
Themenschwerpunkt: Kreativität und Lernen

Das Gehirn ist kein Computer

Neuere Erkenntnisse der Neurowissenschaft

Prof. Dr. Karl-Heinz Brodbeck



[Prof. Dr. Karl-Heinz Brodbeck](#)

Computer sind allgegenwärtig - auch im Denken. Es ist ein allgemeines Vorurteil geworden, daß menschliches Denken wie ein Computer funktioniert. Tatsächlich spricht einiges dafür: Immer mehr Entscheidungs- und Lösungsprozesse werden durch Expertensysteme substituiert. Studenten erlernen bei Planspielen eine simulierte Wirklichkeit. Die enge Zusammenarbeit mit Computern ist längst zum Alltag geworden und hat die Denkweise selbst grundlegend beeinflusst. Theorie und Praxis gehen vielfach stillschweigend von der These aus: *Das Gehirn ist ein Computer*.

Dennoch zeigt die neuere Gehirnforschung, daß die Gleichsetzung von Gehirn und Computer ein *Irrtum* ist. Um den Nutzen und die Grenzen der Computeranalogie beurteilen zu können, ist deshalb ein Blick auf die Ergebnisse der Neurowissenschaft der letzten zehn Jahre sehr hilfreich.

»Denkende Maschinen«

Die moderne Datenverarbeitung gründet in einer mathematischen Theorie, die vor allem Alan M. Turing und John von Neumann entwickelt haben. ⁽¹⁾ Eine Turing-Maschine ist eine Maschine mit endlich vielen Zuständen und einem unendlichen Band. Die Maschine kennt nur binäre Werte 0 und 1 und kann das Band damit beschreiben. Mathematische Verfahren (Algorithmen) können durch Turing-Maschinen ersetzt werden. Was bedeutet das? Der Mechanismus oder der Träger einer Rechenoperation spielt keine Rolle, entscheidend ist nur die innere Logik des Programms. Diese Erkenntnis hat sich im alltäglichen Sprachgebrauch als Trennung von Software und Hardware durchgesetzt. Das Funktionieren eines Programms ist zwar auf *irgendeine* Hardware angewiesen, es ist aber nicht festgelegt, auf *welche* Hardware.

Daraus zog nun Turing einen folgenreichen Schluß: Wenn man, wie einige Philosophen behaupten, das Denken auf *logische Operationen* reduzieren kann, dann können Maschinen denken. Da jedes logische Verfahren durch eine Turing-Maschine ersetzbar ist, besteht zwischen den Vorgängen in dieser Maschine und dem Denken *funktional* kein Unterschied. Es komme, so lautet diese These, beim Denken *nur* auf die reine Funktion an (Software), nicht auf das, womit gedacht wird (organische Speicher oder Siliziumspeicher). Man nennt diese These auch »Funktionalismus«. ⁽²⁾

Turing war überzeugt davon, daß »in ca. 50 Jahren« - er schrieb dies im Jahre 1950 - Maschinen gebaut werden können, die denken. »Wir dürfen hoffen, daß Maschinen vielleicht einmal auf allen rein intellektuellen Gebieten mit dem Menschen konkurrieren.« ⁽³⁾

Nun hat sich aber gezeigt, daß zentrale Qualitäten menschlichen Denkens nicht durch Maschinen zu ersetzen sind: Die Wahrnehmung und Bewertung von Situationen, die menschliche Kreativität und die Entscheidungsfindung. Es ist kein Zufall, daß die von der traditionellen KI-Forschung (die Erforschung der künstlichen Intelligenz) gebauten Maschinen diesbezüglich kaum überzeugen können. Man kann dafür *logische*⁽⁴⁾ und *neurologische* Gründe anführen. *Hier* möchte ich mich auf den zweiten Punkt beschränken.

Modelle des Gehirns - ein kurzer Überblick

Man könnte meinen, in jeder Epoche der Menschheitsgeschichte hätten die Menschen ein anderes Gehirn besessen - legt man wenigstens das zugrunde, was jeweils über das Gehirn gedacht wurde. Für Descartes war es eine Maschine, der an der Zirbeldrüse der Geist eingeflößt werden sollte. Von diesem Modell des »Uhrwerks im Kopf« über das »elektrische Schaltwerk der Gedanken« bis zum »Gehirn als Computer« wurden viele Gehirnmodelle der jeweils zeitgenössischen Technik entlehnt. Es soll im alten Griechenland sogar die These vertreten worden sein, daß Gedanken nach Analogie einer Steinschleuder vom Gehirn herausgeschleudert werden.

Betrachtet man die Gehirnforschung im engeren Sinn, so war lange Zeit die unumschränkt herrschende Auffassung vom Gehirn jene der *Ventrikeltheorie* (s. Abbildung: Gehirnventrikel; Quelle:

Oeser/Seitelberger 1988). Ventrikel sind Hohlräume im Gehirn. Man stellte sich die Nerven wie Röhren vor, die einen »animalischen Geist« transportieren und die Ventrikel aktivieren. Diese gewissermaßen *hydraulische* Gehirntheorie wurde durch die Einsicht verdrängt, daß nicht die Hohlräume, sondern die graue Masse Träger der entscheidenden Prozesse im Gehirn ist. Ausgehend von dieser Einsicht wurden schrittweise Gehirnfunktionen in bestimmten Gehirnregionen lokalisiert (Lokalisationstheorie). Vor allem der große Neuroanatom Franz Gall (1758-1828) versuchte, das Gehirn möglichst genau zu »kartographieren«.

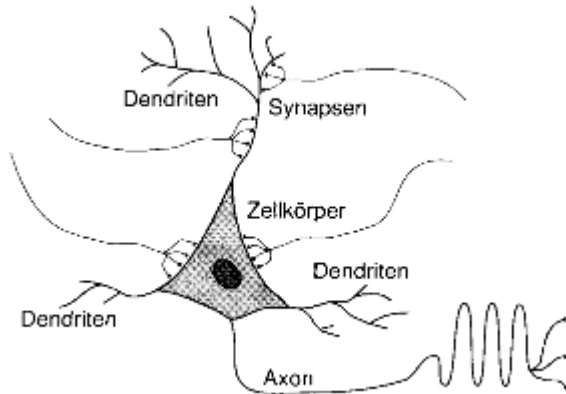


Er glaubte, es gebe 27 grundlegende geistige Bereiche mit festgelegter anatomischer Position im Gehirn. Wichtige Argumente für die Lokalisationstheorie waren die Beobachtungen, daß es bei Verletzungen von Gehirnregionen zu *Ausfallerscheinungen* kam: Sprechunfähigkeit, Lähmungen usw. - aber auch das Gegenteil: Bei »Phantomschmerzen« glaubten Patienten, an bereits amputierten Gliedern Schmerzen zu empfinden. Das wurde teilweise als Argument für die Lokalisationstheorie betrachtet.

Wenn im Gehirn bestimmte Denk-, Sprech- und Bewegungsfertigkeiten lokalisiert sind, so erhebt sich jedoch die Frage: Wie gelangen diese Fähigkeiten *ins Gehirn*? Hier bietet sich als Erklärung die moderne Evolutionstheorie an. In einem sehr langen phylogenetischen Prozeß von Versuch und Irrtum hat sich die *genetische Struktur*, die für den Aufbau und die Zellorganisation der Körperteile bei allen Lebewesen verantwortlich ist, so entwickelt, wie sie heute beobachtet werden kann. Das menschliche Genom - die Gesamtheit aller Gene - müßte, so lautet die naheliegende Folgerung, erblicher Träger aller wesentlichen Gehirnfunktionen sein. Ob braune oder weiße Hautfarbe, ob musikalisch oder unmusikalisch, ob intelligent oder dumm - für alle Eigenschaften sollte letztlich die genetische Information verantwortlich sein. Die Hardware des Körpers und des Gehirns, so lautet eine immer noch sehr populäre Anschauung, werde gesteuert und aufgebaut durch die Software der genetischen Information im Genom. Intelligenz und Kreativität wären demnach ebenso angeboren wie die Fähigkeit, sprechen zu können. Wir werden sehen, daß diese Auffassung nach den neueren Einsichten in die Struktur und Funktion des Gehirns drastisch eingeschränkt werden muß.

Gehirn versus Computer

Werfen wir einen kurzen Blick auf die Struktur des Gehirns. Die wichtigsten »Bausteine« sind die Neuronen. Man kann sich Neuronen als chemisch-elektrische Elemente denken. Diese Neuronen sind vielfältig untereinander verbunden und bilden ein *Netzwerk (neuronales Netz)*. Wichtig an diesen neuronalen Netzen sind die Verbindungen zwischen den Neuronen: die Synapsen. Synapsen kann man als chemisch-elektrische Gewichte betrachten. Sie steuern die *Stärke* der Verbindung zwischen den Zellkörpern.



Äußerlich betrachtet ist das Gehirn nicht sonderlich eindrucksvoll: 1,5 kg graue, unveränderliche und langsam vor sich hinsterbende Zellmasse. Jeden Tag sterben ca. 10.000 Zellen - doch es ist tröstlich, daß dies das Zellvolumen nur unwesentlich vermindert: Das Gehirn besteht aus 20 Milliarden Neuronen (so daß nach 70 Jahren erst etwa 1,3% der Zellen abgestorben sind). Diese 20 Milliarden Nervenzellen (vgl. nebenstehende Abbildung nach Spitzer 1996) können untereinander die vielfältigsten Verbindungen eingehen. Die

Zahl der Verknüpfungen einer Zelle durch Axone mit anderen Zellen liegt zwischen 1.000 und 10.000. Daraus ergibt sich eine schier unvorstellbar große Zahl an Kombinationsmöglichkeiten.

Das bringt allerdings einen Nachteil mit sich: Das Gehirn ist - verglichen mit einem Digitalcomputer - sehr »langsam«. Die CPU eines Prozessors mit 100 MHz leistet 100 Millionen Rechenoperationen in der Sekunde; Nervenzellen sind um den Faktor 10.000 langsamer.⁽⁵⁾ Gleichwohl zeigt sich, daß das Gehirn weitaus zuverlässiger arbeitet. Wenn ein Computer an einer Stelle eine defekte Lötstelle aufweist, ist evtl. die Funktion des gesamten Systems gestört. Werden dagegen einzelne Nervenzellen verletzt, so bleibt die Funktionsfähigkeit des Gehirns erhalten.

Doch der noch weit wichtigere Unterschied zeigt sich im Prozeß der »Informationsverarbeitung«. Das Gehirn arbeitet *parallel*, ein Digitalcomputer *seriell*. Selbst sehr schnelle Computer haben große Probleme bei der Mustererkennung oder der Bildverarbeitung. Ein Gehirn kann ein Gesicht aus einer großen Menschenmenge dagegen sehr rasch erkennen. Der Grund liegt in der *gleichzeitigen* Verarbeitung der visuellen Information. Ein auf der Retina des Auges aufgebautes Bild wird auf *viele* Neuronen gleichzeitig abgebildet. Es aktiviert ein ganzes Netz von Neuronen. Und das verfügbare Potential zur Bildung solcher Vernetzungen ist unüberschaubar groß.

Ein weiterer *Unterschied* zwischen Gehirn und Computer sollte erwähnt werden. Bei einem Prozeß im Gehirn werden nicht einfach Informationen »abgespeichert«. Es gibt keine Trennung von CPU und Speicher. Vielmehr verändert *jede* Wahrnehmung, *jeder* Gedanke die Gewichte in den Verbindungen zwischen den Neuronen (Synapsen). Ganz anders als bei einer Turing-Maschine ist also die Software *nicht* von der Hardware zu trennen. Es gibt inzwischen Bauelemente, die diese Eigenschaft des Gehirns teilweise simulieren können. Wir werden jedoch noch zu zeigen versuchen, weshalb auch simulierte neuronale Netze nicht ausreichen, die Funktionsweise des Gehirns zu verstehen. Doch zuvor wollen wir nochmals zur These, die Gehirnfunktionen seien angeboren, zurückkehren.

Genetik und Gehirn

Ist es möglich, daß die *Struktur* des Gehirns genetisch *vorprogrammiert* ist? Sind also komplexe Leistungen der Intelligenz oder der Kreativität nur genetisch besonders disponierten *Genies* vorbehalten? War diese Frage bislang eher eine *ideologische* Streitfrage, so kann darauf die moderne Gehirnforschung eine recht eindeutige Antwort geben. Das menschliche Genom, der Träger der Erbinformation, besitzt einen Informationsgehalt von rund 750 Megabyte. Das ergibt sich aus der Struktur von etwa drei Milliarden Basenpaaren, aus denen das menschliche Erbgut besteht. Jedes Basenpaar hat einen Informationsgehalt von zwei Bit, das ergibt 6 Milliarden Bit oder 750 Megabyte. Dies ist etwa die Informationsmenge, die bei einer der großen Sinfonien Bruckners oder Beethovens auf CD gespeichert wird. Das Erbmaterial hätte auf einer CD Platz.

Vergleichen wir damit die Kapazität des Gehirns. Selbst bei konservativer Schätzung ergeben sich etwa 1,25 Millionen Megabyte an realisierbaren Vernetzungen. Nun muß man beachten, daß diese Zahl noch erheblich größer wird durch *abgestufte* Verbindungen. Zwischen den Neuronen können über die Synapsenverbindungen vielfältige Zwischenstufen »geschaltet« werden, was die Kapazität des Gehirns um ein Vielfaches erhöht. Spitzer kommt bei nur 16 Abstufungen auf einen Vergrößerungsfaktor von 10^3 . Das heißt: der *einen* CD-Rom, auf der die genetische Erbinformation gespeichert ist, stehen rund 2 Millionen CDs an Speicherkapazität des Gehirns gegenüber. Daraus ergibt sich eine sehr wichtige Folgerung: Wenn das menschliche Denken, Entscheiden und Planen ein Gehirnprozeß ist, dann ist es *unmöglich*, daß die Erbinformation *Träger* dieser intellektuellen Eigenschaften sein kann. *Eine* CD-Rom kann nicht die gesamte Information zur Verknüpfung von Netzen tragen, die eine Informationsmenge von 2 Millionen CDs beinhalten. ⁽⁶⁾

Auch wenn das Gehirn ein Computer wäre, so würde sein Programm ganz sicherlich nicht durch die Erbinformation weitergegeben. Daraus ergeben sich wichtige Folgerungen, auch für Wirtschaftswissenschaftler. Viele Evolutionspsychologen gehen davon aus, daß grundlegende soziale Strukturen, auch *wirtschaftliche* Strukturen, genetisch determiniert seien und sprechen von einer »unbewußten genetischen Steuerung« ⁽⁷⁾. So wird immer wieder gesagt, daß die »Nutzenfunktion«, also die Präferenzen, zeitlich sehr konstant seien ⁽⁸⁾, oder daß das Wettbewerbsverhalten, der wirtschaftliche Egoismus usw. letztlich »angeboren« sei. Meist spricht man etwas nebelhaft von einer »unveränderlichen menschlichen Natur« - was aber, realistisch ausgedrückt, nur unveränderliche Gen-Information bedeuten kann. Auch die Grammatik der Sprache, das soziale Rollenverhalten oder intelligente und kreative Leistungen seien genetisch bedingt (»Geniethorie«). Dieser Gedanke ist in den wirtschaftlichen Alltag eingedrungen. In der Zeitschrift *Wirtschaftswoche* war - um ein einfaches Beispiel zu nennen - die Meinung eines Geschäftsführers zu lesen, der sagte, daß »Nervenzellen im Laufe der menschlichen Entwicklung untereinander verbunden werden müssen. Herausragende Kreativität ist eben nicht beliebig produzierbar und wird sich immer auf wenige Individuen beschränken.« ⁽⁹⁾ Man kann die Motivation der Führungskraft verstehen, die solch ein Statement veranlaßt. Die obige Überlegung aber zeigt, daß dieser Gedanke auf einem grundlegenden Fehlschluß beruht. Die Verbindungen der Nervenzellen im Gehirn können gar nicht *primär* genetisch determiniert sein. Kreativität oder Intelligenz als Fähigkeit des menschlichen Gehirns kann nicht - oder doch nur in sehr geringem Umfang - angeboren sein. Also muß die Bildung von Netzen neuronaler Information *anders* erklärt werden.

Neuronale Netze und Kognition

Wie läßt sich das Gehirn in seinen Funktionen angemessen beschreiben, damit dies in Übereinstimmung sowohl mit den Ergebnissen der Neurologie wie der subjektiven Erfahrung des Denkprozesses zu bringen ist? Hier ist es hilfreich, einen kurzen Blick auf die Entwicklung der neueren Psychologie zu werfen. Die Psychologie als empirische Wissenschaft begann mit der Erforschung von Gedächtnisleistungen. ⁽¹⁰⁾ In zahlreichen Experimenten wurden charakteristische Verlaufsformen beim Lernen festgestellt. Das Gehirn erlernt zunächst rasch, ermüdet dann jedoch

nach einer gewissen Zeitspanne - so jedenfalls interpretierte Ebbinghaus diesen Befund.



Das Lernen, damit die Informationsverarbeitung des Gehirns, erschien hier als *serieller Lernprozeß*. Andere empirische Befunde widersprachen jedoch diesen Ergebnissen. Sie wurden vor allem von der *Gestaltpsychologie* (Max Wertheimer, Wolfgang Köhler, Kurt Koffka) formuliert. Die Kernaussage der Gestaltpsychologie besteht darin, daß in der Wahrnehmung *Gestalten*, nicht serielle Informationen erfaßt werden. Das läßt sich an den bekannten »Kippfiguren« leicht demonstrieren (siehe nebenstehende Abbildung). Gestaltinformationen werden offenkundig nicht nacheinander (seriell) erfaßt, sondern gleichzeitig (parallel). Ferner zeigt sich, daß immer nur *eine* Figur zugleich erkannt wird, deshalb das Phänomen des Umkippen von Vase und

Gesichtern. Eine weitere Komplikation ergab sich durch die Beobachtung, daß Gedächtnisleistungen höchst unterschiedlich sind: Es gibt ein kurzzeitiges Behalten von Eindrücken, und es gibt langfristig erhaltene Informationen.

Ein Versuch, diese Schwierigkeiten zu lösen, wurde von der kognitiven Psychologie unternommen, unter Heranziehung des Computer-Modells. Wenn man Wahrnehmung und Denken als einen *Informationsprozeß* nach Analogie eines Computers mit unterschiedlichen Speichern (Kurzzeit- und Langzeitspeicher) begreift, dann bietet sich folgende Erklärung an: Es gibt begrenzte kognitive Ressourcen (Speicherkapazität). Subjektiv erlebt man diese Begrenzung als »Bewußtsein« oder als »Aufmerksamkeit«. »Aufmerksamkeit ist Verteilung kognitiver Ressourcen.«⁽¹¹⁾ Bewußt ist das, was sich im Kurzzeitspeicher befindet. Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität kann sich die Aufmerksamkeit auch immer nur auf eine begrenzte Informationsmenge richten. So versuchte man zu erklären, daß bei Kippfiguren eben immer nur *eine* Figur gespeichert werden könne.

Doch diese Lösung war in mehrfacher Hinsicht unbefriedigend. Das erste Problem besteht darin, daß sich der Begriff »Ressourcen«, »Speicherkapazität« beim Gehirn für einzelne Funktionen nicht klar definieren läßt.⁽¹²⁾ Ferner ist der Einwand der Gestaltpsychologie - trotz einiger Erklärungsversuche - durch die Analogie mit Digitalcomputern nicht aus der Welt zu räumen. Es bleibt ein grundlegender Unterschied zwischen serieller und paralleler Informationsverarbeitung. Vor allem aber - die Kippfigur in der oben gezeigten Abbildung zeigt das sehr deutlich - ist bei der Wahrnehmung die gebotene Informationsmenge *identisch*. Diese Abbildung bleibt als Druckerschwärze auf weißem Papier völlig unverändert. Die Zahl der Pixel auf der Fläche ändert sich nicht, wenn die Bedeutung von »Gesichter« zu »Vase« umkippt.

Hier bietet ein ganz anderes Modell eine alternative Erklärung an, und diese Alternative beginnt, auch in der Praxis der Computeranwendungen eine wichtige Rolle zu spielen: Die *Theorie neuronaler Netze*.⁽¹³⁾ Auch hier waren es wieder zwei Mathematiker, die die grundlegenden Eigenschaften neuronaler Netze definierten: W. McCulloch und W. Pitts.⁽¹⁴⁾ Die Möglichkeiten dieser Theorie sind noch völlig offen; in unserem Zusammenhang sei nur darauf eingegangen, inwieweit die Theorie neuronaler Netze erlaubt, die Gehirnfunktionen sinnvoll abzubilden.⁽¹⁵⁾ Neuronale Netze *simulieren* durch entsprechende Hard- oder Software die neurologische Struktur des Gehirns *insofern*, als sie nicht von einer festen Verbindung zwischen Informationselementen (Zellen) ausgehen, sondern die Verbindungen zwischen »Zellen« durch *veränderliche Gewichte* darstellen. Computer, die nach Analogie neuronaler Netze aufgebaut werden, können und müssen »angelernt« werden. Man kann Netze *trainieren*. So haben Experimente mit neuronalen Netzen ergeben, daß bei hinreichender Komplexität grammatische Regeln auch von Computern erlernt werden können. Die Lernkurven ähneln sehr stark jenen beim kindlichen Spracherlernen.

Neuronale Netze sind sehr gut geeignet, eine hochkomplexe, insgesamt aber in ihren Zuständen nicht veränderliche Informationsmenge abzubilden. Darin liegt ihre Stärke, aber auch ihre Schwäche. Neuronale Netze werden vielfach mit einer alternativen Form der *Logik* kombiniert - der *fuzzy logic*.

In der fuzzy logic unterscheidet man nicht digital zwischen ja und nein, 1 und 0, man läßt gleichsam »Grauwerte«, Zwischenwerte zu. Fuzzy-logic-Geräte funktionieren ähnlich. Anwendungen finden sich für Camcorder, Waschmaschinen, Steuerungen, Fernsehbildschirme usw. Die fuzzy logic kommt dem menschlichen Empfinden bei *ungefähren* Entscheidungen, bei denen viele Kriterien eine Rolle spielen, viel näher als die »rationale« Entscheidungstheorie. Menschen entscheiden »aus dem Bauch«, das heißt sie verwenden Informationen, die nur zum Teil bewußt sind. Genau dies können neuronale Netze simulieren.

Zwei wirtschaftliche Anwendungen können das verdeutlichen. Bei der Kreditwürdigkeitsprüfung von Banken wurden neuronale Netze eingesetzt. Hier spielen offenkundig zahlreiche, nicht klar zu gewichtende Kriterien und Informationen eine Rolle. Das neuronale Netz wird mit den Informationen der Kunden gefüttert und mit der Performance verglichen. So lernt das Netz auf eine nicht rekonstruierbare Weise die Verknüpfung einer Vielzahl von Kriterien und ihre Wirkung auf die Zuverlässigkeit des Kunden. Eine andere Anwendung ist die Analyse von Wertpapierkursen. Der Informationsgehalt ist hier so hoch, daß die stark vereinfachten Methoden der Chart-Analysten meist nur dann nicht versagen, wenn die Kurse einen stabilen Wachstumstrend aufweisen - wenn man also auch ohne jede Analyse nur durch Stillhalten Gewinne erzielen kann. Tatsächlich ist es gelungen, neuronale Netze an Börsenkursen zu trainieren, so daß sie fähig waren, *ex post* den Kurs sehr genau zu prognostizieren.

Doch hier zeigte sich auch zugleich die große Schwäche dieser Methode und ihre mangelnde Eignung zur Beschreibung des menschlichen Gehirns. Die neuronalen Netze können tatsächlich hoch komplexe Sachverhalte erfassen, die durch keinen Algorithmus, keine Turing-Maschine mehr dargestellt werden können. Der Hauptgrund ist darin zu sehen, daß sich neuronale Netze an jede Strukturänderung anpassen können. Ein Programm müßte jeweils neu geschrieben werden. Gleichwohl hat die Sache einen Haken: Wenn man auf die genannte Weise trainierte Netze zu Prognosezwecken verwendet, dann versagen die Prognosen, sobald sie über einen längeren Zeitraum reichen, ebenso wie »rationale« Prognosetechniken. Der Grund ist leicht einzusehen. Neuronale Netze können zwar eine vorgegebene Struktur, wie komplex sie auch sein mag, gut abbilden. Sie können z. B. die vergangenen Kursbewegungen an der Börse gleichsam *auswendig lernen*. Diese Fähigkeit übersteigt sicherlich die »Rechenleistung« eines Menschen, auch mit Unterstützung eines Digital-Computers. Wo mathematische Verfahren aufgrund ihrer zu einfachen Struktur versagen, können neuronale Netze komplexe Sachverhalte immer noch erfassen.

Doch simulierte neuronale Netze haben gleichwohl, verglichen mit dem *menschlichen Gehirn*, einen wesentlichen Nachteil: Sie können nur etwas erlernen, das auf klare Weise definierbar ist - wie Börsenkurse, oder Einkommen, Alter, Beruf etc. des Kreditnehmers bei einem Bankgeschäft.

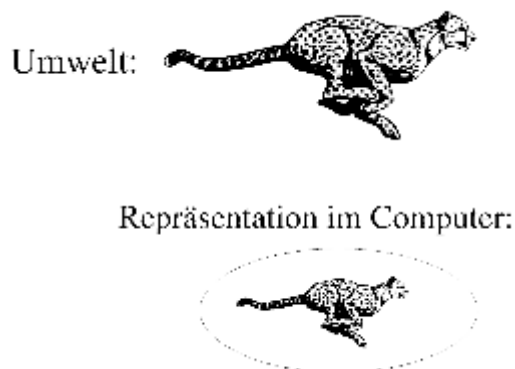
Repräsentationstheorie

Dieser Einwand gegen den Versuch, die Funktionen des Gehirns durch Digital-Computer oder neuronale Netze abzubilden, läßt sich noch verdeutlichen. Diese Analogie unterstellt, daß neuronale Systeme in einer wohldefinierten Umgebung operieren, daß die Elemente dieser Umgebung eindeutig klassifiziert sind und nur *eine Bedeutung* haben. (16) Bereits einfache Kippfiguren zeigen, daß dies nicht der Fall ist. Ob eine »Vase« oder »Gesichter« gesehen werden, ist nicht *objektiv* geben. Das »Gewühl der Erscheinungen« (I. Kant) hat ohne Interpretation durch einen Beobachter überhaupt keinen Sinn für unsere Wahrnehmung.

Und damit zeigt sich etwas sehr Erstaunliches: Die moderne Kognitionswissenschaft dringt durch ganz *praktische* Fragen in Bereiche vor, die bislang als Heiligtum der Philosophie und der Erkenntnistheorie galten. Es stellt sich die alte philosophische Frage: Ist die wahrgenommene Welt überhaupt »real«? Und was heißt »real«? Bevor der Leser diese Frage als abartige Spinnerei der

Philosophie abtut, bitte ich noch um ein bis zwei Abschnitte Geduld. Es handelt sich hier nicht um Philosophie, sondern um das in der traditionellen KI-Forschung ungelöste Problem, wie aus dem »Gewühl der Informationen« ein Sinn, eine Bedeutung erwächst.

Die traditionelle Theorie neuronaler Netze geht von einer Vorstellung aus, die man »Repräsentationstheorie« nennt. Damit ist gemeint, die wahrgenommene Welt und ihre Repräsentation im Gehirn seien *isomorph* (gestaltgleich). Dazu ist nicht notwendig, daß im Gehirn tatsächlich ein »Bild« existiert, wohl aber die *Bedeutung* dessen, was das Bild darstellt. Anders gesagt: Man unterstellt, die Welt lasse sich ganz säuberlich nicht nur in Informations-Bits einteilen, es sei auch möglich, jeder Informationsmenge eine einheitliche *Bedeutung* zuzuordnen. Der Philosoph Richard Rorty sprach in diesem Zusammenhang auch von der These, die Welt sei »sprachförmig«. Nur wenn die Welt klar in Bedeutungseinheiten getrennt ist (»Wörter«), gibt es auch eine Repräsentation dieser Bedeutungen. Die reale Welt besteht aber nun einmal nicht aus Wörtern oder digitalen Bedeutungsträgern. »Bedeutung« ereignet sich erst in der *Wechselwirkung* mit dem Gehirn. Die Frage lautet also: Was meinen wir mit »real«? Wodurch unterscheidet sich ein »realer« Gepard (vgl. nachfolgende Abbildung) von dessen Repräsentation im Gehirn?



Wenn man neuronale Netze betrachtet, die z. B. auf Börsenkurse »trainiert« werden, dann ist der *Trainer* (eine leibhaftige Person mit Gehirn) jene Instanz, welche die »realen« Börsenkurse mit den vom neuronalen Netz generierten Kursen vergleicht. Es wird also etwas *innerhalb eines Modells* verglichen. Wenn wir aber über das Gehirn sprechen, dann gibt es keinen »Metabeobachter«, der das im Gehirn Repräsentierte mit der realen Welt vergleichen könnte. Wir sehen niemals, wie in Abbildung 4, beide »Seiten« zugleich, wir »sehen« nur den Gepard im Oval. Daraus ergeben sich nun keineswegs notwendig jene Schlußfolgerungen, die einige Philosophen zogen: Wir sind keineswegs ins Gehirn »eingesperrt«. Das Gehirn funktioniert ja nur *in Wechselwirkung* mit dem Körper und seiner Umgebung. Deshalb kann man die Funktionen des Gehirns *getrennt* studieren und *dann* daraus Schlüsse ziehen bezüglich jener Prozesse, die wir auch bewußt erleben.

Neuronaler Darwinismus

Von den vielfältigen Theorien der Neurowissenschaften in der Gegenwart zur Erklärung der erwähnten Schwierigkeiten möchte ich eine der vielleicht interessantesten näher vorstellen. Es ist dies die Theorie des *neuronalen Darwinismus* von [Gerald M. Edelman](#).⁽¹⁷⁾ Edelman erhielt den Nobelpreis für eine Theorie des Immunsystems, die wesentlich auf dem Evolutionsgedanken Darwins beruht. Wie kann man das verstehen? Wenn in das Immunsystem ein Fremdkörper eindringt, dann produziert das Immunsystem eine sehr große Zahl höchst unterschiedlicher Antikörper. Gelingt es einem Typus von Antikörper, den Eindringling - z. B. ein Grippevirus - erfolgreich zu bekämpfen, dann fängt dieser Typus Antikörper an, sich sehr rasch zu vermehren. Es

findet eine rasche Anpassung von jenen Antikörpern statt, die dem Immunsystem dienen.

Diesen *Grundgedanken* übertrug [Edelman](#) auf das Gehirn in seiner *Theorie der Selektion neuronaler Gruppen*. Ich will versuchen, diese nicht ganz einfache Theorie so einfach wie möglich zu skizzieren. Wenn ein Mensch geboren wird, ist sein Gehirn kaum strukturiert. Es stehen aber sehr viele *mögliche* Verknüpfungen zwischen Neuronen zur Verfügung. Allerdings erzeugt das Gehirn spontan eine Vielzahl von zufälligen Mustern, die man sich wie elektrische Entladungen vorstellen kann. Mit diesen Mustern sind z. B. Bewegungen der Gliedmaßen oder der Augen verbunden. Jedem dieser Zufallsmuster entspricht eine ganz bestimmte vernetzte Struktur. In der Gehirnforschung spricht man von »Karten« (maps). Wenn ein Säugling mit seinen Händchen gestikuliert und nach einem Spielzeug zu greifen versucht, dann entspricht diese Bewegung solch einer Karte (oder einer Sequenz von Karten). Gelingt es zufällig, das Spielzeug zu ergreifen, dann findet eine »Rückkopplung« über die Sinnesorgane statt: Das Spielzeug wird vorübergehend festgehalten. Diese Rückkopplung löst im Stammhirn ein Signal aus, das Edelman als »Bewertung« bezeichnet. Dieser Bewertung entspricht subjektiv vermutlich eine *Emotion*. Diese Emotion ist im Gehirn ein elektrochemischer Prozeß, der jene Verbindungen zwischen Nervenzellen (Synapsen), die bei dieser Bewegung aktiv waren, verstärkt. Damit »prägt« sich ein Bewegungsmuster ein, es entspricht ihm eine engere Verknüpfung zwischen Nervenzellen. Es steigt damit zugleich die Wahrscheinlichkeit, daß diese neuronale Karte wiederholt wird. Bei *gescheiterten* Bewegungen dagegen werden die Synapsenverbindungen *geschwächt*. Dies löst subjektiv ein »Enttäuschungsgefühl« oder eine neutrale Emotion aus.

Damit wird der Grundgedanke deutlich: Erfolgreiche Bewegungen entsprechen neuronalen Karten, deren Synapsenverbindungen verstärkt werden, je öfter diese Bewegung wiederholt und mit »erfolgreich« emotional (durch die Wertfunktion aus dem Stammhirn) bewertet wird. Das Kleinkind hat langsam eine Bewegung erlernt. Es beginnt das Spielzeug immer sicherer zu ergreifen. Dieses genannte Beispiel gilt für alle Lernvorgänge. Obgleich es Hinweise auf angeborene Reflexe gibt - also »Vorvernetzungen« der Neuronen im Gehirn -, werden die allermeisten Leistungen neu erlernt: Laufen, Greifen, Sprechen usw.

Die neuronale Vernetzung ist keine »Speicherung« an einer bestimmten Stelle des Gehirns. Das ganze Gehirn ist daran beteiligt.⁽¹⁸⁾ Allerdings gibt es Spezialisierungen von Gehirnregionen, wobei die Trennung in linke und rechte Hemisphäre nur die größte dieser Spezialisierungen ist. Einige Nervenzellen spezialisieren sich gleichsam auf bestimmte Typen von Karten. Das heißt nicht, daß dieser Typus irgendwo *neben* der neuronalen Struktur existieren würde: Ein »Begriff«, eine Karte ist vielmehr ein bestimmtes Muster aktiver Nervenzellen. Es prägt sich also nicht ein »Bild« auf ein-deutige Weise ein. Der Grund ist leicht einzusehen: Es gibt immer eine Vielzahl von Nervenzellen, die nur *ein wenig* an einer Karte beteiligt sind, andere *mehr*. Diese unscharfe Logik führt dazu, daß das Gehirn nicht *ein* Bild speichert, sondern ein Bild (»bildlich« gesprochen) mit unscharfen Rändern. Das erlaubt es, solch ein Bild auch bei anderen, ähnlichen Bildern zu aktivieren. Diese Unschärfe ist dem vergleichbar, was Wittgenstein die »Verwandtschaft zwischen Begriffen« genannt hat. Es gibt also im Gehirn nicht eine Bitmap-Datei »Peter.bmp«, die neben einer Datei »Paul.bmp« getrennt gespeichert wäre - vielmehr sind bei »Peter« und »Paul« bei *beiden* Bildern sehr viele *gemeinsame* Nervenzellen aktiv. Der Unterschied zwischen Peter und Paul im Gehirn ist also nicht eine je andere *Repräsentation* (wie ein anderes abgespeichertes Foto in einem eigenen Windows-Ordner), es ist ein unterschiedlicher Aktivitätsgrad vieler *gemeinsamer* Zellen.

Ein zweites Element der Theorie der Selektion neuronaler Gruppen Edelmans ist wichtig. Wenn eine Vielzahl von Karten durch vielfältige Verstärkungen von Synapsen gebildet werden, so entsteht eine Art Resonanz-Phänomen im Gehirn. Eine Karte wird nicht nur mit den Informationen der Sinnesorgane verknüpft, die Karten beginnen zu *interagieren*. Eine Karte, die dem visuellen Eindruck eines Baumes entsprach, interagiert mit einer Karte mit der gehörten Lautfolge »Baum«, und die »Baum«-Neuronen sind wieder teilweise aktiv beim Begriff »Blatt«, »Zweig« usw. Die vom Gehirn selbst initiierten Abbildungen von Karten auf *einander*, jeweils begleitet von den »Wert«-

Signalen des Stammhirns - das ist vermutlich die physiologische Seite des *Denkens*. Das Gehirn kann sich auf diese Weise selbst instruieren, es kann autonom seine Karten verändern («Nachdenken»). Nur 0,1% der Verbindungsfasern im Gehirn dienen für »Input und Output« mit dem übrigen Körper. »Das Gehirn ist vor allem mit sich selbst beschäftigt.«⁽¹⁹⁾

Die Verbindung zwischen neuronaler Struktur und »Wirklichkeit« ist also nicht eine Repräsentation, eine Abbildung. Das Gehirn baut vielmehr eine autonome, in sich geschlossene »Innenwelt« auf. Die Verbindung mit der Wirklichkeit, mit der »Außenwelt« sind die *Handlungen*: die körperlichen Bewegungen, das Sprechen usw. Der *Erfolg* dieser körperlichen Vorgänge ist das, was wir als »Realität« bezeichnen. Die klinischen Studien von Oliver Sacks zeigen sehr deutlich, wie stark sich »innere Realitäten« voneinander unterscheiden.

Das ist auch für die *Wahrnehmung* wichtig. Sicherlich ist es so, daß ein Sinneseindruck in der Wahrnehmung in *direktem* Kontakt zum Gehirn steht und das Gehirn entsprechend aktiviert. Doch erst dann, wenn das so entstehende innere Muster auf *andere* neuronale Karten bezogen wird, erhält eine Wahrnehmung auch eine *Bedeutung*. Andererseits *verändert* jeder neue Sinneseindruck durch Schwächung oder Verstärkung der Synapsenverbindungen die Struktur des Gehirns. Das heißt: Es gibt keine Erinnerung, die *unverändert* bleiben würde. Dies entspricht der alltäglichen Erfahrung: Erinnerungen »verblassen« nicht nur, sie werden auch »verklärt«.

Ein letzter Punkt sollte erwähnt werden. Edelman und noch stärker Israel Rosenfield, der sich teilweise auf Edelman bezieht, betonen immer wieder, daß die Denkprozesse erstens stets *emotional* begleitet werden und zweitens *personale* Prozesse sind. Vor allem dieser zweite Punkt ist wichtig. Was immer wir denken oder wahrnehmen, die *Bedeutung*, die der Wahrnehmung zukommt, ist persönlich. Wir brauchen zahlreiche soziale »Techniken«, um hier *Übereinstimmung* zu erzielen: Von der einfachen demokratischen Abstimmung, über die Dienstanweisung oder den Befehl bis zu den verschiedenen Methoden in den Wissenschaften, *intersubjektive* Aussagen zu bestätigen.

Wahrnehmung und Denken bleiben nicht nur insofern subjektiv, als es sich um »innere« Vorgänge handelt, sie sind auch darin subjektiv, daß die Bedeutungen der Wörter und Dinge zwischen verschiedenen Menschen erheblich differieren. Jedes Gehirn baut seine eigene Welt auf. Da es sich darin aber immer auf eine Umwelt bezieht, ist diese Welt keine bloße Halluzination. Gleichwohl gibt es nicht so etwas wie eine universelle, objektive Bedeutung solcher Dinge wie »Bäume« oder »Geld«.⁽²⁰⁾

Kreativität - Expertensysteme - Emotionen

Edelmans Theorie, die sich sehr rasch einer großen Anhängerschar versichern konnte, ist eine wichtige Grundlage zum Verständnis jener Prozesse, die menschliches Denken und Handeln ebenso erklären wie gegenüber Computern unentbehrlich machen. Vor allem für die Kreativitätsforschung ist damit eine neurologische Grundlage gelegt, die allzu naive Kreativitätsmodelle der Vergangenheit zu überwinden erlaubt. Kreativität ist keine *besondere* Fähigkeit des Gehirns, vielmehr gilt: »Kreativität ist alltäglich«. Kreativität erscheint - so ergibt sich auch aus Edelmans Theorie - *erstens* stets als *personaler* Prozeß. *Zweitens* ist Kreativität als ein Vorgang der *Selektion* aus einer Vielzahl von Mustern zu begreifen. *Drittens* ist Kreativität nicht objektivierbar: Da die neuronale Struktur sich evolutionär und individuell bildet, gibt es auch keinen Algorithmus, keine Methode, die für alle Personen gleichermaßen gültig wäre. Und *viertens* spielt in Edelmans Theorie die *Kreativität der Sprache* eine herausragende Rolle. Daraus ergibt ein ganz anderer Umgang mit der menschlichen Kreativität, der die jeweils eigene Entscheidungs-Situation in den Vordergrund rückt.⁽²¹⁾

Doch auch für andere Bereiche sind die Ergebnisse der Theorie neuronaler Selektion von großer Bedeutung. In wachsendem Umfang werden in der Ausbildung *Planspiele* eingesetzt, und *Expertensysteme* unterstützen oder ersetzen immer mehr betriebliche Entscheidungen. Gerade ihr *Vorteil* - um es paradox zu sagen - ist ihr *Nachteil*. Derartige Systeme mögen komplex sein, sie sind aber in ihrer *Grundstruktur*, ihrem *Programm* starr. Man kann sie zwar mit vielfältigen Daten »instruieren« (Customizing), ihre *Funktionsweise* ist durch das bestimmt, wozu sie programmiert wurden. Planspiele oder Expertensysteme sind eigentlich Turing-Maschinen. Für sie gilt das, was wir oben als Schwäche herausgestellt haben. Die *Kategorien* - z. B. der Kostenrechnung, der Logistik, der Absatzplanung etc. - sind im Programm klar definiert, in der »realen Welt« jedoch keineswegs. Eine der wichtigsten und *unersetzbaren* Leistungen des menschlichen Gehirns ist die kreative Fähigkeit, sich in völlig neuen und veränderten Situationen zurecht zu finden: Es kann seine neuronale Struktur anpassen. Programme können nur neue *Daten* verarbeiten, während ein kontinuierliches Update *der Programme selbst* erforderlich wäre.

Vor allem aber: Nicht nur Edelmans Theorie, auch die Erfahrung zeigt, daß es keinen Denkprozeß ohne begleitende Emotion gibt. Emotionen sind nicht nur kein *Störfaktor*, wie der Rationalismus behauptet, der das Denken auf bloße Logik reduziert. Im Gegenteil. Ohne die Bewertung von kognitiven Karten durch Emotionen, ohne - worauf Oliver Sacks und Israel Rosenfield besonders hinweisen - *Körpergefühl* ist ein sinnvoller und kreativer Denkprozeß *unmöglich*. Die »emotionale Intelligenz«, neuerdings in aller Munde, hat tiefe neurologische Wurzeln. Und diese *notwendige* Dimension fehlt jeder simulierten Cyber-Welt der Expertensysteme und Planspiele.

Ein Gedanke zum Schluß

Menschliche Verhaltensweisen, die auf starren und vordefinierten Kriterien (neuronalen Karten) beruhen, kann man *Gewohnheiten* nennen. Es ist jedoch gerade ein Charakteristikum von Marktwirtschaften, daß sie solche Gewohnheiten beständig neu definieren und immer wieder »kreativ zerstören«. (22) Wer wie ein Computerprogramm, wie eine Turing-Maschine funktioniert, wird auch früher oder später durch einen Computer ersetzbar sein. Man kann das menschliche Gehirn *wie* einen Computer behandeln, doch dann werden seine Möglichkeiten nicht annähernd genutzt - es ist schließlich das »Gehirn«, das Computer baut und programmiert. Werden nur *Gewohnheiten* eingeübt, werden nur *Programme* erlernt und wiederholt, so wird die kreative Dynamik der Wirtschaft solche Gewohnheiten früher oder später selektieren. Wer nicht frühzeitig lernt, die Fähigkeit des Gehirns zur permanenten Variation von Gewohnheitsmustern zu *nutzen*, der wird *mit* diesen Gewohnheitsmustern selektiert. Das gilt für einzelne Menschen, Organisationen, Firmen - es gilt auch für ganze Staaten.

Anmerkungen

1. A.M. Turing, On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem, Proc. London Math. Soc. (42), 1937), S. 250-265; A.M. Turing, Kann eine Maschine denken? (1950); in: Kursbuch 8 (1967), S. 106-138; John von Neumann, Allgemeine und logische Theorie der Automaten; in: Kursbuch 8 (1967), S. 139-175.
2. Vgl. H. Putnam, Minds and Machines; in: S. Hook (ed.), Dimensions of Mind, New York 1960, S. 148-179. Putnam hat diesen Standpunkt später selbst kritisiert. Vgl. die Beiträge in: W. G. Lycan (ed.), Mind and Cognition, Cambridge/Mass. 1990.
3. Turing, Kann eine Maschine denken? a.a.O., S. 117.
4. Vgl. K.-H. Brodbeck, Transrationalität, Münchener Wirtschaftswissenschaftliche Beiträge 86-09,

- München, 1986; jetzt als HTML-Datei: <http://home.t-online.de/home/brodbeck/trans.htm> verfügbar.
5. Vgl. M. Spitzer, Geist im Netz, Heidelberg-Berlin-Oxford 1996, S. 12.
 6. Vgl. zu diesen Überlegungen Spitzer a.a.O., S. 37f.
 7. R. Wright, Diesseits von Gut und Böse, München 1996, S. 63. Ähnlich argumentiert auch Eibl-Eibesfeldt bezüglich vieler sozialer Phänomene; vgl. I. Eibl-Eibesfeldt, Der Mensch - das riskierte Wesen, München-Zürich 1991. Die obige Überlegung schließt keineswegs aus, daß bestimmte Muster tatsächlich vorprogrammiert sind. Daß ihnen aber verglichen mit der unvergleichlich größeren *Veränderbarkeit* der Hirnstruktur eine *dominierende* Bedeutung zukommen soll, ist sehr unwahrscheinlich.
 8. G. S. Becker, Der ökonomische Ansatz zur Erklärung menschlichen Verhaltens, Tübingen 1982, S. 3.
 9. Wirtschaftswoche 4, 16.1.1997, S. 78.
 10. Vgl. H. Ebbinghaus, Über das Gedächtnis (1885), Reprint Darmstadt 1992.
 11. M. G. Wessells, Kognitive Psychologie, New York 1984, S. 96.
 12. »Durch das Fehlen einer genauen Definition von Ressourcen kann das Modell nur unzureichend erklären, warum bei manchen Aufgaben Interferenzen auftreten und bei manchen nicht.« Wessells, Kognitive Psychologie a.a.O., S. 101.
 13. Vgl. D. Nauck, F. Klawonn, R. Kruse, Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme, Braunschweig-Wiesbaden 1996².
 14. W. McCulloch, W. Pitts, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bulletin of Mathematical Biophysics 7 (1943), S. 115-133.
 15. Vgl. für einen sehr guten Überblick M. Spitzer, Geist im Netz a.a.O.
 16. Vgl. auch G. Roth, Das Gehirn und seine Wirklichkeit, Frankfurt/M. 1997, S. 28ff.
 17. Zu den Arbeiten Edelmans vgl. das Literaturverzeichnis.
 18. Viele Anregungen hierzu erhielt ich in Karl Pribrams Seminar »Das [holographische Gehirn](#)«, das er 1987 in der Nähe Münchens hielt. Vgl. K. Pribram, Languages of the Brain, New York 1971.
 19. Spitzer a.a.O., S. 182.
 20. Dieser Aspekt wurde bereits vor Edelman vielfach von den beiden Neurobiologen F. Varela und H. Maturana betont.
 21. Vgl. K.-H. Brodbeck, [Entscheidung zur Kreativität](#), Darmstadt 1995.
 22. Vgl. K.-H. Brodbeck, [Erfolgsfaktor Kreativität](#). Die Zukunft unserer Marktwirtschaft, Darmstadt 1996.

[Becker, G. S.](#), Der ökonomische Ansatz zur Erklärung menschlichen Verhaltens, Tübingen 1982

Brodbeck, K.-H., , [Transrationalität, Prozeßstrukturen wirtschaftlichen Handelns](#), Münchener Wirtschaftswissenschaftliche Beiträge 86-09, München 1986

--, [Entscheidung zur Kreativität](#), Darmstadt 1995

--, [Erfolgsfaktor Kreativität](#). Die Zukunft unserer Marktwirtschaft, Darmstadt 1996

[Darwin, C.](#), [Über die Entstehung der Arten](#), Darmstadt 1992 (Reprint)

Ebbinghaus, H., Über das Gedächtnis (1885), Reprint Darmstadt 1992

Edelman, G.M. Topobiology: An Introduction to Molecular Embryology. Basic Books, New York 1988

--, Unser Gehirn - Ein dynamisches System, München-Zürich 1993

--, Göttliche Luft, vernichtendes Feuer, München-Zürich 1995

--, Jenseits der Computer: Die Simulation des menschlichen Gehirns; in: G. Guntern (Hrsg.), Imagination und Kreativität, Zürich-Berlin-New York 1985, S. 205-268

Eibl-Eibesfeldt, I., Der Mensch - das riskierte Wesen, München-Zürich 1991

Lycan, W. G. (ed.), Mind and Cognition, Cambridge/Mass. 1990

[McCulloch, W., and W. Pitts](#), A logical calculus of the ideas immanent in [nervous activity](#), Bulletin of Mathematical Biophysics 7 (1943), S. 115-133.

Maar, C., E. Pöppel und T. Christaller (Hrsg.), Die Technik auf dem Weg zur Seele. Forschungen an der Schnittstelle Gehirn/Computer, Reinbek bei Hamburg 1996

Maturana, H. R., Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit, Braunschweig-Wiesbaden 1985

[Maturana, H. R.](#), und [F. J. Varela](#), Der Baum der Erkenntnis, Bern-München-Wien 1987

Metzger, W., H. Erke (Hrsg.), Handbuch der Psychologie, Bd. 1: Wahrnehmung und Bewußtsein, Göttingen 1966

Nauck, D., F. Klawonn, R. Kruse, Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme, Braunschweig-Wiesbaden 1996²

Oeser, E., und F. Seitelberger, Gehirn, Bewußtsein und Erkenntnis, Darmstadt 1988

[Pribram, K.](#), Languages of the Brain, New York 1971

Putnam, H., Minds and Machines; in: S. Hook (ed.), Dimensions of Mind, New York 1960, S. 148-179

[Rorty, R.](#), Kontingenz, Ironie und Solidarität, Frankfurt 1989

Rosenfield, I., Das Fremde, das Vertraute und das Vergessene, Frankfurt/M. 1992
--, Kein Erkennen ohne Gedächtnis; in: Maar/Pöppel/Christaller (1996), S. 139-148
Roth, G., Das Gehirn und seine Wirklichkeit, Frankfurt/M. 1997
Sacks, O., Der Mann, der seine Frau mit einem Hut verwechselte, Hamburg 1990
Spitzer, M., [Geist im Netz](#), Heidelberg-Berlin-Oxford 1996
Wessells, M. G., Kognitive Psychologie, New York 1984
Wittgenstein, L., Philosophische Untersuchungen; Schriften 1, Frankfurt/M. 1980
Wright, R., Diesseits von Gut und Böse, München 1996