Frank Rösler

Einige Gedanken zum Problem der „Entscheidungsfindung" in Nervensystemen

Die Frage, ob es eine Willens-, Handlungs- oder Entscheidungsfreiheit gibt, kann nach dem derzeitigen Kenntnisstand der Neurowissenschaften nicht mit einem klaren „Ja" oder „Nein" beantwortet werden. Dazu wissen wir zu wenig über die Funktionsweise des Gehirns, oder allgemeiner gesprochen, über die Funktionsweise von Nervensystemen. Wir können aber auf der Basis des jeweiligen Kenntnisstandes Argumente liefern, die die eine oder die andere Antwort plausibler erscheinen lassen. Ich möchte hier einen kleinen Baustein hinzufügen und einige Prinzipien des Nervensystems ansprechen, die meines Erachtens Voraussetzung für Phänomene sind, die wir aus introspektiver Sicht als Entscheidung zwischen Informationen bezeichnen.

Nervensysteme benötigen einen Mechanismus, der die relative Dominanz von Verarbeitungsmodulen oder Zellverbänden regelt. In dieser Hinsicht ähnelt das Konstrukt der Entscheidungskontrolle den Phänomenen, die man gemeinhin dem Konstrukt der selektiven Aufmerksamkeit zuordnet. Die Notwendigkeit zur Regulation der relativen Dominanz von Informationen folgt aus einigen einfachen Beobachtungen. Auf der Eingangsseite „filtert" jedes Nervensystem Information – einige Signale werden weiterverarbeitet, einige erregen nur die Rezeptoren und werden bereits relativ früh blockiert. Dies gilt bereits für ganz einfach strukturierte Organismen. Auf der Verhaltensebene ist das Phänomen der selektiven Aufmerksamkeit mit umfangreichen Experimenten dokumentiert (Styles 1997). Introspektiv wird uns die Tatsache einer begrenzten Aufmerksamkeit unter Umständen schmerzhaft bewußt, wenn uns ein Taschendieb so geschickt ablenkt, daß wir erst später den Verlust der Brieftasche bemerken. Evidenzen für die selektive Verarbeitung von Eingangssignalen auf unterschiedlichen Ebenen des Nervensystems liefert auch die funktionelle Messung der Hirnaktivität. Damit kann man sowohl die relative Verstärkung als auch die relative Abschwächung von neuronaler Aktivität beobachten (Mangun, Buonocore, Girelli & Jha 1998; Näätänen 1992). Analoges gilt für die Ausgangsseite, die Motorik. Auch hier bedarf es einer Regelung von relativen Aktivierungszuständen. Motorische Programme auf zentraler Ebene bzw. Muskelstränge in der Peripherie müssen sich gegenseitig hemmen, damit zielgerichtete Aktionen möglich werden. Der muskuläre Apparat kann nicht gleichzeitig Beuger und Strecker im gleichen Ausmaß aktivieren, da es in

diesem Fall zu gar keiner Bewegung käme. Es bedarf einer antagonistischen Verschaltung, so daß die Erregung des einen Muskels (z. B. eines Beugers) die Hemmung des Antagonisten (des Streckers) bewirkt. Schon hier erfolgt also aufgrund eines sehr simplen neuronalen Verschaltungsprinzips eine relative Kontrolle von Erregungszuständen im Zentralnervensystem (ZNS), und dies geschieht weit unterhalb des Gehirns, bereits auf dem Niveau des Rückenmarks (vgl. z. B. Kandel, Schwartz & Jessell 1996).

Zurück zur Eingangsseite: Auch hier existiert ein Prinzip der Erregungs-Hemmungs-Verschaltung, wie es gerade für die Ausgangsseite angedeutet wurde: das Prinzip der lateralen Inhibition. Rezeptoren und Rezeptorpopulationen sind in den Sinnesorganen so verschaltet, daß die Erregung in einer Teilmenge zu einer Hemmung in einer anderen Teilmenge führt. Auf der Ebene der Retina und der Hautrezeptoren sind diese Verschaltungsprinzipien am besten beschrieben; es handelt sich um die sogenannten Rezeptiven Felder, die eine Kontrastverstärkung der Eingangssignale ermöglichen. Kontrastverstärkung ist der eine Aspekt; etwas anders betrachtet heißt dies aber auch: das Verschaltungsprinzip regelt die relative Dominanz von Erregungszuständen in Neuronenpopulationen – einige Informationen werden weitergeleitet, andere blockiert.

Das Prinzip der lateralen Inhibition kann problemlos auf größere Verarbeitungsmodule übertragen werden, zum Beispiel auf somatosensorische Hautareale oder visuelle Halbfelder. Für diese Generalisierung ist jedoch die unmittelbare gegenseitige Hemmung von benachbarten Zellen, so wie sie etwa in der Retina erfolgt, nicht hinreichend (i. S. lateraler, inhibitorischer Verbindungen). Vielmehr sind hier spezialisierte Zellpopulationen erforderlich, die das Aktivitätsniveau unterschiedlicher Verarbeitungsmodule integrieren und über Feedbackverbindungen eine Verstärkung bzw. Abschwächung der Erregungsniveaus in den Verarbeitungsmodulen bewirken (LaBerge 1995, vgl. Abb. 1). Die Architektur einer in dieser Weise generalisierten Erregungs-Hemmungs-Verschaltung kann bereits einfache, durch externe Reize ausgelöste Verschiebungen der Aufmerksamkeit – in anderen Worten: eine Entscheidung zwischen verschiedenen Informationsströmen – abbilden. Ein Inputmodul, das momentan durch die physikalische Umwelt mehr Aktivierung erhält, zum Beispiel aufgrund eines intensiveren Reizes (lauter, heller usw.), wird über das Verschaltungsprinzip die Dominanz in dem gesamten Aktivierungsmuster erhalten.

Dies ist keine bloße Theorie. Befunde zur funktionellen Neuroanatomie zeigen, daß ein solches Verschaltungsprinzip eine neurophysiologische Grundlage hat: Der Nucleus reticularis thalami, der wie eine Schale den Thalamus umschließt, hat ganz offensichtlich eine entsprechende „gating"-Funktion für afferente Reize. Bei genauer Betrachtung der Verschaltung in diesem Kerngebiet erkennt man, daß hier im Prinzip das gleiche geschieht wie bei der lateralen Hemmung in der Retina: weniger intensive Reize werden blockiert,

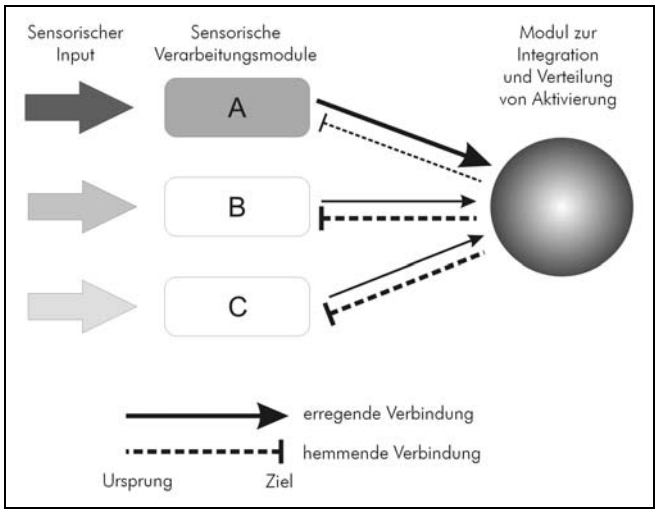

Abbildung 1
Generalisierung des Prinzips der wechselseitigen Hemmung und Erregung von neuronalen Zellverbänden unter Zuhilfenahme eines Zellverbandes (Moduls) zur Integration und Verteilung relativer Aktivierungszustände.

intensivere dringen zum Cortex durch (Skinner & Yingling 1977; Yingling & Skinner 1977). Die Zellen des Nucleus reticularis thalami öffnen quasi Fenster, durch die sensorische Informationen wie mit einem Scheinwerferkegel auf die sensorischen Cortexareale projiziert werden.

Schwieriger wird es, wenn man an Situationen denkt, die nicht vollständig durch die aktuelle Reizsituation festgelegt sind. In der Terminologie der Psychologen spricht man dann von endogenen Reizen, von Intentionen etc., die unsere Aufmerksamkeit in die eine oder andere Richtung verschieben. Nehmen wir als Beispiel die räumliche selektive Aufmerksamkeit: Der Proband folgt der Anweisung des Experimentators, das linke visuelle Feld zu beachten. Verhalten und Elektrophysiologie zeigen dann, daß alle Reize von der linken Seite im Nervensystem verstärkt, von der rechten Seite hingegen abgeschwächt werden. Um diese interne Beeinflussung der Aufmerksamkeitsverteilung im Modell berücksichtigen zu können, müssen wir annehmen, daß die internen Reize ebenfalls mit einem oder mehreren Modulen verknüpft sind, die die Erregung im System integrieren und über Feedbackverschaltungen an die Eingangsmodule zurückmelden. Was aber ist ein interner Reiz, wie ist mit den Begriffen bzw. den Bauelementen und Funktionszuständen des Nervensystems eine Instruktion „beachte links" zu fassen? Nun, während es sich auf der psychologischen Begriffsebene um eine Gedächtnisspur handelt, spricht man auf der

physiologischen Begriffsebene von einem neuronalen Erregungsmuster. Wir müssen also annehmen, daß die Zellpopulationen, in denen Gedächtnisspuren als Erregungsmuster repräsentiert sind, ebenfalls ihren Aktiviertheitszustand an ein übergeordnetes Verteilungsmodul „melden" und über rücklaufende Verbindungen je nach der Gesamtverteilung der Erregung verstärkt oder abgeschwächt werden (Abb. 2). Es sei nur am Rande darauf hingewiesen, daß es in der experimentellen Psychologie eine Reihe von Befunden gibt, die eine Regulation entsprechender Erregungs- und Hemmungsprozesse für Gedächtnisrepräsentationen sehr wahrscheinlich machen (vgl. positive und negative Bahnungseffekte bei Anderson & Neely 1996; May, Kane, & Hasher 1995; Hughes & Jones 2003; Tipper 2001; Ortells, Abad, Noguera & Lupianez 2001, oder Effekte der Aufgabenwechsel z. B. bei Meiran 2000, Mayr 2003).

Wie sieht es mit motivationalen Einflüssen aus? Wir sitzen im Kaffeehaus und hören auf zu lesen, weil wir ein Stück Kuchen essen „wollen", und vielleicht vergessen wir sogar das zu tun, wenn uns eine bezaubernde Tischnachbarin in ein Gespräch verwickelt. Um den Einfluß der unterschiedlichen Motivationszustände für die Verteilung des Erregungsniveaus im Nervensystem mit berücksichtigen zu können, müssen wir sogenannte homöostatische Sensoren einbauen. Auch diese müssen auf die Module Zugriff haben, die die Erregung via rücklaufender Hemmungen regeln (Abb. 3).

Nach allem, was wir derzeit über die Funktionsweise von Nervensystemen wissen, ist es unwahrscheinlich, daß es nur ein einziges Modul gibt, das die Erregungsverteilung in den Verarbeitungsmodulen reguliert. Vielmehr sind untergeordnete Module anzunehmen, die auf bestimmte Zellpopulationen und damit Informationsarten spezialisiert sind, und

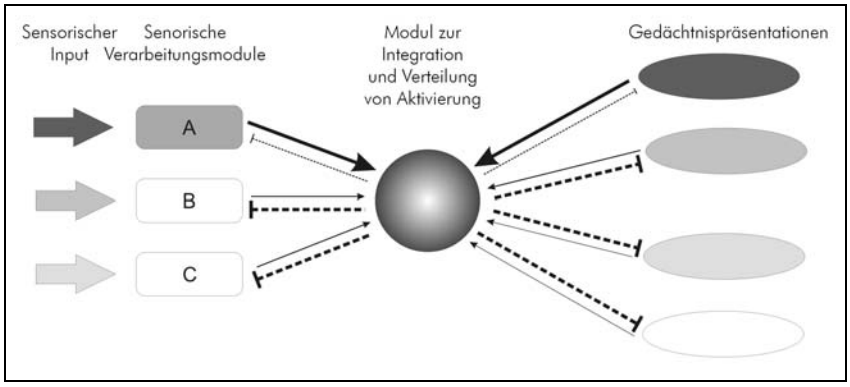

Abbildung 2
Einfluß von Gedächtnisrepräsentationen (internen Reizen) auf ein Modul zur Integration und Verteilung der Aktivierung.

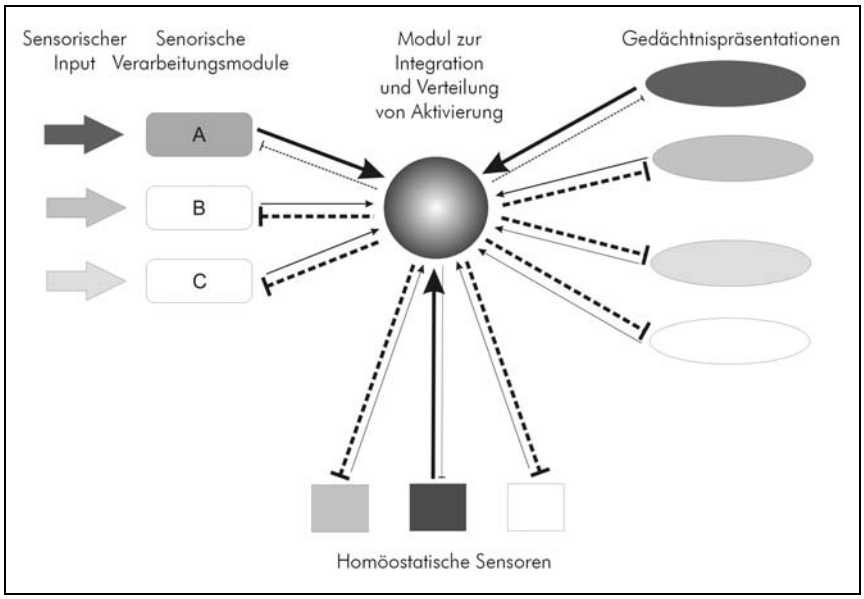

Abbildung 3
Einfluß „homöostatischer" Sensoren auf das Aktivations-Verteilungsmodul.

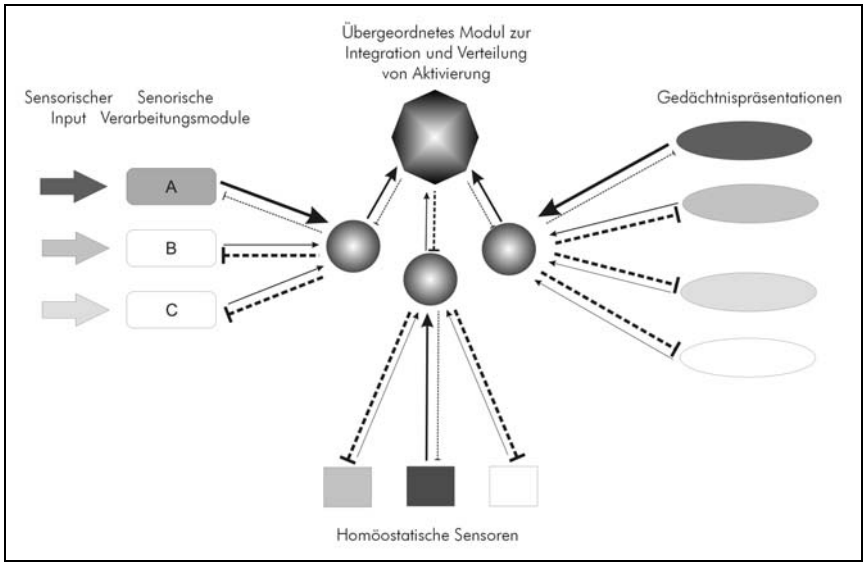

Abbildung 4
Hierarchisierung von Aktivations-Verteilungsmodulen.

übergeordnete, die ihrerseits die Erregungszustände der untergeordneten Module regulieren. Es ist also eine Hierarchie der Regulationsmodule anzunehmen (vgl. Abb. 4). Entsprechende übergeordnete Module sind sehr wahrscheinlich im präfrontalen und cingulären Cortex lokalisiert (D'Esposito, Postle & Rypma 2000; Fuster 2000; Petrides 2000). Aber auch dort gibt es sehr wahrscheinlich noch Spezialisierungen für zum Beispiel vorwiegend sensorisch, motorisch und homöostatisch verursachte Erregungszustände bzw. für die „Bewertung" unterschiedlicher Belohnungszustände (Zysset, Huber, Samson, Ferstl & von Cramon 2003; Elliott, Dolan & Frith 2000; Schubotz & von Cramon 2001).

Zusammenfassung und Folgerungen

a) Das Nervensystem hat eine elementare Verschaltungseigenschaft, aufgrund derer die relative Aktivierung von Zellverbänden gesteuert wird. Auf der Eingangsseite ist dies das Prinzip der lateralen Inhibition, auf der Ausgangsseite das der antagonistischen Hemmung und Erregung von Effektoren. Beides führt zu einer relativen Verstärkung bzw. Abschwächung von Erregungszuständen und damit zu einer *Entscheidung* zwischen konkurrierenden Erregungszuständen des ZNS.
b) Dieses Grundprinzip läßt sich ohne Schwierigkeiten für größere Zellverbände generalisieren, wenn man spezialisierte Module annimmt, die die relative Erregungsverteilung abgreifen, integrieren und über Feedbackverbindungen je nach Erregungsniveau zurückmelden. Damit wird eine Verstärkung und Abschwächung der Erregung in den untergeordneten Verarbeitungsmodulen erreicht, das heißt eine Verschiebung des jeweiligen Arbeitspunktes, wobei immer das gleiche Prinzip gilt: die schwächere Erregung wird unterdrückt, die bereits stärkere noch verstärkt. Auf dieser höheren begrifflichen Ebene spricht man davon, daß das Verschaltungsprinzip zu Entscheidungen zwischen Informationsalternativen führt. Diese Informationsalternativen können externe Reizkonstellationen, Motivationszustände, emotionale Zustände, semantische Konzepte usw. sein.
c) Wir benötigen keinen Homunculus, um im Nervensystem Selektionsphänomene erklären zu können. Die meisten selektiven Aufmerksamkeitstheorien der Vergangenheit hatten einen solchen Homunculus postuliert (meistens unausgesprochen). Ein solches Konstrukt kann entfallen, wenn man das Prinzip der gegenseitigen Hemmung von Zellverbänden, das uns auf Rezeptor- und Effektorebenen bekannt ist, fortschreibt.

Was folgt daraus für sogenannte freie, dem Willen gehorchende Entscheidungen? Das gesamte, sich selbst organisierende System enthält zu jedem Zeitpunkt eine bestimmte Erregungsverteilung. Dabei gilt, daß die Erregungsverteilung über gewisse Zeitspannen

stabil ist, das heißt, das System konvergiert durch die entsprechenden Feedbackverschaltungen auf ein stabiles Erregungsmuster. Jeder externe wie interne Reiz der homöostatischen Sensoren und jeder Gedächtnisinhalt nimmt Einfluß auf diese Erregungsverteilung und kann diese mehr oder weniger stark aus dem stabilen Zustand bringen. Je nachdem wie stark die Perturbationen sind, wird es unterschiedlich lange dauern, bis wieder ein transienter stabiler Zustand erreicht ist. Auch dies läßt sich mit experimentalpsychologischen Versuchsanordnungen beobachten (z. B. Stroop Aufgabe und andere Konfliktparadigmen, McLeod 1991). Sind konkurrierende Reizkonstellationen auf der Eingangsseite, im Gedächtnis oder an den homöostatischen Sensoren nahezu oder sogar vollständig gleich stark, dann kommt es zur Oszillation zwischen verschiedenen Zuständen. Subjektiv erleben wir solche Instabilitäten als Konflikte, auf neuronaler Ebene betrachtet sind es Erregungszustände, die zwischen lokalen Maxima (Minima) hin und her schwingen. Die Wahrnehmungspsychologie hat dafür wunderbare Beispiele: die sogenannten Kippfiguren (Abb. 5). In gleichem Maße kann auch die Oszillation zwischen sogenannten „Entscheidungsalternativen" („Heirate ich sie nun oder heirate ich sie nicht") zwei transient stabilen Erregungszuständen zwischen verschiedenen Gedächtnisrepräsentationen entsprechen.

Abbildung 5
Beispiel einer
bistabilen Kippfigur

Führt man diese Überlegungen weiter, dann korrespondiert die subjektive Evidenz einer freien Entscheidung auf der neuronalen Ebene mit einem Wechsel zwischen unterschiedlichen Erregungszuständen in einem System, das nach unserem momentanen Kenntnisstand deterministisch ist und den Gesetzen der klassischen Physik gehorcht. In diesem System „kippt" das Erregungsmuster in den einen oder anderen stabilen Zustand nicht, weil eine Hirnstruktur (ein Homunculus) kontemplativ die Gewichte abwägt, sondern weil sich aufgrund der Lerngeschichte, der momentanen Umweltreize usw. in dieser Hirnstruktur gemäß den geltenden Gesetzen ein stabiler Zustand einstellt. Danach erscheint es zumindest zweifelhaft, daß wir in einer Situation im eigentlichen Sinne des Wortes *frei* entscheiden können.

Allerdings ist das kaum ein Grund zur Beunruhigung, da dies natürlich nicht heißt, daß der Organismus in seiner Lebenslinie von Geburt an vollständig vorherbestimmt ist. Das Nervensystem ist weder in seiner Struktur noch in seiner funktionalen Organisation zum Zeitpunkt der Geburt und in der darauf folgenden Lebenszeit festgelegt. Die zu einem bestimmten Zeitpunkt existierende Struktur und funktionelle Organisation des Systems ist vielmehr das Ergebnis einer permanenten Interaktion zwischen genetisch verankerten Dis-

positionen und dem Umweltangebot, dem ein Organismus ausgesetzt ist (vgl. z. B. Bourgeois, Goldman-Rakic & Rakic 2000; Quartz & Sejnowski 1997). Die angesprochenen Erregungszustände, die sich im Sinne der einen oder anderen Entscheidungsalternative im Nervensystem zu einem Zeitpunkt *t* stabilisieren, sind somit immer das Ergebnis von genetischer Prädisposition, Lerngeschichte und momentanem Reizangebot der Umwelt. Aufgrund der Lernfähigkeit des Systems heißt das aber auch, daß der Erregungszustand zum Zeitpunkt *t* die funktionelle Organisation des Systems selbst wieder verändert und somit Einfluß auf den Erregungszustand zum Zeitpunkt *t+1* nimmt. Selbst wenn wir ein vollständig determiniertes System annehmen, das den Gesetzen der klassischen Physik gehorcht, dann heißt das noch lange nicht, daß wir es auch vollständig beschreiben und den Erregungszustand zum Zeitpunkt *t+1* tatsächlich und in allen Details vorhersagen können. Dazu müßten wir (a) die Erregungszustände aller 10^{12} Neuronen zum Zeitpunkt *t* kennen, (b) die Lerngeschichte aller neuronalen Verbindungen nachzuvollziehen in der Lage sein (und die Verbindungen sind ein Vielfaches der Neuronenzahl, da jedes Neuron im Schnitt mit 10.000 – 20.000 anderen Neuronen interagiert) und (c) zu diesem Zwecke auch den genetischen Code sowie seine Übersetzung in die existierende Struktur vollständig entschlüsseln können. All dies scheint ein mit den momentanen Mitteln der Hirnforschung nicht zu bewältigendes Problem. Wir können lediglich prinzipielle Erklärungen der Funktionsweise geben, jedoch keine vollständige Beschreibung des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt. Mit den Gesetzen des Nervensystems verhält es sich dabei nicht viel anders als mit anderen Gesetzen der Physik: Alles spricht dafür, daß Druck und Temperatur eines Gases in einem Gefäß mit bestimmtem Volumen durch die Molekularbewegungen determiniert sind, jedoch können wir natürlich nicht die Trajektorien aller Moleküle oder Atome in einem Gasgefäß vom Zeitpunkt *t* zum Zeitpunkt *t+1* vollständig vorhersagen.

Wenn man den Erregungszustand des Nervensystems zu einem bestimmten Zeitpunkt, der mit einer Handlungsinitiierung korrespondiert, als deterministische Konsequenz der Genetik, der Lerngeschichte und des momentanen Reizangebots versteht, so bleibt aus der Sicht des Naturwissenschaftlers letztlich kaum Spielraum für das Konstrukt der Verantwortlichkeit in seiner juristischen oder geisteswissenschaftlichen Bedeutung, also für das Konstrukt eines sich frei entscheidenden, die Alternativen kontemplativ abwägenden Individuums. Was allerdings bleibt, ist die Lernfähigkeit, die Plastizität des Systems. Ein Individuum, das nach den Normen der Gesellschaft eine Straftat begangen hat, kann gemäß dieser Betrachtungsweise kaum im Sinne des Konstruktes der „Schuldhaftigkeit" bestraft werden, es könnte aber zu einer verhaltenstherapeutischen Maßnahme verurteilt werden, die seine Gedächtnisrepräsentationen und damit die funktionelle Organisation

seines Gehirns verändert. Denn ganz offensichtlich waren zum Zeitpunkt der Tat bestimmte Gedächtnisrepräsentationen nicht hinreichend stabil oder dominant ausgebildet, um das Handeln im Sinne des sozial Tolerablen zu beeinflussen, um es zum Beispiel gegenüber „Versuchungen der Umwelt zu schützen". Wenn das System aber plastisch ist und lernen kann – Ergebnisse der Hirnforschung sprechen genauso dafür wie die Alltagserfahrung –, dann ist es konsequent, die unzureichenden „moralischen" Gedächtnisrepräsentationen durch lerntheoretisch fundierte Maßnahmen fester zu etablieren.

Allerdings erkennt man dabei schnell eine Grenze, da es sicherlich Unterschiede in der Lernfähigkeit und in der individuellen Ausprägung der für die Kontrollfunktionen bedeutsamen Strukturen geben wird, also Unterschiede in den Möglichkeiten zur Hemmung und Erregung von Repräsentationen. Angenommen, wir hätten ausreichendes Wissen über die Strukturen, die eine relative Gewichtung von Gedächtnisrepräsentationen, homöostatischen Zuständen etc. leisten und somit bestimmte Erregungszustände verstärken sowie andere schwächen, dann könnten wir angeben, wo diese Strukturen verortet sind, wie ihre charakteristische Funktion aussieht. Vermutlich würde sich dann zeigen, daß solche Strukturen bei einigen Personen prominenter, bei anderen weniger prominent ausgebildet sind und somit ihren „Einfluß" mehr oder weniger stark geltend machen können (das entspräche dann einer biologischen Verankerung von Persönlichkeitsunterschieden – zum Beispiel hinsichtlich Aggressivität, Impulsivität oder exekutiver Kontrolle). Weiterhin ist zu vermuten, daß die Plastizität des Systems bzw. bestimmter Systemkomponenten an gewisse Lebensphasen gekoppelt ist. So könnte es zum Beispiel sein, daß bestimmte Aktivierungs-Integrationsmodule im präfrontalen Cortex nur in der Adoleszenz plastisch sind, von einem bestimmten Alter an jedoch in ihrer Funktionalität festliegen und mit Beginn einer anderen Altersstufe vielleicht sogar in ihrer Effektivität abnehmen. Eine andere Möglichkeit wäre, daß die genetische Prädisposition für die Ausbildung einer solchen Struktur bei dem einen Individuum viel schwächer angelegt ist als bei dem anderen. Folglich würde wahrscheinlich bei bestimmten Personen eine verhaltenstherapeutische Maßnahme weniger oder auch gar nichts bewirken können. Die Konsequenz wäre dann, daß Personen, die aufgrund ihrer Dispositionen potentiell eine Gefahr für die Gesellschaft darstellen, in Sicherungsverwahrung genommen werden müßten.

Damit hier aber keine Mißverständnisse entstehen: Dies alles sind Gedankenspiele. Wir sind derzeit weit davon entfernt, das Gehirn in seiner Komplexität so zu verstehen, daß wir die eben angedeuteten Konsequenzen auch nur annähernd durch empirische Tatbestände erhärten könnten. Wir können nicht das Gehirn in seiner Anatomie und Funktionalität so vermessen, daß wir in der Lage wären, die individuellen Handlungsdispositionen vorherzusagen. Hier gilt das gleiche wie weiter oben für das allgemeinpsy-

chologische Problem ausgeführt: Auch hier wäre es erforderlich, die Genetik und die individuelle Lerngeschichte in all ihren Details genau nachzuzeichnen. Nur so würde man der Individualität in all ihren Facetten gerecht werden können. Die Dimension auch dieses Problems übersteigt alle denkbaren Lösungsmöglichkeiten.

Wichtiger als die derzeit nicht endgültig entscheidbare Frage, ob es einen freien Willen gibt oder nicht, oder ob straffälliges Verhalten erfolgreich in bestimmten Grenzen durch verhaltenstherapeutische Maßnahmen beeinflußt werden kann oder nicht, erscheint mir allerdings ein anderer forschungspragmatischer Ansatz. Das grundlagenwissenschaftliche Programm sollte darauf abzielen, versteckte Homunculi in der Erklärung von Nervensystemen zu vermeiden (vgl. Schall 2001). Die hier präsentierte Skizze zeigt Denk- und Forschungsmöglichkeiten dazu auf. Um nur einige weiterführende Fragen zu nennen: Welche Systemeigenschaften gibt es neben den angesprochenen Erregungs- und Hemmungsverschaltungen, die für Entscheidungsfindungen in Nervensystemen genutzt werden könnten? Welche Strukturen sind an derartigen Prozessen beteiligt? Wie sieht die Hierarchisierung entsprechender Verschaltungen aus?

Einige dieser Fragen wird man möglicherweise in der nahen Zukunft mit den Methoden der Neurowissenschaften besser als heute beantworten können. Ob wir dann auf einer sicheren Grundlage entscheiden können, ob es eine Willensfreiheit im juristischen bzw. geistesgeschichtlichen Sinne gibt, bleibt abzuwarten.

Literatur

Anderson, M. C. & J. H. Neely: Interference and inhibition in memory retrieval. In: Bjork, E. L. & R. A. Bjork (Hg.), Memory: Handbook of Perception and Cognition, 2nd ed., San Diego/CA: Academic Press, 1996, S. 237–313.

Bourgeois, J.-P., Goldman-Rakic, P. S. & P. Rakic: Formation, elimination, and stabilization of synapses in the primate cerebral cortex. In: Gazzaniga, M. S. (Hg.), The new cognitive neurosciences, 2nd ed., Cambridge, MA: MIT Press, 2000, S. 45–53.

D'Esposito, M., Postle, B. R. & B. Rypma: Prefrontal cortical contributions to working memory: Evidence from event-related fMRI studies. In: Experimental Brain Research 133 (2000), S. 3–11.

Elliott, R., Dolan, R. J. & C. D. Frith: Dissociable functions in the medial and lateral orbitofrontal cortex: evidence from human neuroimaging studies. In: Cerebral Cortex 10 (2000) 3, S. 308–317.

Fuster, J. M.: Executive frontal functions. In: Experimental Brain Research 133 (2000), S. 66–70.

Hughes, R. & D. M. Jones: A negative order-repetition priming effect: Inhibition of order in unattended auditory sequences? In: Journal-of-Experimental-Psychology: Human-Perception-and-Performance 29 (2003) 1, S. 199–218.

Kandel, E. R., Schwartz, J. H. & T. M. Jessell (Hg.): Neurowissenschaften – Eine Einführung, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1996.

LaBerge, D.: Computational and anatomical models of selective attention in object identification. In: Gazzaniga, M. S. (Hg.), The cognitive neurosciences. Cambridge/MA: MIT Press, 1995, S. 649–663.

Mangun, G. R., Buonocore, M. H., Girelli, M. & A. P. Jha: ERP and fMRI measures of visual spatial selective attention. In: Human Brain Mapping 6 (1998) 5–6, S. 383–389.

May, C. P., Kane, M. J. & L. Hasher: Determinants of negative priming. In: Psychological Bulletin 118 (1995), S. 35–54.

Mayr, U.: Toward principles of executive control: How mental sets are selected. In: Kluwe, R. H., Lüer, G. & F. Rösler (Hg.), Principles of learning and memory, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2003, S. 223–240.

McLeod, C. M.: Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. In: Psychological Bulletin 109 (1991), S. 163–203.

Meiran, N.: Modeling cognitve control in task-switching. In: Psychological Research 63 (2000), S. 234–249.

Näätänen, R.: Attention and brain function, Hillsdale/NJ: Erlbaum, 1992.

Ortells, J. J., Abad, M. J. F., Noguera, C. & J. Lupianez: Influence of prime-probe stimulus onset asynchrony and prime precuing manipulations on semantic priming effects with words in a lexical-decision task. In: Journal-of-Experimental-Psychology: Human-Perception-and-Performance 27 (2001) 1, S. 75–91.

Petrides, M.: The role of the mid-dorsolateral prefrontal cortex in working memory. In: Experimental Brain Research 133 (2000), S. 44–54.

Quartz, S. R. & T. J. Sejnowski: The neural basis of cognitive development: A constructivist manifesto. In: Behavioral-and-Brain-Sciences 20 (1997), S. 537–596.

Schubotz, R. I. & D. Y. von Cramon: Functional organization of the lateral premotor cortex: fMRI reveals different regions activated by anticipation of object properties, location and speed. In: Cognitive Brain Research 11 (2001) 1, S. 97–112.

Skinner, J. E. & C. D. Yingling: Central gating mechanisms that regulate event-related potentials and behavior. A neural model for attention. In: Desmedt, J. E. (Hg.), Progress in Clinical Neurophysiology, Vol. 1, Basel: Karger, 1977, S. 30–69.

Schall, J. D.: Neural basis of deciding, choosing and acting. In: Nature Reviews Neuroscience 2 (2001), S. 33–42.

Styles, E. A.: The psychology of attention, Hove: Psychology Press, 1997.

Tipper, S. P.: Does negative priming reflect inhibitory mechanisms? A review and integration of conflicting views. In: Quarterly-Journal-of-Experimental-Psychology: Human-Experimental-Psychology 54A (2001) 2, S. 321–343.

Yingling, C. D. & J. E. Skinner: Gating of thamalic input to cerebral cortex by nucleus reticularis thalami. In: Desmedt, J. E. (Hg.), Progress in Clinical Neurophysiology, Vol. 1, Basel: Karger, 1977, S. 70–96.

Zysset, S., Huber, O., Samson, A., Ferstl, E. C. & D. Y. von Cramon: Functional specialization within the anterior medial prefrontal cortex: a functional magnetic resonance imaging study with human subjects. In: Neuroscience Letters 335 (2003) 3, S. 183–186.