

"L'homme machine" von La Mettrie im Lichte der modernen Neurobiologie

Autor(en): **Hepp-Reymond, Marie-Claude**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Gesnerus : Swiss Journal of the history of medicine and sciences**

Band (Jahr): **43 (1986)**

Heft 3-4

PDF erstellt am: **16.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-521418>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

«L'Homme Machine» von La Mettrie im Lichte der modernen Neurobiologie *

Von Marie-Claude Hepp-Reymond

Einleitung

1747 erschien anonym in Leyden/Holland ein Werk mit dem herausfordernden Titel «L'Homme Machine», dem in Göttingen tätigen Berner Physiologen Albrecht Haller gewidmet. Dieses Buch, das ohne Scham und Vorsicht materialistische Ideen pries und dessen Erstauflage wohl fast vollständig von den Autoritäten verbrannt worden ist, wurde von der philosophischen und wissenschaftlichen Welt sehr schnell *Julien Offray de La Mettrie* zugeschrieben.

Wer war La Mettrie? Das bekannte Portrait von G. F. Schmidt zeigt einen gutgelaunten, lebenslustigen, vielleicht sogar frivol aussehenden Mann. Geboren wurde er 1709 in St-Malo in der Bretagne, also zu Beginn des Jahrhunderts der Aufklärung, fünfzehn Jahre später als Voltaire. Nach einem kurzen, bewegten Leben starb er 1751 in Berlin im Exil am Hof des Königs Friedrich des Großen, der ihn 1748 nach der Publikation des «L'Homme Machine» freundschaftlich aufgenommen hatte. In einer öffentlichen Sitzung der Academie von Berlin wurde ein würdiger und bewegender Nachruf auf La Mettrie verlesen, der vom König persönlich verfaßt war und aus dem die folgenden biographischen Daten stammen (1752). Nach Besuch einer jansenitischen Schule und nach einem Physikstudium wurde La Mettrie mit 19 Jahren Arzt. Er vertiefte seine Ausbildung bei dem weltberühmten Mediziner Boerhaave in Leyden, dessen Werke er übersetzte. Als Arzt war er zunächst in St-Malo und später in Paris tätig, offenbar mit sehr gutem Erfolg, denn er wurde Arzt der französischen Garden im Dienste des Herzogs von Grammont und nahm an einer Reihe von Feldzügen teil. Bei der Belagerung von Freiburg zog er sich ein heftiges Fieber zu, und während dieser Krankheit beobachtete er an sich selbst interessante Beziehungen zwischen seinem körperlichen Zustand und seinen geistigen Fähigkeiten, was

* Antrittsrede, gehalten an der Universität Zürich am 4. Februar 1985.

ihn bewog, 1745 eine «Naturgeschichte der Seele» zu verfassen. Diese und weitere kritische Schriften brachten ihn in so starken Gegensatz zu den Theologen und Medizinern in Paris, daß er 1746 nach Leyden übersiedeln mußte, wo er sein Hauptwerk «L'Homme Machine» veröffentlichte. Die dadurch hervorgerufene Empörung zwang ihn in ein letztes Exil nach Preußen (Quépat, 1873).

Was beinhaltet «L'Homme Machine», daß solche Reaktionen ausgelöst wurden? Kurz gesagt: die Ausdehnung der cartesianischen Maschinentheorie der Tiere auf den Menschen. Im Gegensatz zum rationalistischen Denker Descartes stützt sich La Mettrie auf seine persönlichen Erfahrungen mit Krankheiten und kranken Menschen und auf medizinische Beispiele der Wirkungen von Schlaf, Drogen, Nahrung, Klima, Sexualität und des Alterns auf die Seele. Diese empirischen Daten sind die Grundlagen seiner materialistischen Philosophie. Sicherlich war La Mettrie durch die Maschinen seiner Zeit beeinflusst, durch Uhren und durch die Automaten von Vaucanson, durch die fressende und verdauende Ente und den Flötenspieler, der 12 Stunden lang musizieren konnte (Maingot, 1959; Beyer, 1983). Aber diese Kunstwerke waren nur Metaphern für La Mettrie, der den Menschen als eine biologische Maschine ansah, der sich nur in seiner Spezialisierung von den anderen Tieren unterschied. In diesem Sinne ist La Mettrie ein Naturwissenschaftler, der seine wissenschaftliche Hypothese durch Beobachtungen über den Zusammenhang zwischen physiologischen und psychischen Prozessen erhärtet und der seine Zeitgenossen aufruft, die Fackel des Experiments zu ergreifen. Daher ist La Mettrie mehr ein Vorläufer der experimentellen Psychologie als ein Naturphilosoph (Vartanian, 1960). Seine Schlußfolgerung ist, daß die Seele ein Produkt unseres Gehirns ist und, wie er sagt: « ... *pourquoi faire double ce qui n'est évidemment qu'un.*¹ ... *Dispute à présent qui voudra!*²»

Im folgenden seien einige der Thesen aus «L'Homme Machine» aus der Sicht der modernen Neurobiologie erörtert.

Bausteine

Die Bausteine der «Menschenmaschine» vergleicht La Mettrie mit den Triebfedern eines Uhrwerks. Mit treffenden medizinischen Beispielen kann er den Leser vom maschinenhaften Ablauf der reflexartigen Bewegungen und Verdauungsmechanismen im Körper überzeugen. Dann kommt die neuartige These, daß analoge physiologische Prinzipien auf das Gehirn

anwendbar sind: « ... *le Cerveau a ses muscles pour penser, comme les jambes pour marcher. Je veux parler de ce principe incitant et impétueux qu'Hippocrate appelle ενοουων (l'Âme). Ce principe existe, et il a son siège dans le cerveau à l'origine des nerfs, par lesquels il exerce son empire sur tout le reste du corps.*»³

Als La Mettrie diese Zeilen schrieb, waren die Kenntnisse des Aufbaus des Gehirns noch sehr unvollständig. Daß Nerven Verbindungen zwischen dem Hirn und den Muskeln bzw. den Augen herstellen, wußte man, nichts aber von den Nervenzellen, den Neuronen. Zwar waren die von Hallerschen Arbeiten über die Erregbarkeit der Muskeln wahrscheinlich bekannt (1753), aber es brauchte noch ein halbes Jahrhundert bis zur Entdeckung der Bioelektrizität durch Galvani (1791). Heute wissen wir, daß das menschliche Nervensystem aus etwa 100 Milliarden Nervenzellen besteht, die trotz ihrer vielfältigen morphologischen Formen strukturell einander, und zwar überall im Tierreich, sehr ähnlich sind. Ein Neuron besitzt einen Zellkörper. Es empfängt seine Information über Dendriten und Zellkörper und leitet sie weiter über eine Nervenfasern, Axon genannt. Einen raschen Informationsfluß innerhalb eines Neurons vermitteln elektrische Potentiale, die über größere Distanzen als Aktionspotentiale der Nervenfasern entlang bis zu den Synapsen laufen, deren Ultrastruktur recht gut erforscht worden ist (Akert et al., 1972). Die elektrische Informationsübertragung zwischen verschiedenen Nervenzellen wird an der Synapse in komplexe chemische Prozesse umgesetzt, die heute von der Neurochemie und Pharmakologie intensiv erforscht werden. Es zeigt sich jetzt – und hier hatte der Mediziner La Mettrie die richtige Einsicht –, daß Störungen dieser subtilen elektro-chemischen Prozesse mit neurologischen und psychiatrischen Erkrankungen parallel laufen.

Weiter heißt es in «L'Homme Machine»: « ... *la volonté ayant pour Ministres une légion invisible de fluides plus vifs que l'Eclair et toujours prêts à la servir! Mais comme c'est par les Nerfs que son pouvoir s'exerce; c'est aussi par eux qu'il est arrêté.*»⁴ Man kann aus dieser Intuition La Mettries zwei fundamentale neurobiologische Mechanismen herauslesen, die heute klar bewiesen sind: Erstens erregen gewisse Nerven und daher Neurone nicht, sondern wirken hemmend. Die koordinierte Funktionsweise des Zentralnervensystems basiert auf der Wechselwirkung von Milliarden von entweder erregenden oder hemmenden Neuronen. Zweitens werden Neurotransmitoren und andere «fluide» Modulatoren nicht nur lokal im synaptischen Spalt ausgeschüttet, sondern können auch die Gehirnaktivität global beeinflussen.

Also besteht unser Gehirn, wie es La Mettrie geahnt hatte, aus einer

einzigsten Substanz von Triebfedern, den Nervenzellen, die miteinander nach bestimmten Schaltplänen verknüpft sind und die Informationen durch elektrische Erregung und Ausschüttung von spezialisierten Substanzen vermitteln. Die Neurone unterscheiden sich weniger durch ihre Natur als durch ihre Lokalisation im Netzwerk und durch ihre synaptische Wirkung, oder mit den Worten von La Mettrie: « ... *si ces ressorts diffèrent entr'eux, ce n'est donc que par leur Siège et par quelques degrés de force, et jamais par leur Nature*». ⁵

Aufbau

Nicht nur die neuronalen Bausteine des Gehirns sind überall im Tierreich die gleichen, sondern auch die anatomischen Baupläne sind – von der Wirbeltierreihe bis zum Menschen – einander sehr ähnlich. «*En général, la forme et la composition du cerveau des Quadrupèdes est à peu près la même que dans l'Homme. Même figure, même disposition partout; avec cette différence essentielle, que l'Homme est de tous les animaux celui qui a le plus de cerveau, et le cerveau le plus tortueux, en raison de la masse de son corps: ...*» ⁶ Die Einsicht, daß sich in der Struktur des Gehirns kein wesentlicher Unterschied zwischen Tieren und Menschen zeigt, ist zur Zeit von La Mettrie nicht neu. Schon in der Antike war diese Idee von Herophilus und Erasistrates formuliert worden, und der große Anatom Vesalius war im 16. Jahrhundert zum Schluß gekommen, daß bei Affe, Hund, Pferd, Katze und anderen Vierbeinern das Gehirn das des Menschen in fast allen Einzelheiten nachahmt. In «*L'Homme Machine*» betont La Mettrie, gestützt auf die Beobachtungen von Willis, dem Vater der vergleichenden Neuroanatomie, nicht nur die Ähnlichkeit zwischen den Wirbeltierarten, sondern auch die Unterschiede. So liegt der größte Unterschied zwischen Mensch und Tier in der Komplexität des Gehirns. Betont wird dabei eine phylogenetische Progression. Jedoch ist nach La Mettrie nicht die Quantität wichtig, sondern die Qualität, und « ... *was man an Geist gewinnt, verliert man an Instinkt!*» ⁷

Diese Einsichten werden in der Neurobiologie bestätigt, die zeigt, daß in der Entwicklung zum Menschen nicht nur die absolute Größe des Gehirns zunimmt, sondern vor allem der Anteil der Großhirnrinde wächst, des sogenannten Neocortex, während andere Gehirngebiete, wie im Zwischenhirn das Steuerzentrum für Instinktverhalten, relativ abnehmen. Weiterhin

zeigt sich die Ausweitung der menschlichen Großhirnrinde in den Assoziationsgebieten, die nicht dem einfachen Empfang der sensorischen Information oder der direkten Kontrolle der Bewegungen gewidmet sind. So zeigt sich, makroskopisch gesehen, keine abrupte qualitative Änderung der Gehirnstruktur beim Übergang vom Tier zum Mensch, sondern eher eine kontinuierliche quantitative Zunahme von spezifischen Gebieten des Neocortex und anderer Strukturen, die mit typisch menschlichen Aktivitäten, wie der Manipulation und der Sprache, zusammenhängen.

Organisationsprinzipien

Was wissen wir heute über die Organisation des Gehirns, die nach La Mettrie ihren höchsten Grad beim Menschen erreicht hat und für seine höhere Leistung verantwortlich ist? La Mettrie schreibt: *«Mais puisque toutes les facultés de l' Ame dépendent tellement de la propre Organisation du Cerveau et de tout le Corps qu'elles ne sont visiblement que cette Organisation même, voilà une Machine bien éclairée»*⁸ ... *«L'organisation suffiroit-elle donc à tout? Oui, encore une fois; Puisque la pensée se développe visiblement avec les organes...»*⁹

Am Beispiel des Neocortex seien hier die Organisationsprinzipien des Gehirns erläutert. Seit dem letzten Jahrhundert weiß man, daß die Großhirnrinde aus verschiedenen Neuronentypen aufgebaut ist und aus Schichten besteht (Abb. 1), die man schon mit dem Lichtmikroskop gut sichtbar machen kann. Die Dichte der verschiedenen Schichten ist nicht überall im Cortex gleich. Eindrucksvoll ist trotz lokaler Variationen die Homogenität der zellulären Architektur der Hirnrinde bei allen Säugetieren. Diese besteht aus wenigen Neuronentypen, die sich überall wiederholen. Trotz starker Unterschiede in der Dicke des Cortex bleibt die totale Anzahl der Neurone im Querschnitt durch die Cortexdicke fast überall konstant. Sie beträgt von der Maus bis zum Menschen etwa 100 Neurone in einem Zylinder von $750 \mu\text{m}^2$ senkrecht durch die Cortexoberfläche, mit immer gleichem Verhältnis der verschiedenen Neuronentypen (Rockel et al., 1980). Mit anderen Worten: die Entwicklung des Cortex zeigt sich in einer vergrößerten Oberfläche und nicht in einer neuartigen lokalen Organisation. Diese Daten erlauben es, die Neuronenzahl in der Hirnrinde abzuschätzen. Der menschliche Cortex mit seinen beiden Hemisphären hat eine Oberfläche von etwa 22 dm^2 und damit mindestens 30 Milliarden Neurone, und eine Ratte, mit $4,5 \text{ cm}^2$ corticaler Oberfläche, besitzt etwa 65 Millionen Zellen. Dieser evolutive Mechanismus erlaubt eine Komplexitätszunahme ohne große konstruktive Kosten.

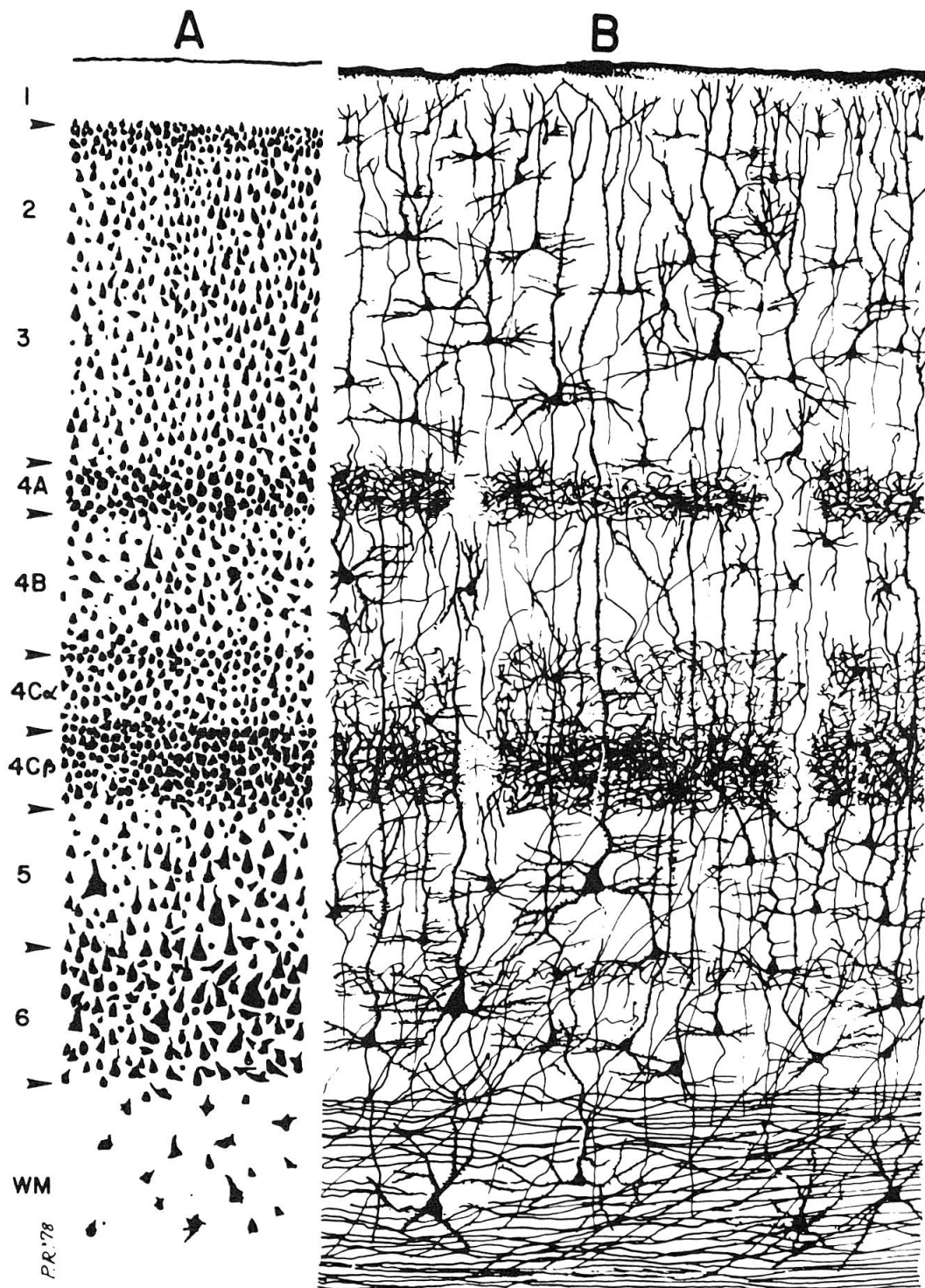


Abb. 1: Diagramm der Schicht- und Säulenorganisation in der visuellen Hirnrinde. Links (A): die Zytoarchitektur zeigt den Schichtenaufbau. Rechts (B): typische Neurone und Verteilung der afferenten Fasern in Streifen oder Säulen von ca. 350–400 μ m Breite (aus Rakic, 1979)

Wodurch nimmt die Komplexität zu? Die Zahl der synaptischen Verbindungen verhält sich proportional zum Cortexvolumen und wird von den Anatomen auf ca. 600 Millionen pro mm^3 geschätzt (Colonnier, 1981). Die Komplexität der Verbindungen im menschlichen Cortex ist also enorm und auch heute noch kaum vorstellbar. La Mettrie hatte nur eine schwache Analogie in den Maschinen seiner Zeit: «*Des Roues, quelques ressorts de plus que dans les Animaux les plus parfaits*»¹⁰ und weiter «*Il (l'homme) est au Singe, aux animaux les plus spirituels, ce que le Pendule Planétaire de Huygens est à une Montre de Julien le Roi*». ¹¹ Die Stereotypie der corticalen Organisation erinnert an unsere modernsten Maschinen: die Netzwerke elektronischer Rechner. Diese sind auf ähnlichen Grundprinzipien aufgebaut, nämlich auf einer vielfachen Wiederholung von integrierten Schaltungen mit wachsender Leistung bei zunehmender Verschaltungskomplexität. Der Vergleich zwischen Gehirn und Computer sollte aber nicht auf den konstruktiven Elementen basieren, sondern auf der Ähnlichkeit der zu bewältigenden Aufgaben, die bei beiden auf eine *moduläre Struktur* führt. Dies soll im folgenden ausgeführt werden.

Die Hauptfunktion des Cortex ist die höhere Verarbeitung der sensorischen Information in Perzepte und die Elaboration von Zielbewegungen. Diese komplexen Transformationen benötigen eine Organisation, die von den Reflexbögen des Rückenmarks grundlegend abweicht. Jedes corticale Gebiet wird durch seine Eingänge und Ausgänge definiert, die mit modernen Tracer-Methoden nachweisbar sind. Die Eingänge kommen einerseits von den verschiedenen Sinnesorganen über eine oder mehrere Schaltstationen, die letzte im Thalamus, und andererseits aus dem Cortex selber. Die Ausgänge laufen zu corticalen und subcorticalen Gebieten und zu den für die Motorik wichtigsten Integrationsstrukturen, wie Hirnstamm und Rückenmark. Eingänge und Ausgänge eines bestimmten corticalen Gebietes folgen einem sehr genauen modulären Schaltplan. So fanden zuerst Powell und Mountcastle (1959) in den dem Tastsinn zugeordneten Rindenzellen, senkrecht durch den Cortex, Neuronensäulen von etwa 0,5 mm Breite, die nur auf eine Submodalität ansprechen. Diese *Säulenorganisation* des sensorischen Eingangs ist ein allgemeines Bauprinzip des Cortex, das auch in der Sehrinde und Gehörinde nachgewiesen wurde. Diese durch spezifische Ein- und Ausgänge definierten Module, senkrecht durch die Cortexoberfläche, findet man bei allen Säugetieren, von der Ratte bis zum Menschen. Ihre Zahl nimmt proportional zur Cortexoberfläche zu und wird beim Menschen auf etwa 600 Millionen geschätzt.

In den sensorischen Gebieten gilt ein weiteres Organisationsprinzip, das *Prinzip der Nachbarschaft*: die Projektion von der Peripherie bis zum Cortex ist topologisch in dem Sinne, daß die Nachbarschaftsbeziehungen in den peripheren Sinnesorganen bis zum Cortex erhalten bleiben. Dieses topologische Prinzip ist bedingt auch für den motorischen Cortex gültig, wo Reizung von benachbarten Punkten Zuckungen in Nachbarmuskeln in der Peripherie hervorrufen (Woolsey, 1958). Die Zuordnung corticaler Module zu verschiedenen Körperteilen weist Verzerrung auf, da funktionell wichtige Teile, wie die Schnauze bei der Ratte oder die Hand bei den Affen, eine relativ größere Zahl von Modulen beanspruchen. Beim Menschen wurde diese Organisation von Penfield (1950) gefunden und Homunculus genannt.

Nachbarschaftsbeziehung und moduläre Organisation sind die Aufbauprinzipien des Neocortex, die eine funktionelle Zusammenfassung der vielen interzellulären Verbindungen ermöglichen. Theoretische Folgerungen der modulären Organisation des Cortex wurden von Mountcastle und Edelman (1978) ausgearbeitet. Grundsätzlich wird das Gehirn, und vor allem seine höchste Instanz, der Neocortex, als ein distributives System angesehen. So werden je nach Moment, Empfindungen oder motorischen Aufgaben bestimmte Gruppen von Modulen funktionell zusammengeschaltet oder getrennt. So kann ein Modul in vielen verschiedenen Situationen mitwirken, und viele Module sind gleichzeitig aktiviert. La Mettrie sagt dazu in der Sprache seiner Zeit: *«Je ne me trompe point, le corps humain est une horloge, mais immense, et construite avec tant d'Artifice et d'Habileté, que si la roue qui sert à marquer les secondes vient à s'arrêter; celle des minutes tourne et va toujours son train.»*¹² Wie kommt La Mettrie auf eine solche Idee? Wiederum stammen seine Beispiele, die heute selbstverständlich sind, aus der Medizin, so z. B. daß ein Verlust des Sehens das Gehör nicht beeinträchtigt oder daß ein Patient hören kann, ohne aber sagen zu können, was er hört. Das Prinzip, auf das La Mettrie hinweist, ist die Redundanz oder die *multiple Repräsentation einer Funktion*. So kann ein einziger lokalisierter Eingriff im Gehirn eine Funktion nicht total ausschalten, weil meistens noch ein parallel geschalteter Ersatzweg aktivierbar ist.

Während die Lokalisationstheorien im 19. Jahrhundert jedem Gehirnareal eine einzigartige Funktion zuordneten, kam in diesem Jahrhundert der Psychologe Lashley zum Schluß, daß im Gehirn keine Funktion topographisch repräsentiert, sondern über große Teile der Hirnrinde verteilt sei (1931). Nur der Umfang des zerstörten Cortexmaterials bestimme nach einem Gesetz der Massenwirkung die Funktionsstörung. Gegner dieser

holistischen Theorie warfen Lashley vor, daß seine Experimente über das Orientierungsvermögen bei Ratten in einem Labyrinth unschlüssig waren. Die moderne Neurobiologie unterstützt, mit dem Nachweis eines modulären Aufbaus der Hirnrinde und des daraus folgenden Prinzips der *distributiven Kooperativität*, ein holistisches Modell der Gehirnfunktionen. Experimente haben eindeutig mehrfache topographische Projektionen eines Sinnesorgans, z. B. des Auges, des Gehörs und des Tastsinnes, auf den Cortex nachgewiesen. So gibt es für den Hautsinn beim Affen nicht nur einen «Simiusculus» (Äffchen), sondern mindestens drei (Kaas et al., 1979). In jedem dieser Simiusculi ist die Hand topologisch dargestellt. Jede Körperrepräsentation hat aber einen bestimmten Grad von Spezialisierung in den Submodalitäten: mehr Hautsinn in zwei Arealen und mehr Information aus den Gelenken in dem dritten. Zum großen Teil kommt die sensorische Information von spezialisierten Rezeptoren zu den verschiedenen Repräsentationen über parallele Kanäle.

Ebenso besteht eine mehrfache Repräsentation von motorischen Funktionen, wie im folgenden Beispiel aus der Augenmotorik. Im Wachzustand machen unsere Augen dauernd kleine, schnelle Bewegungen, sogenannte Sakkaden. Bei der Erzeugung visuell evozierter Sakkaden sind mehrere Gebiete beteiligt, die Augenfelder im frontalen Cortex und der Colliculus im Hirnstamm. Beide sind Ausgangsstationen eines weitverzweigten Netzwerkes. Wird nur ein Ausgang zerstört, so bleibt der Sakkadengenerator funktionsfähig. Werden beide Systeme ausgeschaltet, dann verschwinden die visuell evozierten Sakkaden auf irreversible Weise. Jedoch zeigt eine quantitative Analyse der Ausfälle eine graduelle Spezialisierung beider Wege: So verschwinden ohne Colliculus Sakkaden mit extrem kurzen Reaktionszeiten, während ohne frontale Augenfelder Sakkaden zu erinnern Zielen erschwert sind (Goldberg, 1984).

Diese Beispiele zeigen deutlich die Einsicht von La Mettrie, daß im Gehirn durch parallele Wege eine starke Sicherheit eingebaut ist. Ebenso eindrucksvoll wie die Redundanz ist jedoch auch die *Spezialisierung* gewisser Areale. Beim Menschen hat man eine einzigartige Lokalisation der Sprache nur in einer Großhirnhemisphäre gefunden, und zwar in der linken bei 92 % der Rechtshänder. Spezialisierte Hemisphärenleistungen hat Sperry (1974) bei epileptischen Patienten untersucht, bei denen aus therapeutischen Gründen die Fasern, die die beiden Hemisphären verbinden, durchtrennt worden waren. In diesem Falle mußte jede Hirnhälfte selbständig arbeiten. Sieht der Patient z. B. nur mit der rechten Hirnhälfte eine

schöne Frau, so reagiert er emotionell, aber er kann nicht sagen warum, wenn er gefragt wird. Wird das gleiche Bild der linken Hemisphäre gezeigt, so folgt unmittelbar die verbale Beschreibung. So ist offenbar die alte Frage, ob das Gehirn hierarchisch oder parallel aufgebaut ist, heute mit «sowohl als auch» zu beantworten.

Das menschliche Gehirn ist nicht nur wunderbar aufgebaut, sondern auch außerordentlich lernfähig, wie es schon La Mettrie hervorhob: «*Si l'organisation est un mérite, et le premier mérite, et la source de toutes les autres, l'instruction est le second. Le cerveau le mieux construit, sans elle, le seroit en pure perte; comme, sans l'usage du monde, l'Homme le mieux fait ne seroit qu'un paysan grossier.*»¹³ Weiterhin, findet La Mettrie, ist das Gehirn für das Lernvermögen wesentlich, so daß ein Verhältnis zwischen Gehirnvolumen und Grad der Lernfähigkeit besteht. Mit größerer Dozilität entwickeln sich beim Menschen die höheren Geistesfähigkeiten im Kontrast zu den wenig flexiblen Programmen der Instinkte, die bei phylogenetisch tieferen Tieren das Verhalten dominieren.

Ende des 19. Jahrhunderts postulierte William James in seinen «Principles of Psychology» (1890), daß die Bildung von Gewohnheiten auf einer fundamentalen Eigenschaft des Nervensystems beruht, die er *Plastizität* nennt. Die moderne Neurobiologie unterscheidet mehrere Arten von Plastizität im Gehirn. Zum ersten gibt es die Plastizität während der Ontogenese, d. h. des sich entwickelnden Nervensystems, die auch nach der Geburt noch Wochen bis Jahre dauern kann, mit makroskopisch sichtbaren Veränderungen, z. B. in den neuronalen Verbindungen. Zweitens gibt es eine Plastizität bis ins Alter bei Lernprozessen. Hier hat man heute molekulare Änderungen der Membraneigenschaften bei Invertebraten experimentell nachgewiesen. Eine dritte Art von Plastizität ist notwendig, um Reparaturen im Nervensystem durchzuführen. Wichtig ist die Tatsache, daß zerstörtes Nervengewebe im Zentralnervensystem nicht mehr regeneriert. Daher spielt für die Rehabilitation nach traumatischer Ausschaltung ganzer Nervenbahnen oder Neuronennetze die vorher erwähnte Redundanz eine wesentliche Rolle.

Höhere geistige Funktionen

Zum Schluß sei auf die reduktionistische Beschreibung der Seele der Menschmaschine durch La Mettrie eingegangen: «*Je me sers toujours du mot **imaginer**, parce que je crois que tout s' imagine, et que toutes les parties de l' Ame*

*peuvent être justement réduites à la seule imagination qui les forme toutes.»*¹⁴ Für La Mettrie ist das Vorstellungsvermögen, d.h. das Bewußtsein, die höchste Leistung des Gehirns (*«Cette partie fantastique du cerveau»*¹⁵). Sie umfaßt nach ihm alle höheren Leistungen des Gehirns: Denken, Urteilsvermögen, Symbolik, Sprache, d.h. alle Leistungen, die dem Menschen eigen sind und ihn von den anderen Tieren unterscheiden. Weiter ist nach La Mettrie ohne Zweifel das Vorstellungsvermögen durch die Hirnaktivität bedingt, obwohl, wie er sagt, *«dont la nature nous est aussi inconnue que sa manière d'agir»*.¹⁶

Das Problem des Bewußtseins und der inneren Vorstellungen gehört zu den ältesten Problemen der Philosophie, die in den extremsten Standpunkten zu den Theorien des Dualismus und des Materialismus geführt haben. Die Psychologie hat zunächst geistige Funktionen unabhängig von ihrem organischen Substrat untersucht. Bemerkenswert ist der Versuch von Wundt (1832–1920), aus der Psychologie eine Naturwissenschaft zu machen, in der nicht nur das objektive Verhalten, sondern auch die subjektiven Zustände meßbar werden sollten (1914). Für ihn – wie für die Psychophysiker seiner Zeit – war es klar, daß der Sitz der Vorstellungen im Gehirn liegt. William James schrieb zur gleichen Zeit: *“Most medical writers assume that the cerebral activity on which imagination depends occupies a different seat from that subserving sensation. It is, however, a simpler interpretation of the facts to suppose that **the same nerve-tracts are concerned in the two processes.** Our mental images are aroused always by way of association; some previous idea or sensation must have ‘suggested’ them. Association is surely due to currents from one cortical centre to another.”*¹⁷ Hier werden mögliche Mechanismen vorgeschlagen, die in den fünfziger Jahren von Hebb (1949) elaboriert wurden. Dieser spekulierte, daß jedes Bild und jeder Gedanke aus der Bildung von Zellfamilien in den assoziativen Arealen besteht, die die Aktivierung der sensorischen Rezeptoren für kurze Perioden überdauern und dabei strukturelle Änderungen im Sinne des Lernens verursachen. In zentralen Prozessen sollen Interaktionen zwischen Zellfamilien eine bedeutende Rolle spielen. Diese Idee der dynamischen Kooperativität von Zellmodulen ist in der theoretischen Neurobiologie der letzten Jahre sehr aktuell geworden (Edelman, 1978).

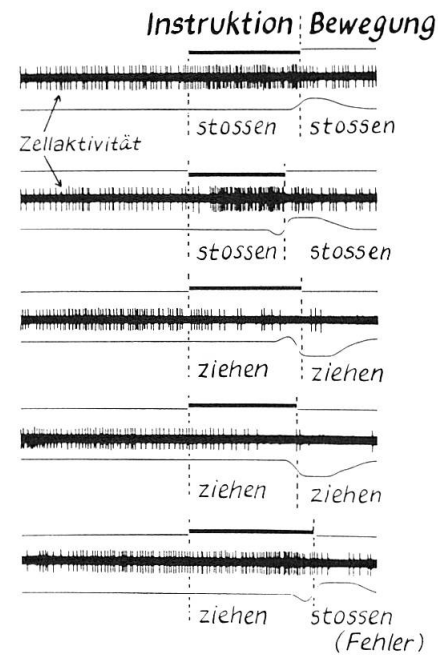
Was wissen wir über den Beitrag der Assoziationsgebiete des Neocortex zu den geistigen Funktionen? Beim Menschen kennt man viele klinische Bilder, die der Zerstörung bestimmter assoziativer Areale folgen. In den Agnosien sind die sensorischen Eingänge intakt, aber Perzeptionen wie das

Erkennen von Gesichtern sind gestört, und ähnlich versagen bei Apraxien höhere motorische Funktionen wie das Zeichnen einer Uhr, ohne daß der Patient gelähmt ist. Eine psychophysische Quantifizierung von Funktionen und eine rein klinische Beschreibung von Dysfunktionen ist jedoch nicht hinreichend, um die sich in den corticalen Arealen abspielenden Prozesse zu erklären. Hier trifft die experimentelle Neurobiologie auf ein fast unlösbares Problem: Wie kann man beim Menschen oder bei höheren Tieren, z. B. beim Affen, die Beteiligung von Milliarden von Neuronen an der Erzeugung von inneren Vorstellungen untersuchen? Gibt es nichtinvasive Methoden, die über die zeitliche und räumliche Wechselwirkung corticaler Module Auskunft geben können? Während langer Zeit hat die Hirnforschung nicht gewagt, die Funktionen der assoziativen Gebiete zu erforschen, doch wurden im letzten Jahrzehnt, gestützt auf neue experimentelle Methoden und auf theoretische Vorstellungen über modulare Operationen, einige zwar bescheidene, aber doch signifikante Fortschritte gemacht, die am folgenden Beispiel der corticalen Beiträge zu komplexen motorischen Handlungen aufgezeigt werden sollen.

Jede Körperbewegung wird durch die Koordination vieler Muskeln herbeigeführt. Wie kommt diese zustande? Aufgrund seiner klassischen Beobachtungen über die Entwicklung eines epileptischen «Grand Mal»-Anfalles hat der Neurologe Jackson Mitte des 19. Jahrhunderts drei Niveaus der Bewegungskontrolle postuliert (1931). Das unterste Niveau ist der spinale Bewegungsapparat mit seinen Motoneuronen, die ihre Impulse zu spezifischen Muskeln schicken. Das mittlere Niveau sollte aus Strukturen bestehen, die über einen direkten Zugang zu den Motoneuronen im Rückenmark verfügen, und dazu gehört als einzige corticale Struktur der motorische Cortex. Zahlreiche Ableitexperimente an Wachtieren, die gelernte Bewegungen ausführten, haben gezeigt, daß die Neurone der motorischen Hirnrinde bestimmte Bewegungsgrößen, wie die Richtung einer Bewegung um ein Gelenk und die von den Muskeln entwickelte Kraft, spezifizieren (Evarts, 1967; Hepp-Reymond et al., 1978). Es zeigt sich, daß der motorische Cortex ein exekutives Organ ist, das durch sensorische und cortex-interne Eingänge gesteuert wird und für korrekte Erregungsmuster in den Muskeln mitverantwortlich ist. Nach einem Hirnschlag, durch den der motorische Cortex ausgeschaltet wird, folgt eine Lähmung, ohne daß die Vorstellung über die auszuführenden Bewegungen verlorengeht.

Welches ist das neurophysiologische Substrat der höchsten Ebene von Jackson, auf der Bewegungsvorstellungen und Handlungsziele entstehen?

Abb. 2: Instruktionsabhängige Modulation der Aktivität eines Neurons in der motorischen Hirnrinde während 5 Versuchen. Für jeden Versuch ist dargestellt: oben die Dauer der Instruktion (dicker Strich), gefolgt von der Bewegung, darunter das neuronale Entladungsmuster, darunter die Bewegung (nach oben «stoßen», nach unten «ziehen»), zuunterst Instruktionsinhalt und Bewegungsrichtung. Nach dem Befehl «stoßen» wird das Neuron stärker aktiviert. Nach dem Befehl «ziehen» geht die Aktivität zurück. Beim 5. Durchgang macht der Affe einen Fehler (nach Tanji und Evarts, 1976).



Vor und während der Ausführung einer Willkürbewegung oder – besser – Zielbewegung spielen verschiedene Aspekte oder «Subroutinen» eine wichtige Rolle. Diese können mit der neuronalen Aktivität in bestimmten, mit dem motorischen Cortex verbundenen assoziativen Arealen korreliert werden. Wundt hatte die «Übereinstimmung der Gefühlsseite der Aufmerksamkeit mit dem allgemeinen Gefühlsinhalt der Willensvorgänge»¹⁸ betont. Eine Zielbewegung bedingt laufend die Integration komplexer Informationen über den Körper und über die Umwelt, die durch eine gerichtete Aufmerksamkeit aus der Überzahl an unwichtiger Information herausgefiltert werden müssen. Im parietalen Assoziationscortex wurden Neurone gefunden, deren Entladungsmuster deutlich mit höheren sensorimotorischen Integrationen unter selektiver Aufmerksamkeit korreliert sind (Mountcastle et al., 1975). So sind manche Neurone nur aktiv, wenn ein Tier eine Greifbewegung auf ein interessantes Ziel im körpernahen Raum vollführt (Hyvärinen und Poranen, 1974). Beim Menschen führt die Zerstörung des parietalen Assoziationscortex zur Apraxie, d. h. zur Unfähigkeit, sensorische Reize in einen adäquaten Bewegungsablauf umzuwandeln.

Weiter ist der Vorsatz oder «set» für eine Zielbewegung von Bedeutung (Evarts et al., 1984). Wohlbekannt ist die Herabsetzung von Reaktionszeiten, wenn eine Instruktion vorangeht. Im motorischen Cortex haben Tanji und Evarts (1976) Zellaktivität gefunden, die von der Instruktion abhängig

ist (Abb.2). Es stellt sich die Frage, welche corticalen Regionen diese zielgerichtete Modulation im motorischen Cortex liefern können. In den letzten Jahren wurden «Set»-modulierte Neuronenaktivitäten vor allem im Frontalcortex gefunden. Dieser wird nach seiner Cytoarchitektonik in einen präfrontalen und einen prämotorischen Cortex mit dem supplementären motorischen Areal (SMA genannt) unterteilt. Beim Menschen ist dieser prämotorische Cortex sechsmal größer als der motorische Cortex, während beim Affen das Verhältnis 1:1 ist. Aufgrund des elektroenzephalographischen Bereitschaftspotentials vor Zielbewegungen war schon lange postuliert worden, daß die prämotorischen und präfrontalen Areale an der Bewegungsvorbereitung mitbeteiligt seien. In den letzten Jahren hat man beim Menschen als Maß für die neuronale Aktivität die Stärke der zerebralen Durchblutung und den Glukoseverbrauch während der Bewegungsausführung gemessen und gefunden, daß nicht nur die motorische Hirnrinde, sondern vor allem auch das SMA im Frontalcortex aktiv waren (Roland et al., 1980). Eindrucksvoll war dabei der Unterschied zwischen automatischen Bewegungen, die nur den motorischen Cortex aktivieren, und komplexen Bewegungsabläufen wie Sprechen oder gelernte Folgen von Fingerbewegungen, wo zusätzlich das SMA aktiv war. Wenn die Bewegungs- oder Sprachsequenz nur gedacht wird, wird nur im SMA der Stoffwechsel erhöht. So wird die Beteiligung dieser Gebiete bei motorischer Vorbereitung und Programmierung von Sequenzen angenommen. In der Tat ist eine Mehrheit der Neurone im SMA und im prämotorischen Cortex während der Bewegungsvorbereitung aktiv. Diese Neurone modulieren ihre Aktivität je nach Instruktion oft mehrere Sekunden lang und oft sogar unabhängig von der Natur des auslösenden Reizes. Wird die Instruktion gewechselt, so ändert sich auch die neuronale Aktivität (Wise und Strick, 1984).

So zeichnet sich jetzt langsam ein neurophysiologisches Bild der «idée motrice» ab, mit einer Spezialisierung bestimmter corticaler Areale auf wohldefinierte Aspekte der motorischen Vorbereitung, wie z. B. das prämotorische Areal für visuo-motorische Koordination, das SMA für interne Programmierung von Sequenzen und die parietalen Areale für Organisation von Bewegungen im körpernahen Raum.

Wichtig ist die Beziehung dieser Gebiete zum präfrontalen Cortex, der an anderen höheren kognitiven Leistungen mitbeteiligt ist (Goldman-Rakic, 1984). Interessant ist der Nachweis eines gemeinsamen Defizites nach Zerstörung des Frontalcortex bei Affen und Menschen. So zeigen Affen mit frontalen Läsionen im «A, nicht B, Objektpermanenztest» von Piaget die

gleiche Leistung wie ein 8 Monate altes menschliches Kind, bei dem der Frontalcortex noch nicht ausgereift ist. In diesem Test muß sich das Kind nach einer Wartezeit daran erinnern, wo das gezeigte Spielzeug versteckt ist. Beim ersten Durchgang wählt es richtig. Dann wird der Platz des Spielzeugs gewechselt, und das Kind bleibt bei seiner früheren Wahl und macht einen Fehler. Dieser Test der verzögerten Reaktion mißt u. a. die Fähigkeit zu erkennen, daß ein Objekt in Raum und Zeit existiert, auch wenn es nicht mehr sichtbar ist. Die Objektpermanenz ist der erste Schritt zu einer Symbolik und zum abstrakten Denken. In einer solchen Testsituation wurden bei Affen im Frontalcortex Neurone gefunden, die während der Wartezeit spezifisch aktiviert werden, aber nur, wenn ein Köder mit dem Signal gezeigt wurde (Fuster, 1984). Wenn das Signal ohne Köder gegeben wird, bleiben diese Neurone stumm. Dieses Beispiel illustriert offenbar eine wichtige Funktion der Frontallappen, nämlich die Beurteilung einer Situation bei der Vorbereitung einer gezielten Handlung.

Diese erstmalig gefundenen Korrelate von höheren psychischen Leistungen mit neuronaler Aktivität sind nur ein Anfang und lassen noch immer die Frage offen: Wie soll sich dies alles zum Ganzen weben? Hier steht die Neurobiologie noch immer vor einem tiefen Rätsel, wie es schon La Mettrie in seinen Schlußfolgerungen eingestand: «*C'est par cette file d'observations et de vérités qu'on parvient à lier à la matière l'admirable propriété de penser, sans qu'on en puisse voir les liens, parce que le sujet de cet attribut nous est essentiellement inconnu.*»¹⁹ Und doch scheinen sich Wege aufzutun, um die medizinisch-philosophischen Intuitionen von La Mettrie durch ein echtes naturwissenschaftliches Verständnis zu unterbauen, so wie es mit vorsichtigem Optimismus Mountcastle (1978) formuliert hat: “*This internal readout of internally stored information, and its match with the neural replication of the external continuum, is thought to provide an objective mechanism for conscious awareness. That mechanism is not beyond the reach of scientific enquiry.*”²⁰

Bibliographie

- Akert, K., Pfenninger, K., Sandri C. and Moore H. (1972): Freeze etching and cytochemistry of vesicles and membrane complexes in synapses of the central nervous system. In: *Structure and Function of Synapses* (eds. G.D. Pappas, D.P. Purpura), Raven Press, New York, p.67–86.
- Beyer A. (1983): *Faszinierende Welt der Automaten*. Callwey, München.
- Bruce C.J. and Goldberg M.E. (1984): Physiology of the frontal eye fields. *Trends in Neuroscience* 7: 436–441.
- Colonnier M. (1981): The electron-microscopic analysis of the neuronal organization of the cerebral cortex. In: *The Organization of the Cerebral Cortex* (eds. F.O. Schmitt, F.G. Worden, G. Adelman, S. G. Dennis) MIT Press, Cambridge, p. 125–152.
- Edelman G. M. (1978): Group selection and phasic reentrant signaling: a theory of higher brain function. In: *The Mindful Brain* (eds. G.E. Edelman, V.B. Mountcastle), MIT Press, Cambridge, p.673–692.
- Evarts E. V. (1967): Representation of movements and muscles by pyramidal tract neurons of the precentral motor cortex. In: *Neurophysiological Basis of Normal and Abnormal Motor Activities* (eds. M. D. Yahr and D. P. Purpura), Raven Press, New York, p.215–251.
- Evarts E.V., Shinoda Y., Wise S.P. (1984): *Neurophysiological approaches to higher brain functions*. J. Wiley & Sons, New York.
- Frédéric II, Roi de Prusse (1752): *Eloge de La Mettrie*, Lue en séance publique de l'Académie de Berlin par Darget, secrétaire des commandements du Roi. *Histoire de l'Académie de Berlin*, Vol.II.
- Fuster J.M. (1984): Behavioral electrophysiology of the prefrontal cortex. *Trends in Neuroscience* 7: 408–414.
- Galvani A. (1791): *De viribus electricitatis in motu musculari*. *Commentarius. De Bononiensi Scientiarum et Artium. Instituto atque Academia* 7: 363–418.
- Goldman-Rakic P.S. (1984): The frontal lobes: uncharted provinces of the brain. *Trends in Neuroscience* 7: 425–429.
- Haller A. (1753): *De partibus corporis sensibilibus et irritabilibus*. *Comm. Soc. reg. Sci. Göttingen* 2: 114–158.
- Hebb D. O. (1949): *Organization of Behaviour. A Neuropsychical Theory*. Wiley, New York.
- Hepp-Reymond, M.-C., Wyss U. R., Anner R. (1978): Neuronal coding of static force in the primate motor cortex. *J. Physiol. (Paris)* 74: 287–291.
- Hyvärinen J., Poranen A. (1974): Function of the parietal associative area 7 as revealed from cellular discharges in alert monkeys. *Brain* 97: 673–692.
- Jackson J. H. (1931): *Selected Writings of John Hughlings Jackson* (ed. J. Taylor). Hodder and Stoughton, London.
- James W. (1890): *Principles of Psychology*. Henry Holt and Co.
- (1961): *Psychology: the briefer course*. Harper-Torchbook (originally 1892, Holt and Co.)
- Kaas J. H., Nelson R. J., Sur M., Lin C. S., Merzenich M. M. (1979): Multiple representation of the body within the primary somatosensory cortex of primates. *Science* 204: 521–523.
- La Mettrie J. O. (1745): *Histoire naturelle de l'âme*. Traduite de l'Anglais de M. Charp, par feu M. H. ***, de l'Académie des Sciences. Néaulme, La Haye.
- La Mettrie J. O. (1748): *L'Homme Machine*. De l'Imprimerie d'Elie Luzac fils, à Leyde, 109 p.

- La Mettrie J.O. (1981): *L'Homme Machine*. Edition établie par P.-L. Assoun. Denoël/Gonthier.
- Lashley K.S. (1931): Mass action in cerebral function. *Science* 73: 245–254.
- Maingot E. (1959): *Les Automates*. Hachette.
- Mountcastle V.B., Lynch J.C., Georgopoulos A., Sakata H., Acuna C. (1975): Posterior parietal association cortex of the monkey: command functions for operations within extrapersonal space. *J. Neurophysiol.* 38: 871–908.
- Mountcastle V.B.: An organizing principle for cerebral function: the unit module and the distributed system. In: *The Mindful Brain* (eds. G.E. Edelman, V.B. Mountcastle), MIT Press, Cambridge, p. 7–50.
- Penfield, W., Rasmussen T. (1950): *The Cerebral Cortex of Man. A Clinical Study of Localization of Function*. Macmillan, New York.
- Powell T.P.S. and Mountcastle V.B. (1959): Some aspects of functional organization of the cortex of the postcentral gyrus of the monkey: a correlation of findings obtained in a single unit analysis with cytoarchitecture. *Bull. Johns Hopkins Hosp.* 105: 133–162.
- Quépat N. (1873): *Essai sur La Mettrie, sa vie et ses œuvres*. Librairie des Bibliophiles, Paris.
- Rakic P. (1979): Genetic and epigenetic determinants of local neuronal circuits in the mammalian nervous system. “The Neurosciences: Fourth Study Program” (eds. F.O. Schmitt, F.G. Worden), MIT Press, Cambridge, p. 109–128.
- Roland P.E., Larsen B., Lassen N.A., Skinhoj E. (1980): Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *J. Neurophysiol.* 43: 118–136.
- Rockell A., Hiorns R., Powell T. (1980): The basic uniformity in structure of the neocortex. *Brain* 103: 221–244.
- Sperry R.W. (1974): Lateral specialization in the surgically separated hemispheres. In: *The Neurosciences: Third Study Program* (eds. F.O. Schmitt, F.G. Worden), MIT Press, Cambridge, p. 5–19.
- Tanji J., Evarts E.V. (1976): Anticipatory activity of motor cortex neurons in relation to direction of intended movement. *J. Neurophysiol.* 39: 1062–1068.
- Vartanian A. (1960): *La Mettrie's L'Homme Machine. A study in the origins of an idea*. Princeton University Press, Princeton.
- Wise S.P., Strick P.L. (1984): Anatomical and physiological organization of the non-primary motor cortex. *Trends in Neuroscience* 7: 442–446.
- Woolsey C.N. (1958): Organization of somatic sensory and motor areas of cerebral cortex. In: *Biological and Biochemical Basis of Behaviour* (eds. H.F. Harlow, C.N. Woolsey), Univ. of Wisconsin Press, Madison p. 63–81.
- Wundt W. (1914): *Grundriß der Psychologie* (12. Auflage). A. Kröner Verlag, Leipzig, S. 266–267.

Zitate

- 1 L'Homme Machine, 1748, Leyde, Elie Luzac, S. 81.
- 2 l. c. S. 109.
- 3 l. c. S. 77–78.
- 4 l. c. S. 81–82.
- 5 l. c. S. 84.
- 6 l. c. S. 21–22.
- 7 l. c. S. 23: «... plus on gagnera du côté de l'Esprit, plus on perdra du côté de l'instinct.»
- 8 l. c. S. 70.
- 9 l. c. S. 71.
- 10 l. c. S. 70.
- 11 l. c. S. 92.
- 12 l. c. S. 93.
- 13 l. c. S. 41.
- 14 l. c. S. 37.
- 15 l. c. S. 38.
- 16 l. c. S. 38.
- 17 W. James, Psychology: the briefer course, 1961, S. 177.
- 18 W. Wundt, Grundriß der Psychologie, 1914 (12. Auflage), A. Kröner Verlag, Leipzig, S. 266–267.
- 19 l. c. S. 106.
- 20 V. B. Mountcastle, in: The Mindful Brain, 1978, S. 41.

Summary

In «L'Homme Machine» La Mettrie has based many of his philosophical propositions about human nature on personal observations as a medical doctor. In this article his statements on the structure and function of the human brain are confronted with recent findings in modern neurobiology.

PD Dr. Marie-Claude Hepp-Reymond
Institut für Hirnforschung
August-Forel-Straße 1
CH-8029 Zürich