

Synchronisierte Antworten aus der Großhirnrinde

Ein Lösungsvorschlag für das Bindungsproblem

Unsere Intuition legt nahe, dass es in unserem Gehirn ein Zentrum geben müsse, an dem alle Informationen zusammengeführt werden: ein Ort, an dem die Verarbeitungsergebnisse der verschiedenen Sinnessysteme zu kohärenten Wahrnehmungen der umgebenden Welt gebunden werden, an dem Entscheidungen für zukünftiges Handeln getroffen werden, an dem die Programme für angepasste Verhaltensreaktionen erstellt werden; und letztlich auch der Ort, an dem sich das »Ich« konstituiert. Selbst Descartes scheint nicht ohne ein solches Konvergenzzentrum angekommen zu sein **1**, obgleich er doch zwischen den materiellen Prozessen im Gehirn und dem Mentalen eine strikte Trennung vornahm, und es für die *res cogitans* keiner Verortung bedurfte hätte. Die naturwissenschaftliche Analyse der Organisation unserer Gehirne ergibt jedoch ein gänzlich anderes Bild.

Offenbar irrt sich unsere Intuition hinsichtlich der Verfasstheit des Organs, dem sie sich verdankt. Die Schaltdiagramme von Primatengehirnen lassen jeden Hinweis auf die Existenz eines singulären Konvergenzzentrums vermissen. Sie weisen vielmehr darauf hin, dass Gehirne, das menschliche eingeschlossen, in hohem Maße distributiv organisiert sind **2**. So verarbeiten die sensorischen Areale der Großhirnrinde gleichzeitig unterschiedliche Teilaspekte der Sinneswelt und senden ihre Ergebnisse über parallele Bahnen an eine Vielzahl exekutiver Strukturen, ohne dass es jemals zu einer Zusammenführung all dieser Aktivitäten in einem singulären Zentrum kommt.

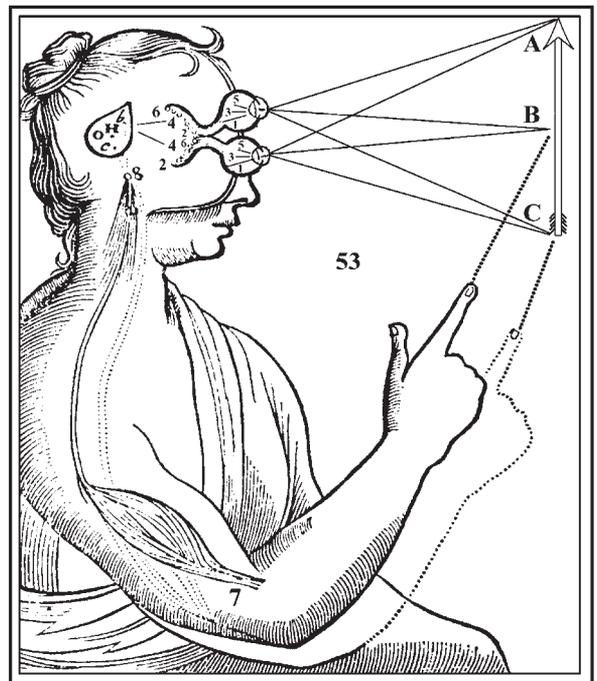
Strukturbildende Selbstorganisation

Die Architektur der Vernetzungen ähnelt der von *small world networks*, also etwa der Verbindungsarchitektur des Internet. Es gibt eine große Zahl abgrenzbarer Knoten unterschiedlicher Größe, die bestimmte Verarbeitungsleistungen erbringen, und diese kommunizieren mitei-

einander über ein äußerst komplexes Netz reziproker Verbindungen. Diese Verschaltungsarchitektur weist trotz ihrer astronomischen Komplexität ein hohes Maß an Spezifität auf. Diese hat sich in einem Jahr-millionen währenden evolutionären Prozess herausgebildet und wird während der Individualentwicklung jeweils noch durch Erfahrung optimiert und an die speziellen Gegebenheiten der Umwelt angepasst. Die Auslegung der Verbindungen zwischen den Neuronen bestimmt die Regeln, nach denen Gehirne Sinnessignale verarbeiten, Assoziationen herstellen, lernen, Entscheidungen treffen, bewerten, neue Lösungen erarbeiten und Pläne für zukünftiges Handeln entwerfen. Die komplexe Architektur unserer Gehirne verdankt sich also strukturbildenden Selbstorganisationsprozessen. Und diese haben ein System hervorgebracht, dessen multiple Teilfunktionen sich wiederum über selbstorganisierende Prozesse so koordinieren, dass das Gesamtsystem ohne eine zentrale lenkende Instanz auskommt. Wie können sich trotz dieser distributiven Organisation kohärente Zustände ausbilden? Die Antwort hierauf ist mit einer Lösung des so genannten Bindungsproblems verknüpft: Es gilt, die Selbstorganisationsprozesse zu verstehen, die aus weit verteilten Teilprozessen kohärente Zustände höherer Ordnung entstehen lassen.

Vorteile der Ensemble-Codierung

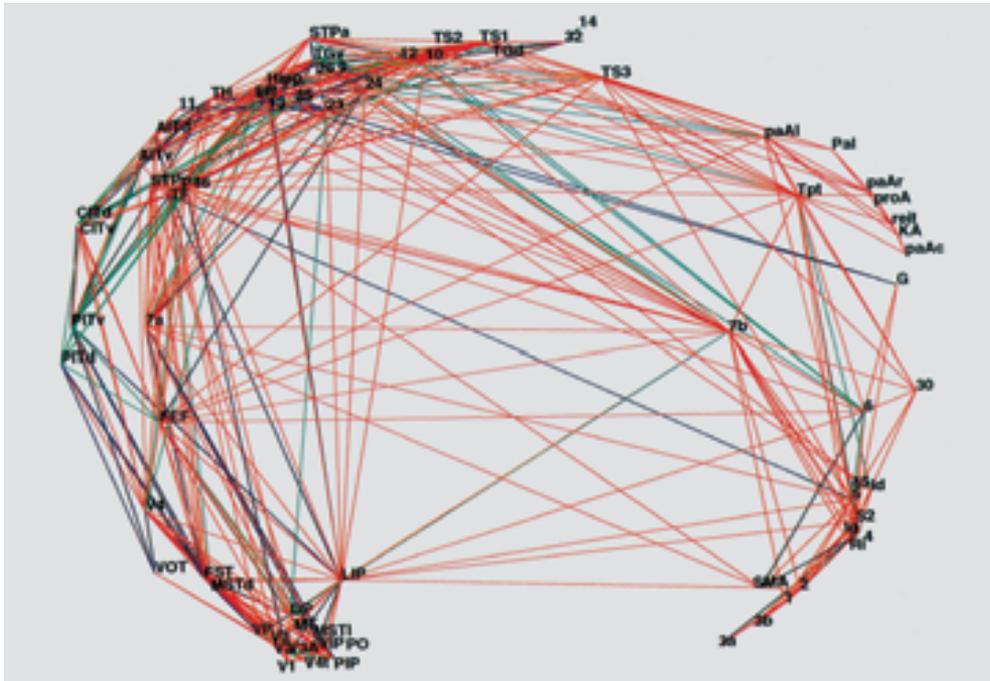
Der Lösungsansatz, den wir in Frankfurt am Max-Planck-Institut für Hirnforschung mit experimentellen und am Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS) mit theoretischen Ansätzen verfolgen [siehe auch Anne Hardy »Disziplinen unter einem Dach: Das Frankfurter Institute for Advanced Studies (FIAS)«, Seite 95], geht davon aus, dass die neuronalen Repräsentationen von Wahrnehmungen, Erinnerungen und Handlungsentwürfen auf dynamisch konfigurierten



Ensembles einer großen Zahl von Nervenzellen beruhen. Jede einzelne dieser zu Ensembles gebundenen Nervenzellen sollte dabei jeweils nur einen Teilaspekt zu der Repräsentation beitragen. Das nicht weiter reduzierbare Äquivalent des repräsentierten Inhalts wäre das raum-zeitliche Erregungsmuster, das durch die Gesamtheit der jeweils zu einem Ensemble zusammengeschlossenen Neuronen definiert würde. Diese Codierungsstrategie hat den Vorteil, dass Neuronen, die für einen bestimmten Teilaspekt zuständig sind, zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Ensembles teilhaben können. Sie beruht auf dem gleichen Prinzip wie unsere Sprache, die es erlaubt, mit einer kleinen Zahl von Buchstaben beziehungsweise Phonemen durch Rekombination eine nahezu unendliche Zahl verschiedener Inhalte zu codieren. Ensemble-Codes erfordern wesentlich weniger Neuronen als die komplementäre Strategie, jedes kognitive Objekt durch eine hoch spezialisierte Zelle zu repräsentieren.

Dieses aufwändige Codierungsverfahren ist zwar ebenfalls realisiert, bleibt aber der Repräsentation

1 Auf der Suche nach dem Sitz der Seele boten sich dem Philosophen René Descartes zwei Strukturen im Gehirn, die nicht paarweise vorkommen: Die Hypophyse und die Epiphyse. Descartes entschied sich für Letztere. Heute wissen wir, dass die Epiphyse mit der Koordination der circadianen Rhythmik befasst ist.



Am Beispiel der Großhirnrinde von Rhesusaffen lässt sich zeigen, wie sehr die kortikalen Areale miteinander vernetzt sind: Es entsteht eine komplexe Architektur. Die Zahlen und Buchstabenfolgen bezeichnen Hirnrindenareale, die farbigen Striche stehen für massive, meist reziproke, Verbindungen.

von Objekten vorbehalten, die einen hohen Bekanntheitsgrad aufweisen oder aber von besonderer Verhaltensrelevanz sind. Für neue, noch nie gesehene Objekte kann diese Strategie nicht angewandt werden, da nicht für alle möglichen Objekte spezialisierte Zellen vorgehalten werden können. Die Codierung in Ensembles wirft jedoch wiederum ein Bindungsproblem auf, das nur gelöst werden kann, wenn die Nervenzellen zwei Botschaften gleichzeitig vermitteln. Zum einen müssen sie durch ihre Erregung signalisieren, dass »ihr Merkmal« vorhanden ist, und dann müssen sie angeben, mit welchen Partnerzellen sie im Augenblick gemeinsam ein Ensemble bilden. In ihrer Aktivität muss also eine Signatur mitcodiert werden, die angibt, mit welchen anderen Neuronen sie gerade verbunden sind.

Präzise Synchronisation der neuronalen Antwort

Theoretische Analysen des Psychologen David Milner und des deutschen Physikers Christoph von der Malsburg [siehe auch Hardy zu FIAS, Seite 95] haben in den 1980er Jahren zu dem Vorschlag geführt, dass sich solche Bindungsprobleme über die präzise zeitliche Synchronisation neuronaler Antworten lösen ließen. Die Signatur für die jeweilige Zusammengehörigkeit von Neuronen – so die Hypo-

these – könnte die präzise Synchronisation ihrer Antworten sein. Bei der Untersuchung von Mechanismen, die der erfahrungsabhängigen Ausreifung von Großhirnrindenfunktionen zugrunde liegen, entdeckten wir Mitte der 1980er Jahre, dass Neuronen der Sehrinde ihre Antworten mit sehr hoher Präzision synchronisieren können und dies vor allem dann, wenn ihre Aktivität eine rhythmische Modulation im Bereich von etwa 40 Hertz, dem so genannten Gamma-Frequenzband, aufweist.

Da diese Synchronisationsphänomene vorwiegend zwischen Neuronen auftraten, die sich an der Codierung des gleichen Objekts beteiligten, lag die Vermutung nahe, dass diese präzise Synchronisation in der Tat die Signatur für die Zugehörigkeit von Neuronen zum gleichen Ensemble sein könnte.

Seither verfolgen wir diese Hypothese mit unterschiedlichen experimentellen Ansätzen. Im Zentrum stehen elektrophysiologische Verfahren, die es ermöglichen, die Aktivität einer großen Zahl von Nervenzellen der Hirnrinde gleichzeitig zu erfassen, und die komplexen raum-zeitlichen Aktivitätsmuster mit kognitiven Leistungen in Verbindung zu bringen. Ergänzt werden diese Untersuchungen durch nicht-invasive Messungen von Hirnaktivität am Menschen mit der Elektroenzephalografie, der funktionellen Magnetresonanztomografie und in naher Zukunft auch der Magnetenzephalografie.

Durch die Gründung des Frankfurter Brain Imaging Centers (BIC), das in Kooperation zwischen dem MPI für Hirnforschung und dem Fachbereich Medizin aufgebaut wurde, entstand eine Forschungsplattform für die Untersuchung der Organisationsprinzipien des menschlichen Gehirns, deren Leistungsfähigkeit jedem – auch international – Vergleich standhält. [siehe auch Stefan Kiehl »Im Focus der Frankfurter Hirnforschung: Das Brain Image center«, Seite 76].

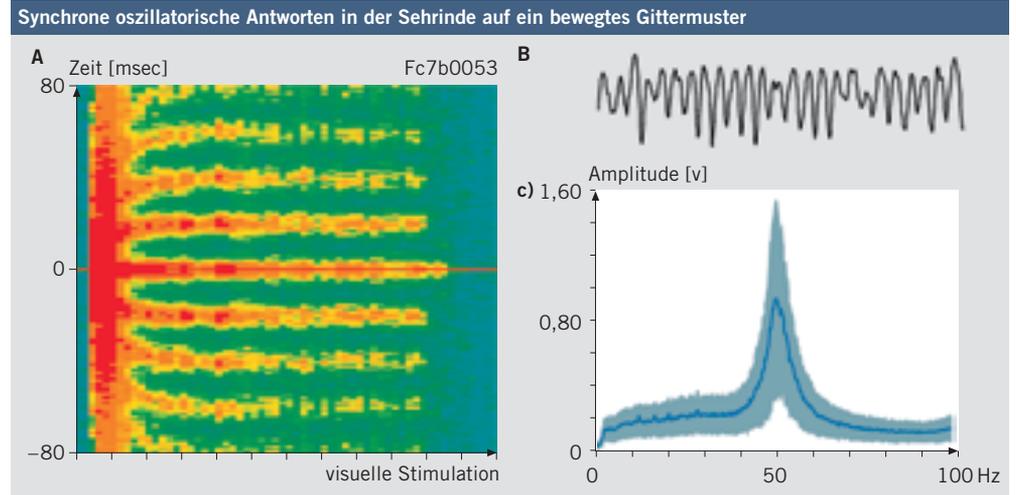
Inzwischen befassen sich zahlreiche Laboratorien weltweit mit der experimentellen Untersuchung von oszillatorischen Prozessen und deren Synchronisation: Die Befunde legen nahe, dass die Funktionen dieser zeitlichen Koordination weit über die zunächst vermuteten hinausgehen. So bestehen enge Bezüge zwischen der Synchronisation neuronaler Aktivität und Aufmerksamkeitsprozessen, Speichervorgängen und der Koordination motorischer Aktionen. Auch zeichnet sich ab, dass Inhalte nur dann bewusst werden, wenn die entsprechenden neuronalen Ensembles ein hinreichend hohes Maß an Synchronizität im Gamma-Frequenzbereich aufweisen. Die vielleicht wichtigsten Implikationen könnten die jüngsten Untersuchungen an schizophrenen Patienten haben. Untersuchungen, die in Zusammenarbeit mit der Psychiatrischen Klinik der Universität durchgeführt werden und eine Vielzahl von Daten aus anderen Laboratorien zeigen, dass die Synchronisation oszillatorischer Aktivität im Gehirn von Patienten gestört ist, die an Schizophrenie leiden. Wenn zutrifft, dass Synchronisation der Koordination von parallelen, räumlich verteilten, neuronalen Operationen dient, könnte die beobachtete Störung synchronisierender Mechanismen manche der dissoziativen Phänomene erklären, welche diese geheimnisvolle Krankheit charakterisieren. Die Befunde könnten dann Hinweise für eine gezielte Suche nach den zugrunde liegenden pathophysiologischen Mechanismen liefern.

Integrierte Lösungsansätze notwendig

Noch sind wir weit davon entfernt, zu verstehen, wie die vielfältigen

Bindungs- und Koordinationsprobleme in unseren dezentral organisierten Gehirnen gelöst werden. Fest steht schon jetzt, dass die Beschreibungen der dynamischen Zustände der vielen Milliarden miteinander wechselwirkenden Neuronen der Großhirnrinde ein Maß an Komplexität aufweisen werden, das unser Vorstellungsvermögen übersteigt. Dies bedeutet nicht, dass es uns nicht gelingen kann, analytische Verfahren zu entwickeln, mit denen sich diese Systemzustände erfassen und in ihrer zeitlichen Entwicklung verfolgen lassen. Die Beschreibungen dieser Zustände werden jedoch abstrakt und unanschaulich sein. Sie werden keine Ähnlichkeit aufweisen mit den Wahrnehmungen und Vorstellungen, die auf diesen neuronalen Zuständen beruhen.

Aus diesem Grund benötigen wir neue Forschungsstrukturen, die eine enge Verschränkung von experimentellen und theoretischen Ansätzen erlauben. Die Hoffnung ist, dass dieser integrierte Ansatz den Weg für ein tieferes Verständnis der außerordentlich komplexen Dynamik neuronaler Prozesse ermöglichen wird. Dies wiederum ist Voraussetzung für eine Fülle wichtiger Anwendungen. In dem Maße, in dem uns eine formale Beschreibung neuronaler Verarbeitungsprozesse und der Dynamik neuronaler Repräsentationen gelingt, wird es möglich sein, neuronale Prothesen zu entwickeln, mit denen gestörte Sinnesfunktionen ersetzt beziehungsweise ausgefallene motorische Funktionen kompensiert werden können. Ein besseres Verständ-



nis der informationsverarbeitenden Prozesse im Gehirn wird uns auch befähigen, künstliche Systeme zu entwerfen, die nach Prinzipien funktionieren, die sich im Laufe der Evolution herausgebildet und als erfolgreich erwiesen haben. Solche Systeme werden gerade in den Bereichen besonders leistungsfähig sein, in denen sich konventionelle Computer, die nach gänzlich anderen Prinzipien arbeiten, als wenig effektiv erweisen: die maschinelle Muster- und Spracherkennung, der assoziative Zugriff auf große Datenmengen, das Lösen komplexer kombinatorischer Aufgaben und die autonome Anpassung von Verhalten an wechselnde Umweltbedingungen. Mit der Gründung des Frankfurt Institute for Advanced Studies ist die Hoffnung verbunden, dass sich auf dieser Forschungsplattform integrative Ansätze zur Lösung von Organisationsproblemen in komplexen Systemen verwirklichen lassen. ◆

3 A. Dieses zeitaufgelöste Kreuzkorrelogramm zeigt, dass Neuronen an zwei unterschiedlichen Orten der Sehrinde nach Beginn der visuellen Stimulation synchron zu oszillieren beginnen und diese Synchronisierung im 50 Hz Bereich über die gesamte Reizdauer anhält. B. Im gleichzeitig abgeleiteten Summenpotenzial drückt sich diese Synchronisation in periodischen Potenzialschwankungen aus. C. Die Spektralanalyse der in B dargestellten oszillatorischen Aktivität zeigt ein deutliches Maximum im Bereich von 50 Hz.

Der Autor

Prof. Dr. Wolf Singer, 62, studierte Medizin in München und Paris. Seit 1981 ist er Direktor der neurophysiologischen Abteilung am Frankfurter Max-Planck-Institut für Hirnforschung, wo er an der Aufklärung der strukturellen und funktionellen Organisation der Großhirnrinde arbeitet und neuronale Grundlagen von Wahrnehmungsprozessen und höheren kognitiven Leistungen wie Erinnern und Aufmerksamkeit studiert. Für seine Arbeit wurde er mit zahlreichen Preisen ausgezeichnet. Er gehört dem Hochschulrat der Johann Wolfgang Goethe-Universität an und ist Gründungsdirektor des 2004 entstandenen Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS).

Anzeige



No Compromises.

Good ideas are nothing without good data.

Never compromise on quality.

Compumedics Germany GmbH:
Heussweg 25
20255 Hamburg
Germany
Tel: +49 40 40 18 99 41
Fax: +49 40 40 18 99 49



Neuroscan™

SynAmps² - The Ultimate amplifier

For the past two decades Neuroscan has remained the leader in innovative technology in EEG and ERP. Once again Neuroscan sets the new standard of quality with our next generation of firsts.

- First** to record over 500 channels.
- First** to record 256 channels at 20kHz sampling per channel.
- First** driven ground amplifier with active noise cancellation.
- First** amplifier with high speed USB2 plug-and-play interface.
- First** amplifier to accommodate rapid electrode preparation time WITHOUT sacrificing data quality!

www.compumedics.com

ABB13 Issue 1