D. (1986): Working Memory, Oxford/New York: Oxford University Press.
Baddeley, Alan D. & Graham Hitch (1974): Working memory. In: Bower, Gordon H. (Hg.), The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory, New York: Academic Press, S. 47–90.

- Blaisdell, Aaron P., Sawa, Kosuke, Leising, Kenneth J. & Michael R. Waldmann (2006): Causal Reasoning in Rats. In: *Science* 311, S. 1020–1022.
- Clayton, Nicola S. & Anthony Dickinson (1989): Episodic-Like Memory During Cache Recovery by Scrub Jays. In: *Nature* 395, S. 272–274.
- Crick, Francis C. & Christof Koch (2005): What Is the Function of the Claustrum? In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360, S. 1271–1279.
- Dally, Joanna M., Emery, Nathan J. & Nicola S. Clayton (2006): Food-Caching Western Scrub-Jays Keep Track of Who Was Watching when. In: *Science* 312, S. 1662–1665.
- Daw, Nathaniel D., Niv, Yael & Peter Dayan (2005): Uncertainty-Based Competition between Prefrontal and Dorsolateral Striatal Systems for Behavioral Control. In: *Nature Neuroscience* 8, S. 1704–1711.
- Dehaene, Stanislas, Kerszberg, Michael & Jean-Pierre Changeux (1998): A Neuronal Model of a Global Workspace in Effortful Cognitive Tasks. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95, S. 14529–14534.
- Edelmann, Gerald M. (1993): Neural Darwinism. In: *Neuron* 10, S. 115–125.
- Fransen, Erik, Tahvildari, Babak, Egorov, Alexei V., Hasselmo, Micheal E. & Angel A. Alonso (2006): Mechanism of Graded Persistent Cellular Activity of Entorhinal Cortex Layer V Neurons. In: *Neuron* 49, S. 735–746.
- Heinrich, Bernd & Thomas Bugnyar (2005): Testing Problem Solving in Ravens: String-Pulling to Reach Food. In: *Ethology* 111, S. 962–976.
- Iacoboni, Marco (2005): Neural Mechanism of Imitation. In: *Current Opinion in Neurobiology* 632, S. 632–637.
- James, William (1981): *The Works of William James: The Principles of Psychology*, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Kandel, Eric R. (2006): *Auf der Suche nach dem Gedächtnis – Die Entstehung einer neuen Wissenschaft des Geistes*, München: Siedler Verlag.
- Libet, Benjamin (1990): Cerebral Processes that Distinguish Conscious Experience from Unconscious Mental Functions. In: Eccles, John C. & Otto D. Creutzfeld (Hg.), *The Principles of Design and Operation of the Brain*, Bd. 78, Vatican City State: Pontificae Academiae Scientiarum Scripta Varia, S. 185–202.
- Lumer, Erik D., Friston, Karl J. & Geraint Rees (1998): Neural Correlates of Perceptual Rivalry in the Human Brain. In: *Science* 280, S. 1930–1934.
- Milner, Brenda, Squire, Larry R. & Eric R. Kandel (1998): Cognitive Neuroscience and the Study of Memory. In: *Neuron* 20, S. 445–468.
- Rescorla, Robert A. & Allan R. Wagner (1972): A Theory of Classical Conditioning: Variations in the Effectiveness of Reinforcement and Non-Reinforcement. In: Black, Abraham H. & William F. Prokasy (Hg.), *Classical Conditioning II: Current Research and Theory*, New York: Appleton-Century-Crofts, S. 64–99.

- Rizzolatti, Giacomo & Laila Craighero (2004): The Mirror Neuron System. In: Annual Review of Neuroscience 27, S. 169–192.
- Roth, Gerhard (2001): Fühlen, Denken, Handeln – Wie das Gehirn unser Verhalten steuert, Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Ryle, Gilbert (1969): Der Begriff des Geistes, Stuttgart: Reclam.
- Schacter, Daniel (1999): Wir sind Erinnerung – Gedächtnis und Persönlichkeit, Reinbek: Rowohlt.
- Schultz, Wolfram (2006): Behavioral Theories and the Neurophysiology of Reward. In: Annual Review of Psychology 57, S. 87–115.
- Singer, Wolf (2004): Neurobiologische Anmerkungen zum Freiheitsdiskurs. In: Debatte 3, Zur Freiheit des Willens II, S. 17–26.
- Smith Churchland, Patricia (2002): Brain-Wise: Studies in Neurophilosophy, Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Squire, Larry R. (1987): Memory and Brain, New York, Oxford: Oxford University Press.
- Sundberg, Kristy A., Fallah, Mazyar & John H. Reynolds (2006): A Motion-Dependent Distortion of Retinotopy in Area V4. In: Neuron 49, S. 447–457.
- Suzuki, Wendy A. (2006): Encoding New Episodes and Making them Stick. In: Neuron 50, S. 19–21.
- Tulving, Endel (1985): Memory and Consciousness. In: Canadian Psychology–Psychologie Canadienne 26, 1–12.
- Wang, Yun, Markram, Henry, Goodman, Philip H., Berger, Thomas K., Ma, Junying & Patricia S. Goldman-Rakic (2006): Heterogeneity in the Pyramidal Network of the Medial Prefrontal Cortex. In: Nature Neuroscience 9, S. 534–542.
- Wegner, Daniel M. (2002): The Illusion of Conscious Will, Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Wheeler, Mark A., Stuss, Donald T. & Endel Tulving (1997): Toward a Theory of Episodic Memory: The Frontal Lobes and Autonoetic Consciousness. In: Psychological Bulletin 121, S. 331–354.