



Lichtenberg Gesellschaft e.V.

www.lichtenberg-gesellschaft.de

Der folgende Text ist nur für den persönlichen, wissenschaftlichen und pädagogischen Gebrauch frei verfügbar. Jeder andere Gebrauch (insbesondere Nachdruck – auch auszugsweise – und Übersetzung) bedarf der Genehmigung der Herausgeber. Zugang zu dem Dokument und vollständige bibliographische Angaben unter tuprints, dem E-Publishing-Service der Technischen Universität Darmstadt: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de> – tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

The following text is freely available for personal, scientific, and educational use only. Any other use – including translation and republication of the whole or part of the text – requires permission from the Lichtenberg Gesellschaft.

For access to the document and complete bibliographic information go to tuprints, E-Publishing-Service of Darmstadt Technical University: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de> – tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

© 1987-2006 Lichtenberg Gesellschaft e.V.

Lichtenberg-Jahrbuch / herausgegeben im Auftrag der Lichtenberg Gesellschaft.

Erscheint jährlich.

Bis Heft 11/12 (1987) unter dem Titel: Photorin.

Jahrbuch 1988 bis 2006 Druck und Herstellung: Saarbrücker Druckerei und Verlag (SDV), Saarbrücken

Druck und Verlag seit Jahrbuch 2007: Winter Verlag, Heidelberg

ISSN 0936-4242

Alte Jahrbücher können preisgünstig bei der Lichtenberg Gesellschaft bestellt werden.

Lichtenberg-Jahrbuch / published on behalf of the Lichtenberg Gesellschaft.

Appears annually.

Until no. 11/12 (1987) under the title: Photorin.

Yearbooks 1988 to 2006 printed and produced at: Saarbrücker Druckerei und Verlag (SDV), Saarbrücken

Printer and publisher since Jahrbuch 2007: Winter Verlag, Heidelberg

ISSN 0936-4242

Old yearbooks can be purchased at reduced rates directly from the Lichtenberg Gesellschaft.

Im Namen Georg Christoph Lichtenbergs (1742-1799) ist die Lichtenberg Gesellschaft ein interdisziplinäres Forum für die Begegnung von Literatur, Naturwissenschaften und Philosophie. Sie begrüßt Mitglieder aus dem In- und Ausland. Ihre Tätigkeit umfasst die Veranstaltung einer jährlichen Tagung. Mitglieder erhalten dieses Jahrbuch, ein Mitteilungsblatt und gelegentliche Sonderdrucke. Weitere Informationen und Beitrittsformular unter www.lichtenberg-gesellschaft.de

In the name of Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799) the Lichtenberg Gesellschaft provides an interdisciplinary forum for encounters with and among literature, natural science, and philosophy. It welcomes international members. Its activities include an annual conference. Members receive this yearbook, a newsletter and occasionally collectible prints. For further information and a membership form see www.lichtenberg-gesellschaft.de

Friedrich Beck

„Ich denke“ oder „es denkt“ – Lichtenbergs Reflexionen über das Denken im Licht der modernen Hirnforschung¹

„... Wir kennen nur allein die Existenz unserer Empfindungen, Vorstellungen und Gedanken. *Es denkt*, sollte man sagen, so wie man sagt: *es blitzt*. Zu sagen *cogito*, ist schon zu viel, so bald man es durch *Ich denke* übersetzt. Das *Ich* anzunehmen, zu postulieren, ist praktisches Bedürfnis“ (K 76).²

In den Sudelbüchern findet sich diese Reflexion Lichtenbergs über den berühmten Satz René Descartes' „cogito ergo sum“, mit dem dieser versuchte, eine rationale Antwort auf das Leib-Seele-Problem zu finden, und damit den Cartesischen Dualismus begründete. Die Aufklärung ging hart mit diesem Dualismus ins Gericht, da Descartes keine vernünftige Antwort auf das *Wie* der Beziehung zwischen Geist und Gehirn geben konnte. Insofern bewegt sich Lichtenberg mit seiner skeptischen Bemerkung im Strom seiner Zeit. Aber seine Reflexion ist tiefsinniger als die meist zu diesem Problem hervorgebrachte, rein mechanistisch begründete Kritik. Sie leugnet nicht die Eigenständigkeit des Denkens, sondern hebt gerade diese hervor, die nicht durch das *Ich*, sondern durch das *Es* des gedanklichen Prozesses charakterisiert ist. Lichtenberg schreibt dem Denken *Spontaneität* zu. Hier verbinden sich eigene Erfahrungen mit der oft so verblüffenden Modernität seiner Gedankenwelt.

Im Folgenden wollen wir die Entwicklung des Geist-Gehirn-Problems aus historischer Sicht und im Licht der heutigen, mit der Verfügbarkeit neuer experimenteller Methoden rasch voranschreitenden Hirnforschung darstellen.

1. Bewusstsein: Dualismus und Determinismus

<i>Leib</i>	und	<i>Seele</i>
<i>Körper</i>	und	<i>Geist</i>
<i>Gehirn</i>	und	<i>Bewusstsein</i>
materiell		immateriell

Dieses Nebeneinander von Begriffen, die sich einmal auf die *materielle* Existenz unserer Physis beziehen, zum anderen unsere *immaterielle* Lebenserfahrung widerspiegeln, charakterisiert den *Dualismus* des „Rätsels Mensch“.³

Seit den frühesten Zeugnissen setzt sich die Menschheit mit diesem Rätsel auseinander, werden Religion und Kultur, wird die Form des Zusammenlebens durch seine Interpretation geprägt. Ursprünglich wurde der begriffliche Dualismus nicht erkannt, wurde der Seele Materie zugeschrieben, in der Form von Luft oder fein verteiltem Staub, die den Körper durchdringen. Später, in der griechischen Philosophie bei Plato und Aristoteles, wurde die Seele als immaterielles Agens gedeutet, das mit dem Körper in Wechselwirkung steht. Dieses damit erstmals *dualistische* Konzept bereitete der griechischen Naturphilosophie in ihrer eher abstrakten, nicht an der Erfahrung orientierten Vorstellung von Ursache und Wirkung kein Problem. Gleichzeitig postulierte Hippokrates (460-377 v. Chr.), der bedeutende Mediziner der Antike, dass in motorischen Bewegungen das Gehirn der Interpret des Bewusstseins sei: Das Gehirn schreibt den Gliedmaßen vor, wie sie zu agieren haben, und es ist gleichzeitig der Bote des Bewusstseins. Eine konkrete Vorstellung von *Dualismus* und *Interaktionismus* war geboren.

An diesen Vorstellungen änderte sich nicht viel, insbesondere in der Epoche der Scholastik, die ja die griechische Naturphilosophie weitgehend übernahm. Dies dauerte bis zum Ende der Renaissance, als die Philosophie begann, sich dem Rationalismus zuzuwenden. Der große französische Mathematiker und Philosoph René Descartes (1596-1650) legte seine schon zitierte Erklärung der Geist-Körper-Beziehung: *cogito ergo sum* (ich denke, also bin ich) in seinem Traktat „*Principia philosophiae*“ (1644) nieder. Es war dies die kürzest mögliche rationale Formulierung dieser Beziehung, realisiert durch die Wechselwirkung eines nicht materiellen Geistes, der *res cogitans*, mit dem materiellen Gehirn, der *res extensa*. Unglücklicherweise kombinierte Descartes diesen abstrakten Rationalismus mit dem inadäquaten Postulat, die Zirbeldrüse sei das Organ im Gehirn, das unmittelbar von der menschlichen Seele angetrieben werde (siehe Abbildung 1). Das brachte dem *Descartischen Dualismus* schon bald heftige Kritik seiner Zeitgenossen ein, unter anderen von Leibniz und Spinoza.

Mit dem Siegeszug der modernen Naturwissenschaft und ihrem strikten Kausalitätsdenken wurde sodann Descartes' Dualismus immer fragwürdiger. Und Ende des 19. Jahrhunderts wurde die *klassische Physik* in der Form von Newtonscher Dynamik und Maxwellscher Elektrodynamik als vollständige, abgeschlossene und kausale Beschreibung der Welt angesehen, die keinen Raum für eine irgendwie geartete Freiheit übrig ließ. Dies drückte sich am deutlichsten in der Form des *Laplaceschen Dämons* aus: Man gebe einem Superhirn die momentanen Anfangsbedingungen der ganzen Welt, so kann es die Zukunft eindeutig vorausberechnen. *Die Welt spult ab wie ein Uhrwerk!* In diesem Szenarium gab es keinen Raum für ein dualistisches Bild der Geist-Gehirn-Wechselwirkung. Es war die große Zeit des Materialismus, wie es Charles Darwin (1809-1882) sehr drastisch ausdrückte: „Why is thought, being a secretion of the brain, more wonderful than gravity, a property of matter?“

Materialismus wurde allerdings nicht von allen akzeptiert. Zu stark war die auf persönlicher Erfahrung gründende Überzeugung, dass das *Selbstbewusstsein*

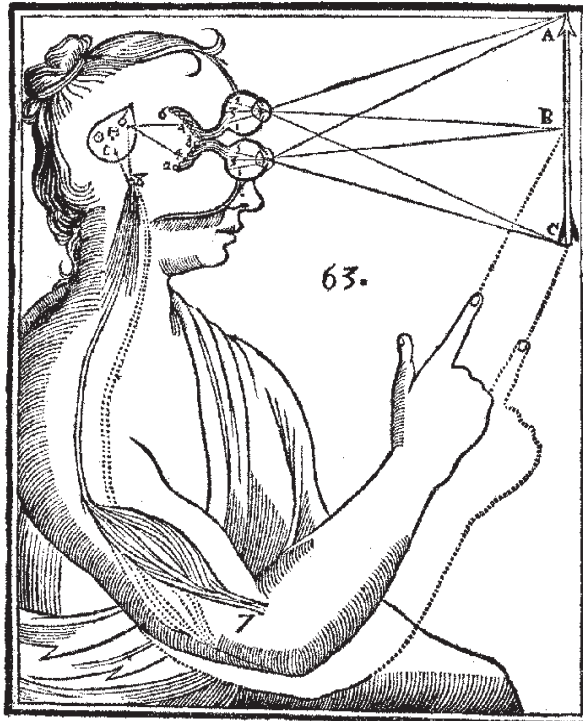


Abbildung 1: Darstellung aus Descartes' „Traité de l'homme“ zu seiner Erklärung der Koordinierung mehrerer Wahrnehmungen. Die ist eine bereits erstaunlich realistische Darstellung des Reiz-Reaktionsmechanismus über eine Art Nervenleitungen zum Gehirn. Die „Schaltzentrale“ wird jedoch fälschlicherweise in die Zirbeldrüse gelegt.

unser Handeln in der Welt bestimmt und dass dies die Fähigkeit zu freien, nicht vorherbestimmten Entscheidungen erfordert. Naturwissenschaftlern war sehr wohl bewusst, dass ein solcher nicht materialistischer Standpunkt einen unüberwindlichen Konflikt mit den Naturgesetzen, denen unser Körper einschließlich des Gehirns unterliegt, bedeutet. Die Ratlosigkeit konnte nicht besser ausgedrückt werden als in einer Adresse des Neurophysiologen und Wissenschaftsphilosophen Emil Du Bois-Reymond (1818-1896), die er 1872 an die 45. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte richtete:⁴

„Es tritt nunmehr an irgendeinem Punkt der Entwicklung des Lebens auf der Erde, den wir nicht genau kennen, und auf dessen Bestimmung es hier nicht ankommt, etwas Neues, bis dahin Unerhörtes auf, etwas wiederum, gleich dem Wesen von Materie und Kraft, und gleich der ersten Bewegung Unbegreifliches (...). Dies neue Unbegreifliche ist das Bewusstsein. Ich werde jetzt, wie ich glaube, in sehr zwingender Weise dartun, dass nicht allein bei dem heutigen Stande unserer Kenntnis das Bewusstsein aus seinen materiellen Bedingungen

nicht erklärbar ist, was wohl jeder zugibt, sondern dass es auch der Natur der Dinge nach aus diesen Bedingungen nie erklärbar sein wird.“

Der Vortrag endete mit der nüchternen Prognose: „ignorabimus“. Das *Unbegreifliche*, wie es Du Bois-Reymond formulierte, hat die Zeit bis heute überdauert. Es wurde von dem österreichisch-britischen Philosophen Karl Popper (1902-1994) in seiner „Drei-Welten-Klassifikation“ alles Existierenden rationalisiert, das die Natur einerseits und Bewusstsein und Kultur vernunftbegabter Wesen andererseits einschließt (Abbildung 2). Poppers drei Welten wurden oft missverstanden, insofern sie als *physisch* verschieden angesehen wurden anstelle von *kategorial* verschieden. Dieses Missverständnis erzeugte harte Kritik an Poppers Klassifizierung, die in dem Vorwurf einer primitiven Version des Cartesischen Dualismus gipfelte. Popper war sich jedoch der epistemologischen Probleme des Geist-Gehirn-Dualismus sehr wohl bewusst und noch kurz vor seinem Tode 1994 begann er erneut eine Diskussion der damit verknüpften Probleme. Eine kritische Diskussion der Standpunkte, wie sie in der gegenwärtigen Debatte vertreten werden, findet sich bei Eccles.⁵

2. Quantenmechanik: die *Akausalität* der Mikrowelt

Unser Denken orientiert sich an den Erfahrungen, die wir durch die Wahrnehmung der Außenwelt mit unseren Sinnesorganen machen. Dies bezieht sich auf *makroskopische* Vorgänge, da wir die *mikroskopischen*, im atomaren Bereich stattfindenden Prozesse nicht unmittelbar *sehen*, *fühlen* und *schmecken* können. Daraus leiten sich zwei für unser Denken ganz wesentliche Vorstellungen ab: das *Gerichtetsein der Zeit* und das *Ursache-Wirkungs-Prinzip*. Ursachen haben eindeutige Wirkungen zur Folge, daraus leitet sich das *Kausalitätsprinzip* der zeitlichen Abfolge von Ereignissen ab. Auch wenn die klassische Thermodynamik mit dem zweiten Hauptsatz ein statistisches Element in den Ereignisablauf einbringt, so glauben wir doch, dass dies nicht *fundamental* ist, sondern lediglich die Unkenntnis der vielen, nicht berücksichtigten Einflüsse widerspiegelt. Die *Grundgleichungen*, mit denen wir die *makroskopische* Welt beschreiben, sind *deterministisch*. Es ist deshalb schwierig, unserem Denken statt des gewohnten *Entweder-oder* ein *Sowohl-als-auch* abzuverlangen. Aber genau das tut die *Quantenmechanik*. Die gedankliche Schwierigkeit, die in der Mikrowelt vorhandene *Akausalität* zu akzeptieren, führt selbst nach einem dreiviertel Jahrhundert überaus erfolgreicher Anwendung der Quantentheorie zu immer neuen Interpretationsversuchen!

Die Essenz der Quantenmechanik lässt sich gut an einem allgemein verständlichen Beispiel darlegen, nämlich dem durch quantenmechanisches *Tunneln* erzeugten *radioaktiven Zerfall* eines Atomkerns. In der klassischen Physik weiß man, dass ein Teilchen, das einen Potenzialberg übersteigen möchte, mindestens die Energie besitzen muss, die nötig ist, um auf den Berg aufzusteigen. In der

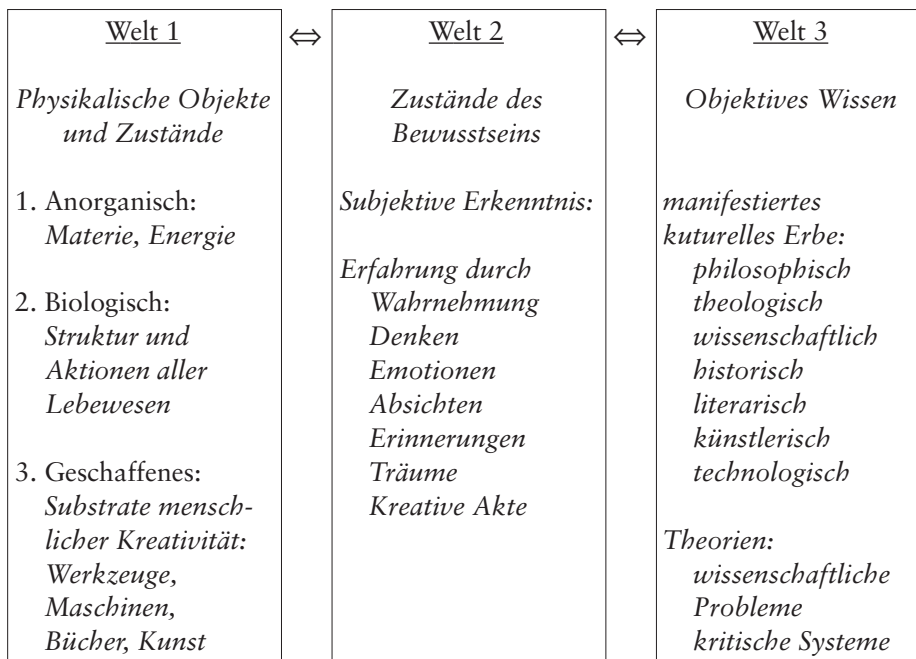


Abbildung 2: Die drei Welten des Karl Popper. Welt 1: materielle Welt der physikalisch existenten Dinge; Welt 2: immaterielle Welt der bewussten Erfahrungen; Welt 3: die Welt des vom Menschen manifest Geschaffenen. Radikaler Materialismus leugnet die Existenz von Welt 2, für die Identitätstheorie bilden Welt 1 und Welt 2 eine untrennbare Einheit. Der Dualismus sieht Welt 1 und Welt 2 als verschieden an, postuliert aber eine Wechselwirkung zwischen beiden.

Quantenmechanik ist dies nicht so. Das Teilchen, das ursprünglich in einem Potenzialtopf gefangen war, kann auch dann, wenn seine Bewegungsenergie unterhalb der Schwelle liegt, durch den Potenzialberg *hindurchtunneln*. Dies geschieht zum Beispiel, wenn ein Atomkern durch Aussendung eines α -Teilchens spontan zerfällt (α -Radioaktivität, Abbildung 3). Genau an diesem Beispiel entdeckte George Gamow 1928 den *quantenmechanischen Tunneleffekt*. Hat man nun ein Ensemble von vielen α -radioaktiven Kernen (zum Beispiel ^{238}U), so nimmt die Zahl der noch vorhandenen Kerne nach einem streng deterministischen Gesetz exponentiell mit der Zeit ab, das heißt, nach Ablauf der Halbwertszeit ist noch die Hälfte der ursprünglichen Anzahl von Kernen vorhanden, nach der doppelten Halbwertszeit ein Viertel und so fort. Betrachtet man jedoch einen *einzelnen*, herausgegriffenen Kern, so ist dessen Zerfallszeitpunkt *völlig unbestimmt*: Der Tunnelprozess liefert zwar eine *Zerfallswahrscheinlichkeit*, die zu dem deterministischen Zerfallsgesetz des Ensembles führt, aber für den Zerfall des einzelnen Kerns besagt

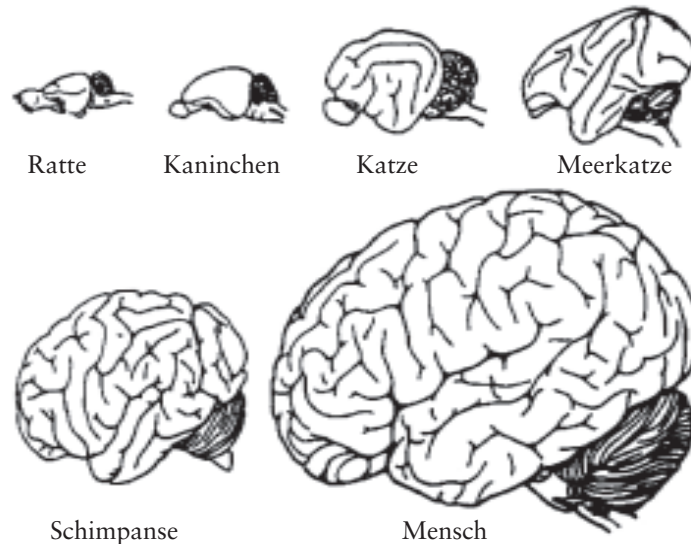


Abbildung 4: Maßstabsgerechte Darstellung von Säugetiergehirnen von der Beutelratte bis zum Menschen. Die Hirnentwicklung nimmt überproportional mit dem Körpergewicht oder der Körpergröße zu!

des *Resultats* vorgenommen werden. Der Übersichtlichkeit halber nehmen wir an, dass, abhängig von den Anfangsbedingungen, nur zwei unterscheidbare Endzustände möglich sind. In der klassischen Dynamik ist der Endzustand *eindeutig* durch den Ausgangszustand festgelegt (strikt deterministisch), das heißt, wir finden als Resultat *entweder* Zustand I *oder* Zustand II vor (Abbildung 3A). Die wesentliche Natur eines Quantenprozesses ist es nun, dass im Gegensatz zum klassischen Verhalten der Endzustand *nicht eindeutig* bestimmt ist (kein strikter Determinismus). Wir haben *weder* Zustand I *noch* Zustand II als Resultat, sondern eine kohärente Superposition beider Zustände: *interferierende* Zustände (Abbildung 3B).

In beiden Fällen ist die Zeitentwicklung des Systems durch hyperbolische partielle Differentialgleichungen erster Ordnung in der Zeit gegeben (Newtonsche oder Maxwell'sche Gleichungen im klassischen Fall, Schrödinger-Gleichung in der Quantenmechanik), die die Dynamik in strikt kausaler Weise beschreiben: Die Anfangsbedingungen bestimmen *eindeutig* das Resultat. Das nichtkausale Element der Quantenmechanik ergibt sich durch einen Reduktionsprozess, der eintritt, falls der Endzustand realisiert werden soll, entweder durch eine vom Beobachter eingeleitete Messung oder durch sich anschließende weitere dynamische Prozesse (*Dekohärenz* durch Wechselwirkung mit der Umgebung). Dieser für die Zeitentwicklung in der Quantenmechanik so entscheidende Prozess ist die von

Neumannsche *Zustandsreduktion*, die der Quantenphysik ihren Kausalcharakter nimmt.⁷ Durch diesen Eingriff *kollabiert* die kohärente Superposition

$$\alpha \cdot |\text{Zustand I}\rangle + \beta \cdot |\text{Zustand II}\rangle$$

in

entweder

$|\text{Zustand I}\rangle$ mit der Wahrscheinlichkeit $|\alpha|^2$

oder

$|\text{Zustand II}\rangle$ mit der Wahrscheinlichkeit $|\beta|^2$

und

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1.$$

Die *Wahrscheinlichkeiten* für die Zustandsreduktion sind durch die Schrödingersche Zeitentwicklung eindeutig festgelegt, aber sie haben Bedeutung nur für ein *Ensemble* vieler gleichartiger Ausgangszustände. Für das *Einzelereignis* – und die Quantenmechanik ist eine Theorie für das Einzelereignis, nicht eine Ensemble-Theorie, wie gelegentlich behauptet wird – sind die Wahrscheinlichkeiten völlig *irrelevant* und das Ergebnis der Zustandsreduktion ist *völlig unvorhersagbar* (vorausgesetzt, dass nicht alle Wahrscheinlichkeiten bis auf eine Null sind, was für die einzig verbliebene den Wert eins bedeutet). Der tiefere Grund für dieses nichtkausale Verhalten liegt in der Heisenbergschen *Unschärferelation*, die für die Observablen der mikroskopischen Welt gilt und die es nicht zulässt, die für eine vollständig deterministische Beschreibung im klassischen Sinn notwendigen Anfangsbedingungen festzulegen. *Die Zukunft in der Quantenmechanik* hat keine *Weltlinienstruktur*, sondern eine *Baumstruktur*, wobei die Verzweigungen durch Wahrscheinlichkeitsamplituden bestimmt werden! Die Zeitentwicklung der Schrödinger-Gleichung transformiert die *Information* über den gegenwärtigen Zustand in die *Möglichkeiten* (von Popper *Propensities* genannt) für die Zukunft, wobei die Äste des Baumes die zukünftigen *Aktualitäten* darstellen. Die zukünftigen *Realitäten* ergeben sich erst durch *Messungen*, die neue Informationen liefern. Dies bedingt den *nicht berechenbaren* Charakter von Quantenereignissen (zum Beispiel den nicht berechenbaren Zeitpunkt des Zerfalls *eines* Urankerns aus unserem Beispiel). Für den hier diskutierten Zusammenhang ergibt sich, dass die deterministische Logik, die dem Cartesischen Dualismus zugrunde liegt und ihn, wie in der Einleitung ausgeführt, in so schweren Konflikt mit der materiellen Welt der klassischen Physik brachte, nicht mehr adäquat ist, falls Quantenprozesse wesentlich die dynamischen Prozesse im Gehirn bestimmen.

3. Der Aufbau des Gehirns: ein komplexes dynamisches System

Zum besseren Verständnis des später vorgestellten Modells der synaptischen Schaltfunktion geben wir hier zunächst einen kurzen Abriss des Aufbaus des Neokortex in seinen wesentlichen Grundzügen. Das Gehirn des *homo sapiens* ist zweifellos die höchste Stufe der Evolution, wie die Gehirnentwicklung vom einfachen Nager über höhere Säugetiere zum Menschen zeigt (Abbildung 4). Die äußerste Schale der Großhirnrinde, der *Neokortex*, enthält circa 100 Milliarden Neuronen, die die Schaltzentrale des Gehirns darstellen. Entsprechend verwir-

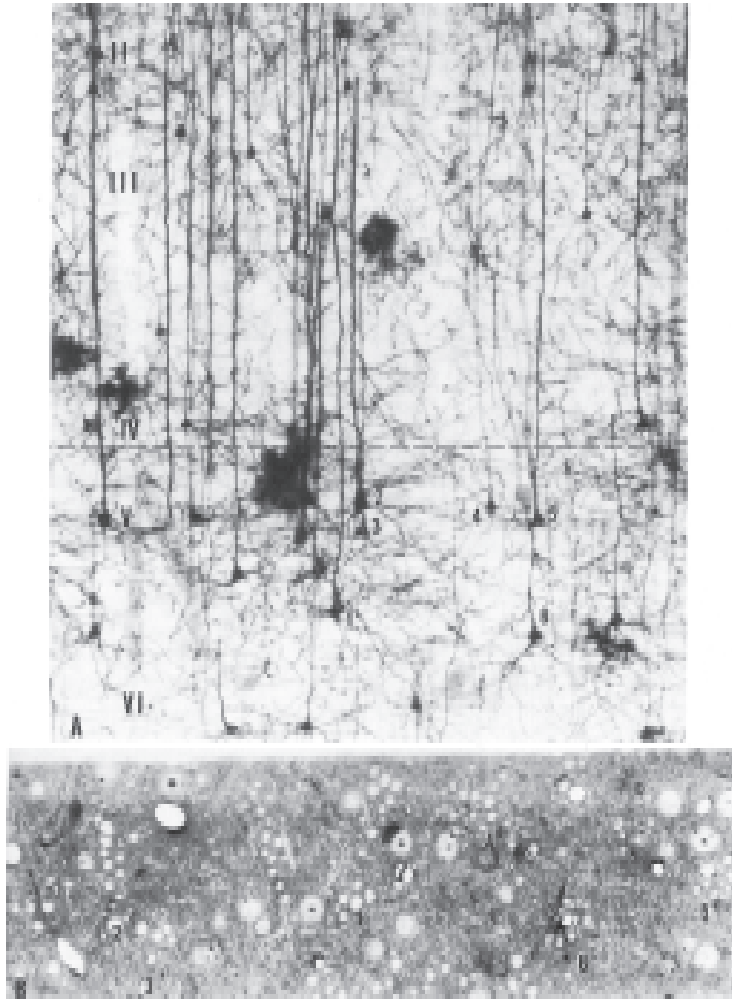


Abbildung 5: (a) Golgi-Präparation des visuellen Kortex einer Ratte im senkrechten Schnitt. Die aufsteigenden und verzweigten Pyramidenzellen sind erkennbar. (b) Tangentieller Schnitt auf der Höhe der in (a) gestrichelten Linie. Er zeigt die Anordnung der Dendriten in Bündeln (nach A. Peters & D. Kara, *J. Comp. Neurol.* 260, 537, 1987).

rend stellt sich das *neuronal*e Netz bei so genannten Golgi-Präparationen von Gehirnsektionen dar (Abbildungen 5), so dass es zunächst vermessen erscheint, mit physikalischen Methoden diese Strukturen analysieren zu wollen. Ausgedehnte Studien haben jedoch gezeigt, dass der Kortex streng hierarchisch aufgebaut ist und durch synaptische Steuerungsprozesse eine klar gegliederte Signalverarbeitung ermöglicht.

Eine schematische Darstellung (Abbildung 6) verdeutlicht diesen hierarchischen Aufbau, dessen Komplexität von der untersten Ebene IV bis zur obersten Ebene I kontinuierlich zunimmt. Abbildung 6A stellt die sechs Ebenen des kortikalen Aufbaus schematisch dar. Man erkennt zwei große Pyramidenzellen in Ebene V, drei in Ebene III und zwei in Ebene II. Die pyramidal aufsteigenden Dendriten enden in einer büschelartigen Verzweigung in Ebene I. Es ist allgemein akzeptiert, dass die sich verzweigenden Bündel von Pyramidenzellen die elementaren anatomischen Einheiten des Neokortex sind. Sie werden in allen Bereichen des Kortex gefunden, die in Säugetieren einschließlich des Menschen untersucht wurden. John C. Eccles ordnet diesen Bündeln die Rolle der kortikalen Einheiten für die Signalerkennung zu, was ihnen eine herausragende Rolle in der Gehirnaktivität zuschreibt.⁸ Da sie wesentlich aus Dendriten bestehen, wurde der Name *Dendron* für sie geprägt.

Abb. 6B skizziert eine typische Dorn-Synapse, in engem Kontakt mit der Verzweigung eines Dendriten einer Pyramiden-Zelle. Die innere Fläche der sackartigen Ausstülpung (Präsynapse) am Ende des Nervenstrangs, die dem synaptischen Spalt (d) gegenüber steht, bildet die präsynaptische Membran (c). Die kugelförmigen synaptischen Vesikeln (sv) enthalten jeweils 5.000-10.000 Moleküle der speziellen synaptischen Transmitter-Substanz (vorwiegend Glutamat oder Aspartat im Kortex), die im Erregungszustand ihren Inhalt durch die präsynaptische Membran (c) hindurch in den synaptischen Spalt (d) entleeren können.

Das neuronale Netz des Neokortex unterliegt einer äußerst komplexen, nicht-linearen raumzeitlichen Dynamik. Die Neuronen generieren durch ihre Impulsaktivität (*Feuern*) einen konstanten *Rauschhintergrund*, der das neuronale Netz als *anregbares System* in die Nähe von *Instabilitäten* (Bifurkationen) bis hin zu chaotischen Zuständen treibt.⁹ Diese Eigenschaft verleiht dem Neokortex seine große Plastizität und die Fähigkeit, zwischen verschiedenen raumzeitlichen Mustern mit wenig Energieaufwand und rasch (Zeitskala: Millisekunden) umzuschalten. In einer solchen Situation spielen die Synapsen als Kopplungselemente zwischen den Neuronen die alles entscheidende Rolle. Durch die Kopplung von Gruppen von Neuronen (Dendronen, siehe weiter vorne) entstehen stabile temporäre Strukturen (*Muster*), die für die im Gehirn ablaufenden Organisationsprozesse bei der Signalverarbeitung und auch bei der Generierung willkürlicher Steuerungsprozesse (visueller Kortex, Sprachzentrum, Bewegungszentrum etc.) verantwortlich sind.¹⁰ Abbildung 7 gibt hierfür ein mithilfe der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) gewonnenes eindrucksvolles Beispiel der Aktivierung verschiedener Gehirnareale durch *Bewusstseinsakte*.

Der stochastische Charakter der Neuronenaktivität lässt sich leicht an einem kleinen Experiment nachweisen. Man betrachte den in Abbildung 8 dargestellten Würfel (*Necker-Würfel*) ganz entspannt und für einen längeren Zeitraum. Man wird dann erleben, dass das im visuellen Kortex erzeugte Bild unvorhersehbare Sprünge vollführt, indem einmal das obere Quadrat als Vorderseite erscheint und ein anderes Mal das untere.

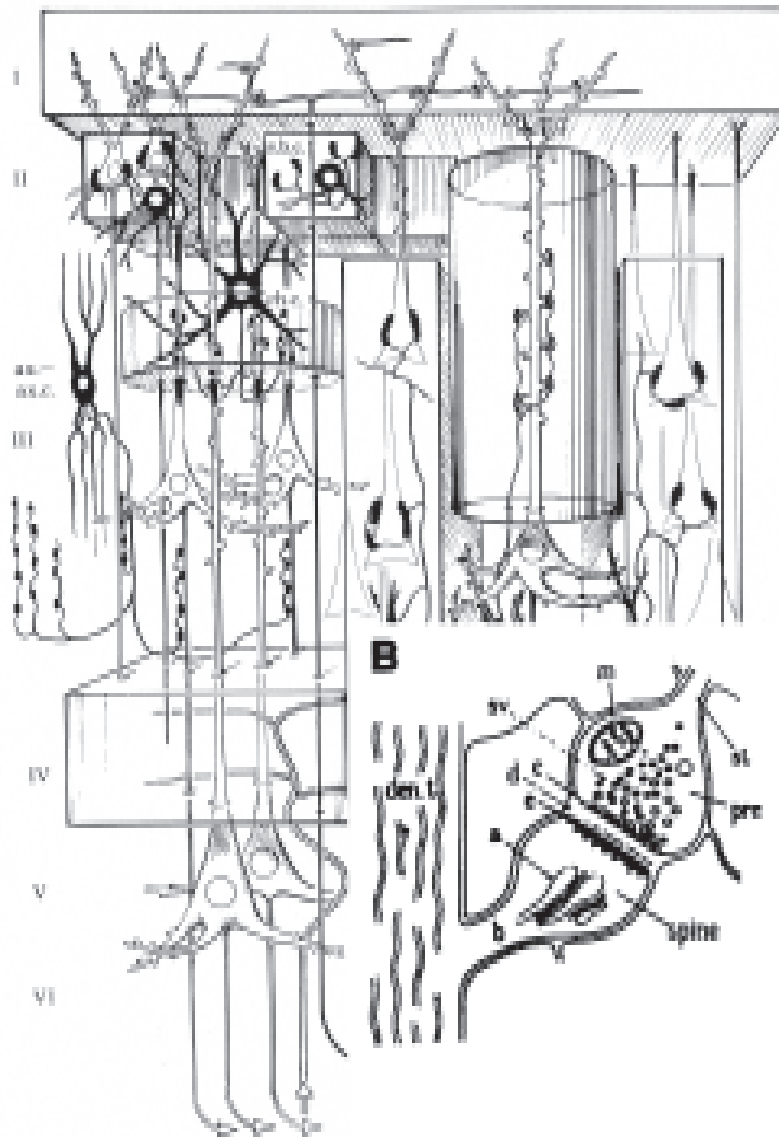


Abbildung 6: (A) Dreidimensionale schematische Darstellung kortikaler Neuronen. Es sind zwei Pyramidenzellen in Ebene V, drei in Ebene III und zwei in Ebene II dargestellt. Die Säule rechts hebt eine Pyramidenzelle aus der Ebene III im Detail hervor. (B) Detaillierte Struktur einer Dornsynapse an einem Dendriten (den.t); st – Axon, das in einer sackartigen präsynaptischen Ausstülpung (Bouton) (pre) endet; sv – synaptische Vesikeln; c – präsynaptische Membran; d – synaptischer Spalt; e – postsynaptische Membran; a – synaptische Rezeptoren; b – Dorn-Fortsatz; m – Mitochondrien (nach Szentagothai, 1978).

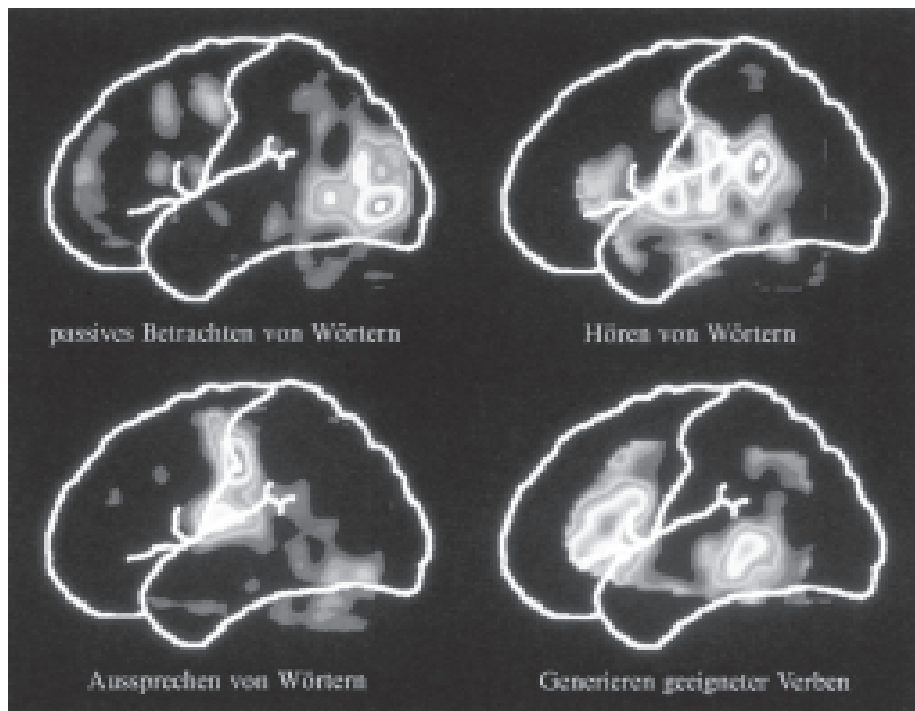


Abbildung 7: Graustufendarstellung von PET-Diagrammen der Aktivierung verschiedener Gehirnareale durch Wortverarbeitung: Hören, Sehen, Sprechen, Wortbildung (M. Raichle, wiedergegeben in Ref. 8, im Original als Fehlfarbdarstellung).

Die Rolle der Synapsen

Ein in die Präsynapse eintretender Nervenimpuls erzeugt dort eine *Depolarisation* der Membran, die den Eintritt von Ca^{2+} -Molekülen ermöglicht. Dies aktiviert die in der Präsynapse enthaltenen *Vesikeln*, an der präsynaptischen Membran anzudocken und im Prozess der *Exocytose* ihre Transmittermoleküle in den synaptischen Spalt zu entleeren. Die Transmittersubstanz öffnet durch Andocken an der postsynaptischen Membran (e in Abbildung 6B) Ionenkanäle, was zu einer kurzen *postsynaptischen Depolarisation* (EPSP) führt. Summation durch elektronische Übertragung vieler Hunderter solcher Milli-EPSPs ist nötig, um eine genügend große EPSP am Soma zu erzeugen, die ein Feuern der Pyramidenzelle veranlasst (siehe Abbildung 9). Dies ist die allgemein in der konventionellen Neurowissenschaft akzeptierte Makro-Operation einer Pyramidenzelle des Neokortex und sie ist Gegenstand der Theorie neuronaler Netze.¹¹

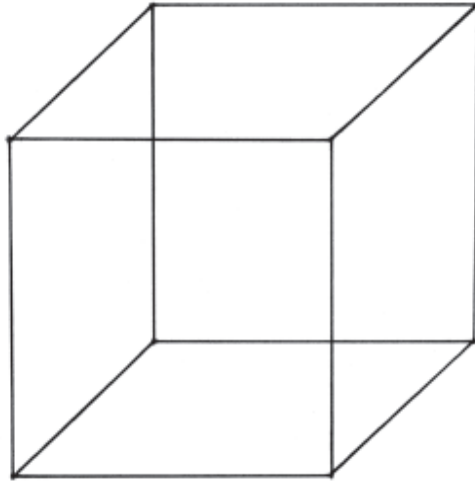


Abbildung 8: Necker-Würfel zur Erzeugung stochastischer Bildwechsel im visuellen Kortex.

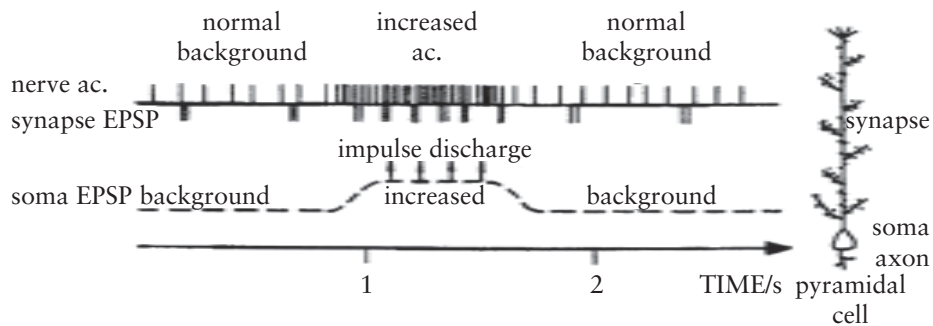


Abbildung 9: Signal-Fortpflanzung in einer Pyramidenzelle (rechte Skizze). (a) obere Zeile: normale Hintergrundaktivität und zwischenzeitlich durch ein Signal von etwa einer Sekunde Dauer verstärkte Nervenaktivität. Durch synaptische Filterung werden reduzierte Impulsfolgen weitergeleitet (untere Zeile). (b) Die am Soma summierten Erregungspotenziale (EPSP) (gestrichelte Anregungskurve) reichen bei normaler Hintergrundaktivität nicht aus, eine Signalweitergabe in das Axon auszulösen. Dies geschieht nur bei erhöhter Aktivität (nach Beck & Eccles, 1992).

Für das Folgende sind zwei Eigenschaften der Exocytose in kortikalen Synapsen wichtig:

1. Die Vesikeln entleeren ihren Inhalt in den synaptischen Spalt ganz oder gar nicht (quantale Emission, kein kontinuierlicher Strom von Transmitter-Molekülen).
2. Nach Eintreffen eines Nervenimpulses erfolgt die Exocytose *statistisch* mit einer Wahrscheinlichkeit, die deutlich kleiner als eins ist. Diese Wahrscheinlichkeit kann durch die Transmittersorte oder das an der Synapse anliegende Aktionspotenzial hoch- oder heruntergeregelt werden. Dies gibt den Synapsen die dominante *Regelfunktion* im neuronalen Netz.

4. Das Quanten-Schalter-Modell

Sollen Quantenprozesse im Gehirn eine Rolle spielen, so müssen sie sich gegenüber dem Rauschen im neuronalen Netz behaupten können. Im Hinblick darauf, dass dieses Netz in eine *heiße und feuchte* Umgebung ($T \approx 300^\circ \text{K}$) eingebettet ist, ist man geneigt, eine solche Möglichkeit von vornherein zu verneinen. Bei genauerer Betrachtung muss man dies jedoch differenzierter sehen. Atomare und molekulare Bestandteile von Materie sind auch bei normaler Umgebungstemperatur in ihrem Grundzustand und nicht thermisch angeregt. Dies liegt an den Energieabständen der Anregungsspektren, die groß sind gegenüber der thermischen Energie. Die Frage ist somit eine nach den thermischen und quantalen Energieskalen. Eine kritische Betrachtung¹² zeigt, dass die Grenze zwischen den beiden Energieskalen bei etwa 1,3 Milli-Elektronenvolt liegt. Dem entspricht eine Zeitskala im Pico-Sekunden-Bereich.

Diese Analyse zeigt, dass in der Dynamik des Gehirns zwei wohl separierte Bereiche mit unterschiedlichen Zeitskalen existieren:

- (i) die *makroskopische* oder zelluläre Dynamik mit Zeitskalen im Milli- bis hinab zum Nano-Sekunden-Bereich.
- (ii) die *mikroskopische* oder Quanten-Dynamik mit Zeitskalen im Pico- bis Femto-Sekunden-Bereich.

Der große Unterschied in diesen Zeitskalen ermöglicht das Studium der Quantenprozesse in den separaten Mikro-Bereichen, wie etwa den Synapsen, und entkoppelt vom neuronalen Netz. Auf der anderen Seite erklärt er, warum die üblichen biochemischen und biophysikalischen Studien nicht die Notwendigkeit zeigen, Quantenprozesse zu berücksichtigen. Um diese zu entdecken, ist es erforderlich, Ultra-Kurzzeit-Spektroskopie zu betreiben.¹³

Das von John C. Eccles und dem Verfasser entwickelte Quanten-Schalter-Modell (siehe Anmerkung 12) berücksichtigt diese für mögliche Quantenprozesse im Gehirn relevante Energie- bzw. Zeitskala. Sie bedingt, dass die Quantenübergänge im Bereich der molekularen Elektronenkonfiguration liegen müssen. Exocytose *als Ganzes* ist sicher ein Prozess der *makromolekularen biochemi-*

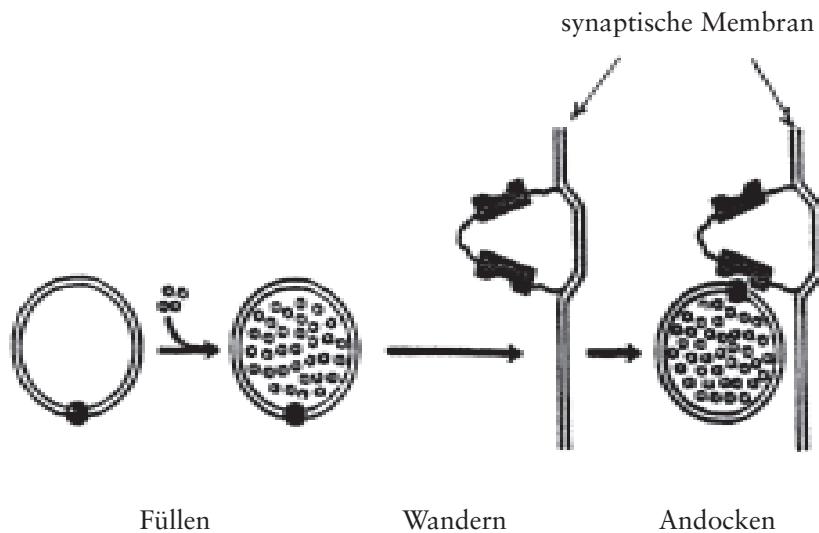


Abbildung 10: Verschiedene Stufen der Entwicklung synaptischer Vesikeln: Füllen, Wandern zur präsynaptischen Membran, Andocken. Nach dem Andocken wird der Quantenschalter wirksam, der den Molekültransport durch die Membran auslöst.

schen Dynamik (siehe Abbildung 10). Wir schlagen deshalb vor, dass sie mikroskopisch durch einen Quanten-Trigger-Mechanismus initiiert wird. Ein eintreffender Nervenimpuls regt eine elektronische Konfiguration der Membran-Moleküle in einen metastabilen Zustand an, der durch eine Potenzialbarriere von dem Zustand getrennt ist, der in einer zeitlich gerichteten Kaskade zur Exocytose führt. Die Bewegung längs dieser Konfiguration wird durch ein *Quasiteilchen* beschrieben, das den gekoppelten Prozess der elektronischen Konformationsänderung und der Verschiebung der Ionenrümpfe als Ganzes beschreibt (Franck-Condon-Prinzip). Dies erlaubt die Behandlung des komplexen molekularen Übergangs als *effektives Einteilchenproblem*. Das Quasiteilchen kann durch die Barriere quantenmechanisch hindurchtunneln. Für physiologisch sinnvolle Werte der in das Modell eingehenden Parameter ergeben sich Exocytose-Wahrscheinlichkeiten kleiner 0,7, in Übereinstimmung mit gemessenen Werten.¹⁴ Die während der Exocytose ablaufenden mikroskopischen Prozesse sind noch nicht hinreichend bekannt, so dass eine quantitativ detailliertere Rechnung derzeit nicht

möglich ist. Elektronentransfer, der zum Ladungstransport durch eine Biomembran führt, wurde bisher lediglich für ein Photobakterium in seinen einzelnen Schritten untersucht (siehe Anmerkung 13).

5. Das „Bindungsproblem“

Neuronale Aktivität in Prozessen der Wahrnehmung oder des intendierten Handelns sind durch charakteristische raumzeitliche Muster in bestimmten Arealen des Gehirns charakterisiert, die durch *Selbstorganisation* zustande kommen (siehe Anmerkung 10). Aktivierte Regionen zeichnen sich durch einen erhöhten lokalen Bluttransport aus, der mithilfe der PET registriert werden kann. Die Aktivierung erzeugt komplexe Muster, die für spezifische sensorische Wahrnehmungen oder Handlungen charakteristisch sind. Beständige Strukturen dieser Art sind mit wahrnehmendem Lernen und der durch Lernprozesse erfolgten Prägung der Pyramidenzellen verknüpft (siehe Abbildung 7). Da in den neuronalen Bündeln, die die aktive Zone des Kortex charakterisieren, Tausende von Synapsen sitzen, müssen diese *kohärent* agieren, um die Muster zu erzeugen. Synapsen können jedoch nur ihre Exocytose-Wahrscheinlichkeit verändern (erhöhen oder erniedrigen). Somit muss eine (unkoordinierte) Hintergrundaktivität an Nervenimpulsen vorhanden sein, die bei der Musterbildung *synchronisiert* wird. Dieser in der Neurowissenschaft als *Bindungsproblem* bezeichnete Prozess ist bis heute weitgehend ungeklärt und wird zum Teil in divergierenden Ansätzen behandelt.¹⁵

Aufgrund empirischer Evidenz und erfolgreicher Ansätze für die Modellierung lässt sich langreichweitiges kooperatives Verhalten in der aktiven kortikalen Zone durch das Verhalten eines nichtlinearen und getriebenen offenen Systems verstehen. Solche Systeme sind weit ab vom thermischen Gleichgewicht und nahe der Instabilität. Sie können durch externe Stimulation eine Vielzahl von synchronen aktiven Strukturen erzeugen. Synaptische Exocytose dient in solchen Systemen als *Regulator* und die synchrone Kooperation der vielen Synapsen eines Pyramiden-Zellbündels produziert die raumzeitlichen Strukturen oberhalb des Rauschens. Quantenprozesse in den einzelnen Synapsen und anschließende Zustandsreduktion erzeugt die *nicht-algorithmische* Bindung in den Zellbündeln, die die Aktivität des Kortex vom Verhalten eines klassischen Computers unterscheidet.

Die Naturwissenschaft kann *in ihrem Geltungsbereich* keine Antwort auf *philosophische, ethische* und *religiöse Fragen* geben. Sie kann aber, und sie tut dies durch die Rolle der *mikroskopischen Prozesse*, die *Offenheit* bereitstellen, die eine Diskussion jenseits der Grenzen der Naturwissenschaft ermöglicht. Das *offene Weltbild* der heutigen Physik, charakterisiert durch *Quantenmechanik* und *nichtlineare Dynamik*, hat die alte Kontroverse zwischen Dualismus und Materialismus weitgehend obsolet gemacht (Abbildung 11).

Die Welt spult nicht ab wie ein Uhrwerk!

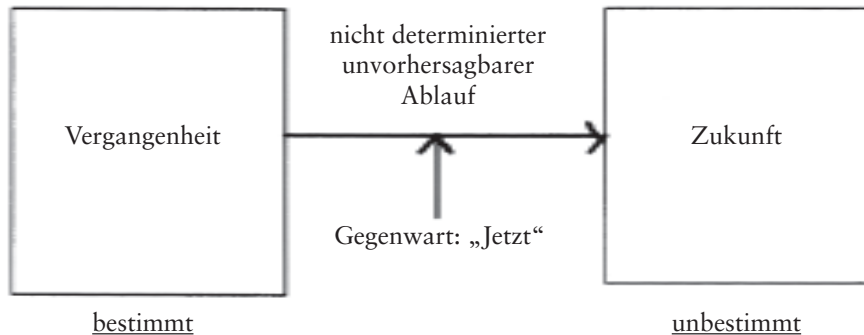


Abbildung 11: Das offene Weltbild der heutigen Physik. Aus der bestimmten Vergangenheit folgt durch den nicht determinierten, unvorhersagbaren Ablauf die unbestimmte Zukunft.

6. Zurück zu Lichtenberg

„... Es scheint, als wenn allen Entdeckungen eine Art von Zufall zum Grunde läge selbst denen, die man durch Anstrengung gemacht zu haben glaubt ... wir machen neue Species, aber Genera können wir nicht schaffen, das muß der Zufall tun ... Hierher gehört was ich an einem andern Ort gesagt habe, dass man nicht sagen sollte: ich denke, sondern *es denkt* so wie man sagt: *es blitzt*.“ (L 806)

„Wie viel Ideen schweben nicht zerstreut in meinem Kopf, wovon manches Paar, wenn sie zusammen kämen, die größte Entdeckung bewirken könnte. Aber sie liegen so getrennt, wie der Goslarische Schiefer vom Ostindischen Salpeter und dem Staube in den Kohlenmeilern auf dem Eichsfelde, welche zusammen Schießpulver machen würden ...“ (K 308)

„Wie nah wohl zuweilen unsere Gedanken an einer großen Entdeckung hinstreichen mögen?“ (F 423)

Vor dem Hintergrund der hier vorgetragenen neuen Erkenntnisse der Hirnforschung und des spontanen und nicht vorhersagbaren Charakters der Hirntätigkeit erscheinen diese Bemerkungen Lichtenbergs als erstaunlich vorausschauende Erahnung der Wirklichkeit!

- 1 Vortrag auf der 25. Jahrestagung der Lichtenberg-Gesellschaft am 29. Juni 2002 in Ober-Ramstadt.
- 2 Lichtenbergs Sudelbücher werden nach der Nummerierung von W. Promies zitiert. Meinem Kollegen Peter Brix danke ich sehr herzlich für seinen Hinweis auf die zitierten Stellen in den Sudelbüchern.

- 3 Es ist interessant, dass in dieser Gegenüberstellung der Begriff *Dualismus* die gleiche Bedeutung hat, wie sie Nils Bohr bei der Entwicklung der Quantentheorie verwandte (*Welle-Teilchen-Dualismus*): die Zusammenfassung zweier *komplementärer* Begriffe, die *beide* zu einer vollständigen Beschreibung der Phänomene benötigt werden.
- 4 Emil Du Bois-Reymond: *Über die Grenzen des Naturerkennens*. Leipzig 1916.
- 5 John C. Eccles: *How the Self Controls Its Brain*. Berlin; Heidelberg 1994.
- 6 Diese Feststellung ist der Ausgangspunkt für *Schrödingers Katze*, ein Gedankenexperiment, das noch heute vielfach in Diskussionen über die Interpretation der Quantenmechanik zitiert wird.
- 7 John von Neumann: *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton / NJ 1955. In diesem Buch (Kap. IV) beschreibt von Neumann die Differenz zwischen statistischem Ensemblegesetz und Einzelereignis sehr drastisch: „*The everything leveling of the law of large number obscures completely the real nature of the single process*“.
- 8 John C. Eccles: *Evolution of the Brain: Creation of the Self*. London; New York 1991.
- 9 Walter Freeman: *Random activity at the microscopic neural level in cortex („noise“) sustains and is regulated by low-dimensional dynamics of macroscopic cortical activity („chaos“)*. *Internatl. J. Neural Systems*, 7, 1996, 473.
- 10 Wolf Singer: *Search for coherence: a basic principle of cortical self-organization*. *Concepts Neurosci.*, 1, 1990, 1.
- 11 János Szentágothai: *The neuron network of the cerebral cortex: a functional interpretation*. *Proc. R. Soc. London B201*, 1978, 219.
- 12 Friedrich Beck, John C. Eccles: *Quantum aspects of brain activity and the role of consciousness*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 89, 1992, 11357.
- 13 Marten H. Vos u. a.: *Visualization of coherent nuclear motion in a membrane protein by femtosecond spectroscopy*. *Nature* 363, 1993, 320.
- 14 Friedrich Beck: *Quantum brain dynamics and consciousness*. In: *The Physical Nature of Consciousness*, Ph. Van Loocke, Editor, John Benjamin, Amsterdam, Philadelphia, 2001.
- 15 Wolf Singer: *Neuronal synchrony: a versatile code for the definition of relations?* *Neuron*, 24, 1999, 49.