

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Computational Neuroscience

Nationales Bernstein Netzwerk Computational Neuroscience





Liebe Leserinnen und Leser,

Milliarden Nervenimpulse jagen jede Sekunde durch unser Gehirn. Doch wie entstehen daraus Gedanken und Gefühle, Wahrnehmungen und Erinnerungen? Diese Frage gehört zu den großen wissenschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Im Bernstein Netzwerk Computational Neuroscience versuchen wir, Antworten auf diese und verwandte Fragen durch eine enge Kombination neurobiologischer Experimente, computergestützter Datenanalyse, mathematischer Modellierung und numerischer Simulation zu finden.

Seit 2004 unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die neue Forschungsrichtung Computational Neuroscience mit der Förderinitiative „Nationales Bernstein Netzwerk Computational Neuroscience“. Seitdem ist das Netzwerk auf mehr als 200 Arbeitsgruppen angewachsen, von denen einige selbst erst in den letzten Jahren entstanden sind.

Bernstein Zentren und Bernstein Gruppen widmen sich der Grundlagenforschung im Bereich Computational Neuroscience. Durch eine dauerhafte universitäre Anbindung und neu eingerichtete Professuren wird die Basis für eine nachhaltige Entwicklung des noch jungen Forschungsgebietes geschaffen. Eingebettet in diese fruchtbare Umgebung können Bernstein Preisträger eigenständig neue Arbeitsgruppen aufbauen. Mit den Bernstein Foki werden technologische und medizinische Anwendungen vorangetrieben – und die Bernstein Kooperationen und internationale Kollaborationen verknüpfen das Netzwerk in Deutschland und weltweit.

In dieser Broschüre erhalten Sie einen Einblick in unsere Forschung. Anhand von acht Themengebieten werden die wissenschaftlichen Inhalte umrissen und beispielhaft einzelne Arbeiten vorgestellt. Wir hoffen, Ihnen mit diesem

Streifzug ein wenig von der Faszination dieser Forschungsthemen, der Begeisterung der Wissenschaftler und den spannenden Zukunftsperspektiven vermitteln zu können. Natürlich kann diese Broschüre nur eine kleine Auswahl der laufenden Projekte zeigen. Wir laden Sie daher herzlich ein, aktuelle Neuigkeiten und interessante Aktivitäten auf unserer Webseite zu entdecken (www.nncn.de).

Das Bernstein Netzwerk konnte sich in den vergangenen Jahren erfolgreich in der internationalen Wissenschaftslandschaft etablieren. Gleichzeitig ist es gelungen, Bernstein Vorhaben an den einzelnen Standorten mit laufenden und neuen Schwerpunkten in Lehre und Forschung zu verzahnen, wovon auch Projekte der Exzellenzinitiative stark profitieren. Dieses breite Fundament ermöglicht eine hervorragende Nachwuchsförderung. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass die mit Hilfe des BMBF angestoßene Forschung langfristig mit hoher Intensität an den beteiligten Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen weitergeführt werden kann. Da unsere Forschung und ihre technischen Anwendungen – unter anderem im Bereich „Gehirn-Computer-Schnittstellen“ – gesellschaftsrelevante Fragen aufwerfen, werden wir parallel zu unserer wissenschaftlichen Arbeit immer auch den Dialog mit der Öffentlichkeit suchen. Wir hoffen, dass es uns gemeinsam gelingt, Gehirn und Geist besser zu verstehen.

Prof. Andreas Herz
*Sprecher des Projektkomitees
Bernstein Netzwerk Computational Neuroscience*

**Herausgeber:**

Nationales Bernstein Netzwerk Computational Neuroscience
www.nncn.de

Autor:

Johannes Faber, Text modifiziert nach Dr. Katrin Weigmann

Redaktion:

Bernstein Koordinationsstelle (Dr. Simone Cardoso de Oliveira, Johannes Faber, Dr. Kerstin Schwarzwälder)

Gestaltung/Satz:

newmediamen – Berlin

Druck:

ELCH GRAPHICS
Digitale- und Printmedien GmbH und Co. KG, Berlin

Weitere Informationen und Bestellungen:

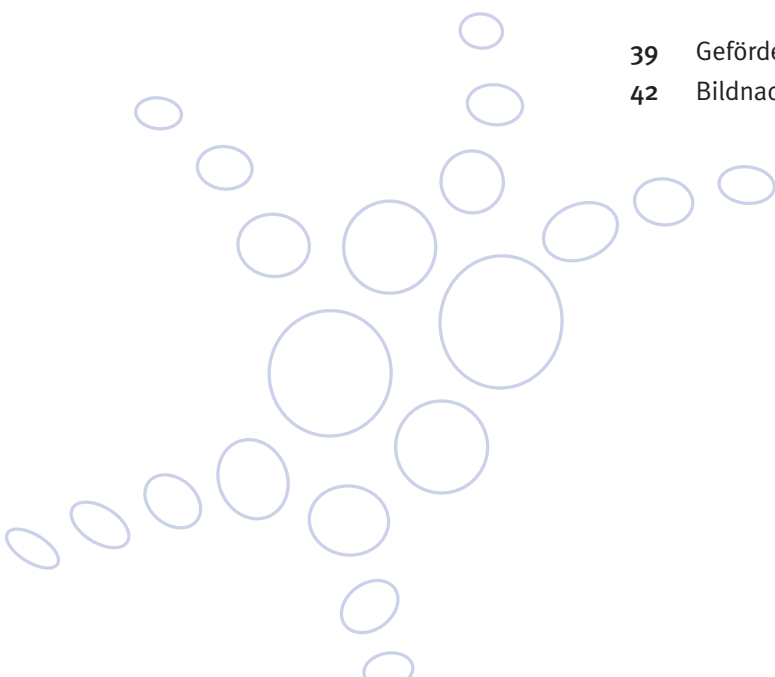
Bernstein Koordinationsstelle (BCOS)
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Hansastraße 9a
79104 Freiburg
info@bcos.uni-freiburg.de

2. Ausgabe, April 2011

Das Nationale Bernstein Netzwerk Computational Neuroscience
wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.



3	Vorwort
6	Was ist Computational Neuroscience?
7	Das Bernstein Netzwerk
8	Bernstein Zentren
10	Bernstein Preis
11	Bernstein Partner
12	Bernstein Fokus: Neurotechnologie
13	Bernstein Fokus: Neuronale Grundlagen des Lernens
14	Bernstein Konferenz
15	Nachwuchsförderung
16	Internationalisierung
17	Industrie-Kooperationen
17	Bernstein Computational Neuroscience e.V.
18	Der Code des Gehirns
21	Computermodelle des Gehirns
24	Neurologische Erkrankungen verstehen
26	Erkennen ist mehr als Sehen
28	Ein Blick ins Gehirn
30	Lernen und Erinnern
33	Ersatzteile für das Gehirn
36	Roboter der Zukunft
39	Geförderte Projekte und Wissenschaftler im Bernstein Netzwerk
42	Bildnachweis





Was ist Computational Neuroscience?

Das Gehirn ist wohl die komplexeste Struktur, die die Evolution je hervorgebracht hat. Milliarden von Nervenzellen, über Billionen von Verknüpfungen miteinander verschaltet, verarbeiten innerhalb von Sekundenbruchteilen enorme Informationsmengen. Zwar sind in den letzten Jahrzehnten maßgebliche Fortschritte in der Erforschung der zellulären und molekularen Grundlagen der Funktionsweise des Gehirns erzielt worden, doch von einem tiefgreifenden Verständnis komplexer kognitiver Leistungen wie Wahrnehmung, Lernen oder Handeln sind wir bis heute noch weit entfernt.

Computational Neuroscience kann dazu einen wichtigen Beitrag leisten. In ihrem interdisziplinären Forschungsansatz vereint sie die Kompetenz von Mathematikern, Physikern, Biologen, Medizinern, Psychologen, Informatikern und Ingenieuren. Dadurch wird es möglich, Hypothesen in Formeln zu fassen, die man im Computer simulieren und überprüfen kann. Die Computersimulation stellt eine moderne Form des „Gedankenexperiments“ dar, das zum Verständnis so komplexer Strukturen wie der des menschlichen Gehirns unerlässlich ist.

Für Medizin und Technologie bietet Computational Neuroscience ein enormes Innovationspotential. Vorgänge bei neurologischen Erkrankungen, wie zum Beispiel der Epilepsie, werden am Computer nachgeahmt. An diesen Simulationen können Hypothesen zu ihrer Entstehung, sowie Diagnose- und Therapieansätze getestet werden. Im Zusammenspiel mit den Informationstechnologien eröffnen sich damit weitreichende Anwendungsfelder. Schon heute ermöglichen neuronale Implantate Gehörlosen eine akustische Wahrnehmung. Künstliche Gliedmaßen, die nur mit der „Kraft der Gedanken“ gesteuert werden, werden bereits in der Klinik getestet. Intelligente Computersysteme und autonome Roboter werden Kranken und Gesunden in Zukunft das Leben erleichtern.



**Julius Bernstein
(1839–1917)**

Schon im Jahr 1902, als kaum ein Haushalt ans Stromnetz angeschlossen und elektrisches Licht ein Luxus war, postulierte Julius Bernstein (1839–1917) einen Mechanismus, der erklärte, wie sich elektrische Erregungen an den

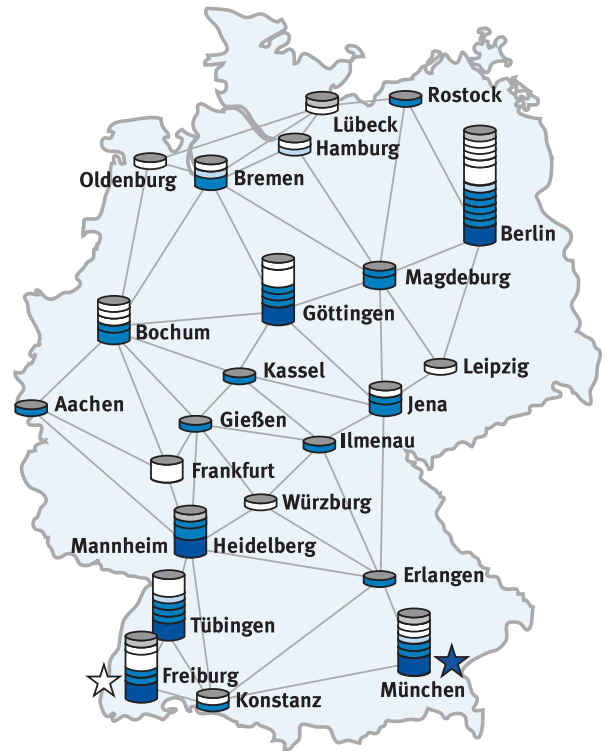
Membranen von Nervenzellen ausbreiten. Bernsteins „Membrantheorie“ ist die erste physikalisch-chemische Erklärung für elektrische Ereignisse in der Biologie und die erste quantitative Theorie der Elektrophysiologie. Von den Möglichkeiten, die Computer heute bieten, ahnte Bernstein natürlich noch nichts. Dennoch ebnete er mit seiner mathematischen Beschreibung neuronaler Prozesse den Weg, die komplexen Vorgänge des Gehirns im Computer zu simulieren. Um seine bahnbrechende Forschung zu würdigen, wurde Julius Bernstein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung als Namensgeber für die Förderinitiative im Bereich Computational Neuroscience ausgewählt.












Das Bernstein Netzwerk

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat das Potential der neuen Forschungsrichtung Computational Neuroscience frühzeitig erkannt und 2004 mit dem „Nationalen Bernstein Netzwerk Computational Neuroscience“ ein Förderprogramm gestartet, das diese Disziplin in Deutschland langfristig etablieren und Innovationsperspektiven erschließen soll. Im Rahmen der High-tech-Strategie der Bundesregierung wird das Bernstein Netzwerk mit einem Gesamtvolumen von derzeit rund 156 Mio. Euro unterstützt.

Das Netzwerk bündelt und vernetzt die in Deutschland vorliegenden Kompetenzen in den theoretischen und experimentellen Neurowissenschaften in einer neuen Qualität, baut sie aus und verbindet sie international. Mehr als 200 Arbeitsgruppen forschen deutschlandweit an über 20 Standorten. Die beteiligten Forschungsgruppen sind an Universitäten und außeruniversitären Forschungsinstituten (Fraunhofer-, Helmholtz-, Leibniz- und Max-Planck-Instituten) angesiedelt. Die Integration von Kooperationspartnern aus der Industrie beschleunigt die Umsetzung der Forschungsergebnisse in konkrete Anwendungen. Dem wissenschaftlichen Nachwuchs bietet das Netzwerk vielfältige Studien- und Weiterbildungsangebote, hochkarätige Forschungsprojekte und attraktive Karriereperspektiven. Eine zentrale Koordinationsstelle unterstützt die Netzwerkaktivitäten und verstärkt durch gezielte Maßnahmen Außendarstellung, Kommunikation und Synergieeffekte.



-  Bernstein Preis
-  Bernstein Kooperation
-  Bernstein Gruppe
-  Bernstein Zentrum
-  Bernstein Fokus: Neurotechnologie
-  Bernstein Fokus: Neuronale Grundlagen des Lernens
-  Bernstein Koordinationsstelle
-  Deutscher INCF Knoten
-  D-USA Kooperation

David Willshaw

University of Edinburgh, UK
Repräsentant für das Vereinigte
Königreich, International Neuroinformatics
Coordinating Facility (INCF)



„Das Bernstein Netzwerk hat Deutschland zur in Europa führenden Kraft auf dem Gebiet der Computational Neuroscience gemacht. Dieses Forschungsfeld wird mittlerweile als ein essentieller Bestandteil der multidisziplinären Forschung in den Neurowissenschaften angesehen.“

Die Wissenschaftler des Bernstein Netzwerks haben nutzbringende Verbindungen zu Industriepartnern und Kliniken aufgebaut. Diese Kontakte werden die Basis für Innovationen in vielen zukünftigen Schlüsselbereichen von Wissenschaft, Medizin, Wirtschaft und Technologie bilden.“

Larry Abbott

Columbia University, New York, USA



„Das Deutsche Bernstein Netzwerk hat einen bedeutenden Beitrag zu dem explosionsartigen globalen Wachstum der Computational Neuroscience geleistet.“

Mit einer beeindruckenden Gruppe von international anerkannten Forschern und Nachwuchswissenschaftlern, seiner einzigartigen Struktur und seinen wissenschaftlichen Aktivitäten hat es wichtige Beiträge zu unserem Verständnis neuronaler Schaltkreise und kognitiver Funktionen geliefert und wird sicher auch in den kommenden Jahren eine führende Rolle auf diesem Gebiet spielen.“

Bernstein Zentren

Sechs „Bernstein Zentren für Computational Neuroscience“ (BCCN) bilden den Kern des Bernstein Netzwerks. Für die Zentren hat das BMBF 2004 rund 40 Mio. Euro und 2010 in einer zweiten Förderrunde nochmals 43 Mio. Euro zur Verfügung gestellt.

Als lokale Strukturkerne verankern die Bernstein Zentren das Forschungsfeld Computational Neuroscience langfristig an den einzelnen Standorten. Dazu wurden bzw. werden in den Bernstein Zentren mit Unterstützung des BMBF 14 neue Professuren im Bereich der Computational Neuroscience geschaffen, die von den jeweiligen Bundesländern dauerhaft weitergeführt werden. Mit ihren in die

universitäre Lehre integrierten Ausbildungsangeboten tragen die Bernstein Zentren maßgeblich zur Verbreitung und Entwicklung des Forschungsfeldes bei.

Die Zentren vereinigen eine kritische Masse an experimenteller und theoretischer Expertise und fokussieren sich in ihrem wissenschaftlichen Ansatz auf Themengebiete, die internationale Tragfähigkeit besitzen. Grundlegende Fragen nach der Funktionsweise und der Informationsverarbeitung im Gehirn – von der einzelnen Zelle bis zum vollständigen Netzwerk – stehen im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses der verschiedenen Zentren.



Berlin

Das **BCCN Berlin** beschäftigt sich mit der Frage: „Wie ist es möglich, dass wir auf sensorische Reize mit Millisekunden-Präzision reagieren können, auch wenn die neuronalen Verarbeitungselemente – Synapsen, Neurone, kleine Neuronennetze und selbst große neuronale Systeme – in ihrer Antwort auf den gleichen Reiz ungeheuer variieren?“ Mittels mathematischer Modelle, durch neurophysiologische Ableitungen oder über bildgebende Verfahren untersuchen Wissenschaftler die Rechenschritte des Gehirns auf der Ebene einzelner Zellen und ganzer Netzwerke.



Göttingen

Das **BCCN Göttingen** erforscht die Dynamik und Adaptivität in den neuronalen Schaltkreisen des Gehirns. Mathematische Modellierungen und Computersimulationen, kombiniert mit modernsten experimentellen Methoden, sollen klären, wie sich Funktion und Anpassungsfähigkeit des Gehirns aus dem kollektiven Zusammenspiel seiner Teile ergeben. Dabei untersucht das Zentrum kooperative Prozesse von der subzellulären Ebene über die Ebene neuronaler Netze bis hin zu interagierenden Hirnarealen und kognitiven Funktionen. Die Forschungsarbeiten sollen unter anderem die Grundlagen für die Entwicklung neuartiger Neuroprothesen legen.



Heidelberg-Mannheim

Das **BCCN Heidelberg-Mannheim** untersucht die Zusammenhänge zwischen genetischen Risikofaktoren für psychiatrische Erkrankungen, den sich daraus ergebenden Netzwerkdynamiken und deren Einfluss auf Kognition und Verhalten. Die entwickelten Computermodelle sollen ein tieferes Verständnis der molekularen und neuronalen Bedingtheit psychiatrischer Erkrankungen wie Schizophrenie und Depression ermöglichen. Darauf aufbauend können dann neuartige pharmakologische Eingriffsmöglichkeiten identifiziert werden („in-silico-Neuropharmakologie“).



Unsere Wahrnehmung ist nicht einfach nur eine Kopie der eingehenden Sinnesreize, sondern spiegelt vielmehr eine abstrakte Interpretation derselben wider. Diese Interpretation beruht auf komplizierten Verarbeitungsprozessen, bei denen die Informationen der Sinnesreize mit spezifischem Vorwissen über die physikalische Beschaffenheit der Welt kombiniert werden. Im **BCCN Tübingen** arbeiten Wissenschaftler aus verschiedenen Disziplinen zusammen, um die Grundlagen dieser Inferenz-Prozesse im Gehirn zu erforschen.



Tübingen

„Wie werden Raum und Zeit in neuronalen Systemen repräsentiert?“ Dies ist das Forschungsthema des **BCCN München**. Die neuronalen Repräsentationen werden mit Hilfe von modernen experimentellen Verfahren, computergestützten Modellierungen und theoretischen Analysen anhand verschiedener sensorischer Modalitäten (akustisch, vestibulär, visuell) untersucht. Ziel der Vorhaben ist es unter anderem, altersbedingte Defizite bei der Raumkognition zu verstehen und diese mit neuen Therapiewegen zu überwinden. Zudem sollen die Erkenntnisse für die Entwicklung technischer Assistenzsysteme verwendet werden.



München

Das Gehirn ermöglicht uns die aktive Wechselwirkung mit unserer Umwelt. Geschwindigkeit, Fehlertoleranz, Anpassungsfähigkeit und Kreativität kennzeichnen die normale Funktion des Gehirns. Dabei ist die Dynamik ein überragendes Merkmal des Gehirns auf allen Ebenen der Betrachtung. Ziel des **BCCN Freiburg** ist es, diese Dynamiken, die ihnen zugrunde liegenden Mechanismen und wechselseitigen Beziehungen und ihre funktionelle Bedeutung für die Funktionen des Gehirns besser zu verstehen, sowie neue Einsichten und Techniken auf bedeutende biomedizinische und neurotechnologische Fragestellungen anzuwenden.



Freiburg

Beispielhaft für die langfristige Überführung der BMBF-Anschubfinanzierung in eigenständige Forschungsstrukturen wurde am Standort Freiburg inzwischen mit dem BCF (Bernstein Center Freiburg) eine selbständige, zentrale Einrichtung der Universität errichtet. Sie fasst die vom BMBF und anderen Drittmittelgebern eingeworbenen Forschungsprojekte im Bereich der Computational Neuroscience und Neurotechnologie zusammen. Außerdem implementiert und koordiniert es die Lehr- und Weiterbildungsaktivitäten in diesem fakultätsübergreifenden Fachbereich.

Bernstein Preis



Bernstein Preisträger (v.l.n.r.):
Jan Benda (2007), Susanne Schreiber (2008), Matthias Bethge (2006)



Bernstein Preisträger 2009: Jan Gläscher



Bernstein Preisträger 2010: Udo Ernst

Die gezielte Förderung besonders talentierter Nachwuchswissenschaftler und Nachwuchswissenschaftlerinnen ist von essentieller Bedeutung für die nachhaltige Verankerung der jungen Disziplin Computational Neuroscience in Deutschland. Mit dem seit 2006 jährlich ausgeschriebenen „Bernstein Preis für Computational Neuroscience“ bietet das BMBF exzellentem wissenschaftlichen Nachwuchs aus aller Welt die besten Bedingungen, um an einer deutschen Forschungseinrichtung eine unabhängige Nachwuchsgruppe zu etablieren und als eigenständige Mitglieder des Bernstein Netzwerks ihre herausragenden Forschungsideen zu verwirklichen. Der Preis ist mit bis zu 1,25 Millionen Euro über 5 Jahre dotiert.

Die Preisträger verfolgen mit einer Kombination von theoretischen und experimentellen Ansätzen vielfältige Fragestellungen.

Matthias Bethge^{6,35} untersucht am visuellen System, wie Informationen im Gehirn kodiert sind und wie relevante von irrelevanter Information getrennt wird.

Jan Benda^{5,36} widmet sich der Frage, welche Rolle neuronale Variabilität bei der Signalverarbeitung in sensorischen Systemen spielt.

In welcher Form dynamische zelluläre Prozesse die Informationsverarbeitung beeinflussen, untersucht **Susanne Schreiber**^{1,15,37}.

Viele Faktoren beeinflussen unsere alltäglichen Entscheidungen. Welche Parameter besonders wichtig sind, erforscht **Jan Gläscher**³⁸.

Udo Ernst^{20,39} untersucht, wie Faktoren wie Vorwissen und Kontext in die Informationsverarbeitung im Sehsystem eingreifen.



Bernstein Partner

Um die in Deutschland vorhandenen Kenntnisse für die Etablierung der noch jungen Disziplin Computational Neuroscience möglichst umfassend zu erschließen und das Themenspektrum des Netzwerks zu erweitern, wurde im Jahr 2007 die Fördermaßnahme „Bernstein Partner“ eingerichtet. Sie umfasst den Aufbau von fünf Bernstein Gruppen, für die insgesamt 5 Mio. Euro zur Verfügung gestellt wurden und elf Bernstein Kooperationen, die mit insgesamt 7,5 Mio. Euro gefördert wurden.

Mit den „Bernstein Gruppen“ wurden neben den Bernstein Zentren weitere, etwas kleinere Strukturkerne geschaffen. Sie fokussieren regionale experimentelle und theoretische Kompetenzen auf enger umgrenzte Themen.

Die Informationsverarbeitung unseres Gehirns verläuft über mehrere Größenordnungen hinweg – von der Molekülebene bis hin zur Wechselwirkung von Hirnarealen. Mit Hilfe von mathematischen Modellen untersuchen Wissenschaftler der **Bernstein Gruppe Heidelberg** subzelluläre und zelluläre Mechanismen der Signalverarbeitung in Neuronen und rekonstruieren die Anatomie einzelner Zellen. Auf dieser Grundlage simulieren sie biologisch hoch detailliert das Verhalten einzelner Zellen und kleiner neuronaler Netze.

Alle kognitiven Leistungen basieren letztlich auf der Aktivität einzelner Nervenzellen, die entweder „feuern“ oder still sind. Doch deren Aktivität spiegelt nicht nur die sensorische Stimulation wider, sondern ist auch starken Schwankungen und übergeordneten Regulationen unterworfen. Welchen Einfluss die variablen Antwortigenschaften der Zellen auf kognitive Funktionen haben, untersucht die **Bernstein Gruppe Magdeburg**.

Auch die eintreffenden Reize sind hoch variabel. Dennoch sind wir, unabhängig von Situation, Licht und sonstigen Faktoren in der Lage, Gesichter oder Gegenstände zu erkennen. Forscher der **Bernstein Gruppe Bremen** untersuchen die Grundlagen dieser erstaunlichen Anpassungsfähigkeit im Sehsystem.

Ein theoretisches Rahmenkonzept der **Bernstein Gruppe Bochum** erklärt, wie höhere Hirnfunktionen aus den räumlichen und zeitlichen Aktivitätsmustern von Nervennetzen hervorgehen können. Dazu werden theoretische Modelle auf Grundlage unterschiedlichster experimenteller Daten formuliert.

Schmerzempfinden ist ein komplexer Vorgang. Mitglieder der **Bernstein Gruppe Jena** entwickeln zeitvariante Analysemethoden und Modelle, um die Wechselwirkungen zwischen den Hirnarealen bei der Schmerzverarbeitung besser untersuchen zu können. Von diesen methodischen Weiterentwicklungen können viele Bereiche der Computational Neuroscience profitieren.

Die „Bernstein Kooperationen“ verknüpfen Bernstein Zentren mit deutschlandweit verteilten Arbeitsgruppen, die wichtige Expertise für die Bearbeitung von thematisch eng umgrenzten Kooperationsprojekten einbringen.

Projekttitle und Förderstandorte:

- Aktionspotential-Kodierung (Bochum /Göttingen)
- Bewegungsassoziierte Aktivierung (Tübingen /Freiburg)
- Gedächtnis-Netzwerk (Gießen /Tübingen /Berlin)
- Informations-Kodierung (Göttingen /München)
- Neuronale Synchronisation (Rostock /Freiburg)
- Neurovaskuläre Kopplung (Tübingen /Berlin)
- Netzwerk-Simulation (Heidelberg /München)
- Olfaktorische Kodierung (Konstanz /Berlin)
- Physiologie und Bildgebung (Erlangen-Nürnberg /Berlin /Magdeburg)
- Transkranielle Stimulation (Kassel /Göttingen /Ilmenau)
- Zeitliche Präzision (Aachen /Berlin)



Bernstein Fokus: Neurotechnologie

Die Fördermaßnahme „Bernstein Fokus: Neurotechnologie“ (BFNT) schlägt eine erste Brücke von der Grundlagenforschung zur technologischen Anwendung. Mit insgesamt 34 Mio. Euro werden seit 2008 Forschungsvorhaben an fünf verschiedenen Standorten gefördert.

Die enge Zusammenarbeit mit renommierten Industriepartnern ist neben der hohen regionalen Fokussierung neurowissenschaftlicher und technologischer Kapazitäten ein wesentlicher Bestandteil des Konzepts. Insgesamt acht Professuren wurden im Rahmen des Bernstein Fokus: Neurotechnologie eingerichtet, die langfristig von dem jeweiligen Bundesland weiterfinanziert werden.

Fortschritte in den Neurowissenschaften erlauben es zunehmend, biologische und informationstheoretische Prinzipien für innovative Lösungsansätze in verschiedenen Anwendungsbereichen (Biomedizin, Informationstechnologie, Robotik) nutzbar zu machen. In den Projekten des Bernstein Fokus: Neurotechnologie werden dazu erste Schritte unternommen.

Der **BFNT Berlin** hat sich zum Ziel gesetzt, insbesondere nichtinvasive Techniken des „brain reading“ systematisch im Hinblick auf Mensch-Maschine-Interaktionen weiterzuentwickeln. Sowohl Auflösung als auch Handhabbarkeit sollen optimiert werden. Zum Einsatz könnte dies zukünftig in der Telekommunikation kommen. Versteht man, wie das Gehirn mit Störungen in Sprachsignalen umgeht, kann man technische Systeme entsprechend optimieren und eine verbesserte Qualität erreichen. Zudem könnte der Einsatz dieser Technik in Fahrerassistenzsystemen einen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit leisten. Mit einem eigens eingerichteten Lehrstuhl „Neurotechnologie“ wird die dauerhafte Ansiedelung des Arbeitsbereichs gefördert.

Am **BFNT Göttingen** arbeiten Wissenschaftler an der Weiterentwicklung neurotechnologischer Feedback-Schleifen. Hierbei greifen biologische und technische Komponenten eng ineinander, so dass das neuronale System das technische Gerät beeinflusst und dieses wiederum Informationen an das neuronale System zurück sendet. Zentrale Anwendungsfelder umfassen Diagnose, Therapie und Rehabilitation neuronaler Defizite, aber auch Prothesensteuerung. Dafür werden unter anderem im Bereich optischer und elektrischer Stimulation und Bildgebung Anstrengungen unternommen.

Die Entwicklung von Neuroprothesen haben sich Wissenschaftler am **BFNT Freiburg – Tübingen** vorgenommen. Ausgehend von elektrischen und chemischen Signalen im Gehirn sollen damit Geräte gesteuert werden, die in Zukunft Schlaganfall-Patienten unterstützen oder bei Epilepsie-Patienten einem Anfall rechtzeitig gegensteuern. Dafür werden Schnittstellen zwischen technischen Geräten und neuronalen Netzen untersucht, Methoden zur Analyse neuronaler Signale (z. B. für Hirn-Computer-Schnittstellen) entwickelt und Strategien zur Stimulation von Nervennetzen erprobt.

Die Fähigkeit, unsere Umwelt optisch wahrzunehmen, ist für die meisten Menschen ebenso selbstverständlich wie essentiell. Für Computer stellt der Wahrnehmungs- und Erkennungsprozess jedoch immer noch eine große Hürde dar. Am **BFNT Frankfurt** plant man die Entwicklung eines künstlichen Sehsystems, das autonom lernen und sich aus grundlegenden Funktionselementen selbst strukturieren soll. Derartige Systeme könnten bei Robotern, bei Fahrer-Assistenzsystemen oder bei der Verkehrsregelung eingesetzt werden.



Bernstein Fokus: Neuronale Grundlagen des Lernens

Der „Bernstein Fokus: Neuronale Grundlagen des Lernens“ ergänzt das Netzwerk durch anwendungsorientierte Verbundprojekte auf dem Innovationsfeld des Lernens. In dieser Fördermaßnahme unterstützt das BMBF seit 2009 acht Forschungsverbünde mit einer Fördersumme von 16 Mio. Euro.

Unser Erinnerungsvermögen hält unser Leben zusammen – über kurze wie über längere Zeiträume. Dass wir wissen, wo wir sind und was wir gerade gemacht haben, verdanken wir unserem Kurzzeitgedächtnis. Dass wir uns an unsere Kindheit und an weit zurück liegende Ereignisse erinnern, ist auf das Langzeitgedächtnis zurückzuführen. Jedes Ereignis, das wir uns merken, verändert das Gehirn ein wenig und hinterlässt seine Spuren. Das Gehirn jedes Menschen ist etwas anders geprägt und durch persönliche Erfahrungen und verschiedenste Lernvorgänge strukturiert.

In den Projekten dieses **Bernstein Fokus** wird ein breites Spektrum an Fragestellungen bearbeitet, wie zum Beispiel: Was verändert sich in einzelnen Nervenzellen bei Konditionierung? Wie lernen Vögel komplexe Gesänge und wie kann unser Gehirn die verschiedenen Gesänge unterscheiden? Welche Vorgänge laufen bei Entscheidungen ab? Welche Architektur muss ein neuronales Netz besitzen, um selbständig zu lernen?

Um den **unterschiedlichen** Aspekten des Lernens auf die Spur zu kommen, arbeiten Forscher aus den experimentellen Wissenschaften und Experten aus der theoretischen

Neurobiologie eng zusammen. Die in der Grundlagenforschung erzielten Erkenntnisse werden aufgegriffen und für klinische Anwendungen weiterentwickelt. Hat man einmal verstanden, welche Ursachen und Auswirkungen unterschiedliche Aktivitäten des Gehirns haben, kann man dieses Wissen unter anderem für die Entwicklung neuer Therapieansätze, zum Beispiel für Schlaganfall- oder Demenz-Patienten verwenden.

Auch im technologischen Bereich sind innovative Anwendungen zu erwarten. In mathematische Formeln verpackt, lassen sich biologische Erkenntnisse für die Entwicklung moderner Computersysteme verwenden. Weitere mögliche Anwendungsfelder reichen von Fahrerassistenzsystemen bis hin zu autonom agierenden Robotern, die ihre Umwelt erkunden und ihr Handeln anpassen können.

Projekttitle und Förderstandorte:

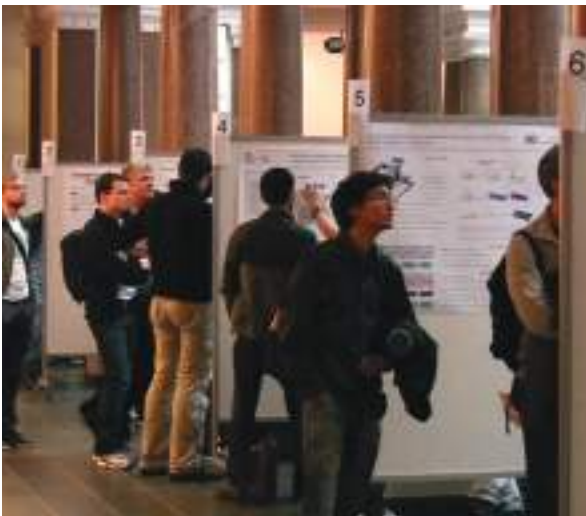
- Gedächtnis und Entscheidungsfindung
(Berlin / Freiburg / Würzburg)
- Komplexe Lernvorgänge (Hamburg / Berlin)
- Kurzzeitgedächtnis (Martinsried / München / Konstanz)
- Lernen von Verhaltensmodellen (Bochum / Lauffen)
- Plastizität neuronaler Dynamik (Martinsried / München)
- Sequenzlernen
(Bochum / Berlin / Bremen / Oldenburg)
- Visuelles Lernen (Jena / Göttingen)
- Zustandsabhängigkeit des Lernens
(Berlin / Bochum / Lübeck / Leipzig)

Bernstein Konferenz

Wie das Gehirn, so lebt auch ein Forschungsnetzwerk von seinen vielfältigen Verbindungen. Die jährlich stattfindende „Bernstein Konferenz“ bietet dazu eine zentrale Plattform. Was als internes Forum begann, hat sich zu einer bedeutenden internationalen Konferenz entwickelt, die mannigfache Gelegenheiten zu intensivem wissenschaftlichen Austausch und zum Knüpfen neuer Kontakte mit Bernstein Mitgliedern und weiteren nationalen und internationalen Forschern bietet. Als Sprecher werden weltweit führende Experten eingeladen. Im Rahmen der Kon-

ferenz wird auch der Bernstein Preis feierlich übergeben. Das Treffen findet an jährlich wechselnden Standorten des Netzwerks statt.

Im Anschluss an die Konferenz findet ein von Studenten des Bernstein Netzwerks organisiertes Symposium statt. Hier haben die Nachwuchswissenschaftler die Möglichkeit, ihre Arbeiten zu präsentieren und in lockerer Atmosphäre Ideen untereinander und mit geladenen Rednern auszutauschen.





Nachwuchsförderung

Anspruchsvolle Forschung braucht gut ausgebildete Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen. Deshalb engagieren sich die Mitglieder des Bernstein Netzwerks in einer Vielzahl von Studiengängen und Weiterbildungsangeboten, von der grundständigen Lehre in Bachelor- oder Diplom-Studiengängen über Master- und Promotionsprogramme bis hin zu Spezialkursen für fortgeschrittene Wissenschaftler.

Am Bernstein Zentrum Berlin ist in Zusammenarbeit von Technischer Universität, Freier Universität, Humboldt Universität und Charité neben einem PhD-Programm auch der erste Masterstudiengang in Computational Neuroscience entstanden.



Interview mit Klaus Obermayer^{1, 7, 17, 27, 41}
*Technische Universität Berlin
Kordinator des ersten deutschen
Master-Studiengangs in
Computational Neuroscience*

An wen richten sich Ihre Studienangebote?

Wir richten uns sowohl an Studierende aus theoretischen wie an solche aus experimentell orientierten Disziplinen. Studenten der Mathematik, Physik oder Informatik lernen bei uns, ihr Wissen auf die Neurobiologie anzuwenden. Auf der anderen Seite sollen Biologen, Medizinern und Psychologen notwendige theoretische Kenntnisse vermittelt werden. Diese Interdisziplinarität ist sehr gewinnbringend für alle. Die Bewerber für das Masterstudium benötigen einen ersten Abschluss in Form von Bachelor oder Diplom. Für das PhD-Programm ist ein Master oder ein Diplom Voraussetzung.

Aus welcher Motivation heraus bewerben sich Studierende?

Die Motivationen sind so divers wie die gesamte Disziplin. Manche möchten die Funktionsweise des Gehirns verstehen, aus Perspektive der Biologie oder Informatik. Aber auch die klinische Forschung sowie die biomedizinische

Technik stellen für viele interessante Arbeitsfelder dar. Schließlich gibt es einige, die eher aus einer technischen Richtung kommen und im Bereich künstliche Intelligenz oder autonome Roboter forschen möchten.

Wie sind die beiden Studiengänge aufgebaut?

In beiden Fällen setzen wir fundierte Mathematikkenntnisse voraus. Im ersten Jahr des Master-Studiums werden die Grundlagen der Computational Neuroscience vermittelt. Das betrifft die Modellierung neuronaler Systeme sowie höherer Hirnfunktionen, die Analyse neuronaler Daten und maschinelles Lernen. Im forschungsorientierten zweiten Jahr realisieren die Studenten drei wissenschaftliche Projekte aus den Bereichen Experiment und Theorie und schließlich ihre Masterarbeit.

PhD-Studenten erarbeiten sich zu Beginn durch Fachkurse die spezifischen wissenschaftlichen Grundlagen. Die Möglichkeit zu weiterführenden Kursen in Berlin oder anderswo erlaubt ihnen in den folgenden Semestern, ihr wissenschaftliches Spektrum zu erweitern.

Die Programme laufen schon einige Jahre. Was geschieht mit den Absolventen?

Die meisten, die das Master-Programm durchlaufen haben, möchten mit einem PhD weitermachen. Auch nach dem PhD bleibt die überwiegende Mehrheit im akademischen Bereich. Einige konnten auch in der Grundlagenforschung der Industrie Fuß fassen.

Welchen Beitrag leistet die Lehre für die Computational Neuroscience?

Mit den verschiedenen Programmen gelingt es uns, hochqualifizierte Studenten aus aller Welt nach Deutschland zu holen. An den steigenden Bewerberzahlen für Master und PhD können wir erkennen, dass die Attraktivität unseres Studienangebots weiter zunimmt. Auch dadurch gehört Deutschland mittlerweile international zu den führenden Ländern in dieser Disziplin. Ich bin davon überzeugt, dass Industrie und Forschung die Methoden und Modelle der Computational Neuroscience in Zukunft noch stärker nachfragen werden. Damit steigt auch der Bedarf an hervorragenden Absolventen.



Internationalisierung

Die moderne Wissenschaft bleibt nicht an Ländergrenzen stehen. Mitglieder des Netzwerks unterhalten vielfältige weltweite Kontakte zu anderen führenden Wissenschaftlern und Zentren für Computational Neuroscience. Internationale Kooperationen und Austauschprogramme (z. B. mit den US-amerikanischen Sloan-Swartz-Zentren für theoretische Neurobiologie) unterstützen den wissenschaftlichen Austausch.

In einer Serie bilateraler Workshops werden unter Beteiligung der nationalen Förderorganisationen gezielt Kontakte zu in Computational Neuroscience besonders aktiven Ländern gefördert und die Potentiale einer verstärkten Zusammenarbeit ausgelotet. Aus solchen Workshops sind bereits Förderabkommen mit USA und Japan und eine neue

deutsch-US-amerikanische Fördermaßnahme in Computational Neuroscience (siehe unten) hervorgegangen.

**Hirsh Cohen**

Wissenschaftlicher Direktor der Swartz Foundation, USA

„Über unser jährliches Austauschprogramm hatten wir im Sloan-Swartz-Zentren-Programm das Glück, einige der hervorragenden Nachwuchstalente der Computational Neuroscience kennenzulernen. Durch diese und viele andere Maßnahmen teilen wir die Begeisterung für dieses schnell wachsende und überaus wichtige Forschungsfeld.“

Deutsch US-amerikanische Kooperationen



Im Rahmen der transnationalen Fördermaßnahme „Deutschland – USA Zusammenarbeit in Computational Neuroscience“ unterstützen das BMBF, die National Science Foundation (NSF) und die National Institutes of Health (NIH)

seit 2010 transatlantische Kooperationen in Computational Neuroscience. Für die erste Förderrunde wurden von deutscher wie von amerikanischer Seite je 1,7 Mio. Euro zur Verfügung gestellt. Weitere Förderrunden sollen die deutsch-US-amerikanische Zusammenarbeit weiter intensivieren. Folgende Projekte werden bereits gefördert:

- Berlin – Cambridge: Die Rolle von Astrozyten in der Informationsverarbeitung kortikaler Netzwerke
- Freiburg – Cambridge: Integration von bottom-up und top-down Signalen bei der visuellen Erkennung
- Lübeck – New York: Die Wirkung von schwachen elektrischen Strömen auf die Gedächtniskonsolidierung im Schlaf
- Mannheim – Los Angeles: Persistierende Aktivität im medialen Temporallappen in vivo
- München – San Diego: Hippocampale Repräsentation auditorischer und räumlicher Sequenzen

Deutscher INCF-Knoten (G-Node)

Der wissenschaftliche Fortschritt in den Neurowissenschaften kann durch den Austausch von Methoden und die Erarbeitung von Standards erheblich beschleunigt werden. Zu diesem Zweck wurde 2005 auf Empfehlung einer Arbeitsgruppe der „Organisation for Economic Cooperation and Development“ (OECD) die „International Neuroinformatics Coordinating Facility“ (INCF) mit derzeit weltweit 16 Mitgliedsländern und Deutschland als Gründungsmitglied eingerichtet. INCF unterstützt als internationale Plattform den Austausch von Daten, Modellen und Analyse-Werkzeugen und fördert so die methodische Standardisierung. Der deutsche INCF-Knoten in München (G-Node) wird vom BMBF seit 2008 mit einem

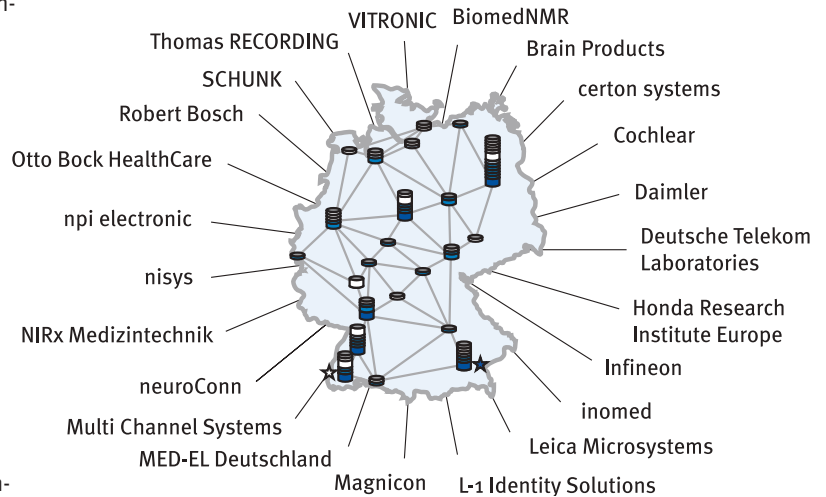


Fördervolumen von ca. 2 Mio. Euro finanziert. Als integraler Bestandteil des Bernstein Netzwerks dient er als zentraler Verknüpfungspunkt zu dem weltumspannenden Netzwerk der INCF. Der G-Node unterstützt nationale und globale Kollaborationen zwischen experimentellen und theoretischen Neurowissenschaftlern. Dafür stellt er eine „Open-Source Infrastruktur“ zur Verfügung, die den Datenzugang sowie die Speicherung und Analyse elektrophysiologischer Daten wesentlich erleichtert. Diese Struktur kann optimal auf die Bedürfnisse und Wünsche der jeweiligen Forscher zugeschnitten werden. G-Node ergänzt die Lehre und Weiterbildung im Bernstein Netzwerk im Bereich der Methodenentwicklung und Datenanalyse.



Industrie-Kooperationen

Die Computational Neuroscience bietet ein immenses Potenzial für technologische Anwendungen. Darum stehen die Mitglieder des Bernstein Netzwerks in enger Kooperation mit über 20 Industriepartnern aus den verschiedensten Bereichen, von der Informationstechnologie und Elektronikbranche über Labor- und Medizingerätehersteller bis hin zur Telekommunikationsbranche und der Automobilindustrie. Dies erleichtert und beschleunigt den Wissenstransfer zwischen Forschung und Wirtschaft. Zusätzlich werden in Workshops und bilateralen Treffen mit Teilnehmern aus Akademia und Industrie Themenfelder identifiziert, die für die Entwicklung neuer Anwendungen besonders vielversprechend erscheinen.

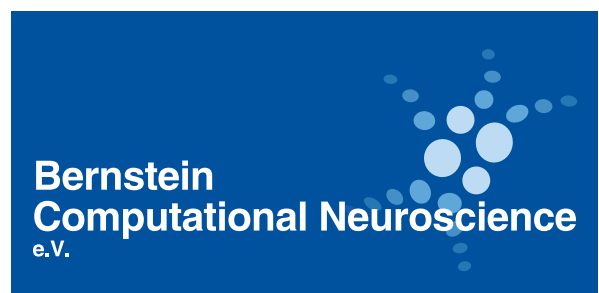


Bernstein Computational Neuroscience e.V.

Die Öffentlichkeit setzt große Erwartungen in die Erkenntnisse der Neurowissenschaften. Gerade das Forschungsfeld der Computational Neuroscience ist hochkomplex und es bedarf besonderer Anstrengungen, Forschungsinhalte und -ergebnisse sowie ihre Bedeutung für Wissenschaft und Gesellschaft darzustellen.

Der 2009 gegründete Bernstein Computational Neuroscience e. V. stellt sich dieser Aufgabe. Er hat zum Ziel, die Forschung und Lehre in Computational Neuroscience in Deutschland zu fördern und die Forschungsthemen der breiten Öffentlichkeit allgemeinverständlich zu vermitteln. Als gemeinnütziger Verein finanziert er seine Aktivitäten aus Spenden und Mitgliedsbeiträgen.

Mit dem international ausgeschriebenen „Brains for Brains Award“ gibt der Verein jungen Forschern aus aller Welt eine einzigartige Gelegenheit, die Wissenschaftslandschaft in Deutschland kennenzulernen, ihre Arbeit im Rahmen der Bernstein Konferenz vor einem Fachpublikum zu präsentieren und persönliche Kontakte zu hiesigen Experten zu knüpfen.



Der Code des Gehirns

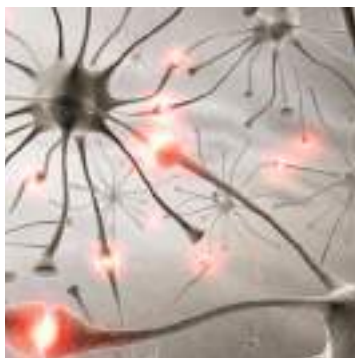
Das Gehirn ist das komplexeste informationsverarbeitende System, das die Evolution hervorgebracht hat. Mit unseren Sinnen nehmen wir die Welt wahr, wir interpretieren, was wir sehen und hören, denken nach und planen unsere Handlungen. Ein System kann nur dann Informationen empfangen, speichern und verarbeiten, wenn es über eine „Sprache“ verfügt, also eine interne Repräsentation der Botschaften, in denen es die Informationen verschlüsselt. Auch das Gehirn hat einen solchen Code. Neuronen leiten Informationen in Form von elektrischen Signalen weiter, die als Aktionspotentiale oder Spikes bezeichnet werden. Jede Information ist in dem räumlichen und zeitlichen Muster dieser Spikes codiert. Wie aber genau sieht dieser neuronale „Morsecode“ aus? Viele Wissenschaftler weltweit arbeiten daran, dieses Rätsel zu knacken.

Bei manchen Neuronen, so hat sich herausgestellt, ist die Anzahl der Spikes entscheidend, die sie in einem bestimmten Zeitraum aussenden. Einige Sinneszellen funktionieren nach diesem Prinzip – je lauter ein Ton oder je heller das Licht, desto schneller „feuern“ sie. Auch bei Neuronen, die Muskeln ansteuern, ist die Spike-Rate entscheidend. Je schneller die Spike-Folge, desto stärker die muskuläre Kontraktion. Dieses Prinzip ist aber nur eine von vielen Möglichkeiten, Informationen zu übermitteln.

Oft ist auch der exakte Zeitpunkt der Impulse von großer Bedeutung. Bei der Ortung von Geräuschen, die von Forschern um Benedikt Grothe^{5,16} und Hermann Wagner²⁹ untersucht wird, ist dies zum Beispiel der Fall. Ein akustisches Signal erreicht das Ohr, das der Schallquelle zugewandt ist, minimal früher als das abgewandte Ohr. Es resultiert eine binaurale Zeitdifferenz. Neuronen können binaurale Zeitunterschiede von weniger als hundert Mikrosekunden messen – dies ist wohl einer der zeitlich präzisesten Mechanismen, die das Gehirn verwendet. Die gemittelte Spike-Rate der Neuronen hängt von der binauralen Zeitdifferenz ab: treffen zwei Signale gleichzeitig ein, ist die Rate maximal. Mit steigenden Zeitunterschieden nimmt die Spike-Rate ab. Die Neuronen fungieren also als sehr präzise

Koinzidenzdetektoren. Dieser Verarbeitungsmechanismus scheint in der Evolution von Säugetieren und Vögeln zweimal unabhängig voneinander entstanden zu sein.

Um das genaue Timing der Aktivität einer Nervenzelle relativ zu anderen Zellen zu messen, können neuronale Oszillationen – gemeinsame Rhythmen ganzer Gruppen von Nervenzellen – als Referenzrahmen genutzt werden. Viele Neuronen haben eine „Eigenresonanz“ – eine Art Lieblingsfrequenz, in der sie bevorzugt Signale aussenden.



Eine einzelne Nervenzelle kommuniziert mit bis zu 10 000 Zellen gleichzeitig.

Da sie in einem komplexen Netzwerk miteinander verknüpft sind und jedes Neuron auf Signale seiner Nachbarn antwortet, spielt sich ein gemeinsamer Rhythmus ein – ähnlich wie synchrones Klatschen vieler Zuschauer nach einem Konzert. Verschiedene Wissenschaftler des Bernstein Netzwerks beschäftigen sich damit, wie Oszillationen entstehen und bedienen sich dabei eines multidisziplinären Ansatzes, der unter anderem Computersimulationen beinhaltet (s. „Computermodelle des Gehirns“, S. 21). Marlene Bartos², Peter Jonas², Hannah Monyer^{4,21} und

Susanne Schreiber^{1,15,37} untersuchen unter anderem, welche Rolle inhibitorische Neuronen (Neuronen, die andere Zellen hemmen anstatt sie zu erregen) bei der Entstehung solcher Oszillationen spielen und wie diese zur Kodierung von Information beitragen können. Gemeinsames Schwingen vieler Neuronen kann häufig beobachtet werden. Auch während des Schlafs werden neuronale Oszillationen gemessen. Beispielsweise für unser Ortsgedächtnis sind sie von Bedeutung.

Eine weitere Funktion neuronaler Oszillationen wurde von Christoph von der Malsburg⁸ erstmals theoretisch formuliert und durch die Forschung von Wolf Singer⁸ unterstützt. Oszillationen, so die Idee, könnten dazu beitragen, verteilte Aktivitäten des Gehirns zu Wahrnehmungseinheiten zusammenzufügen. Bei der visuellen Wahrnehmung zum Beispiel werden verschiedene Eigenschaften eines Objektes – Farbe, Form und Bewegung – in unterschiedlichen Bereichen der visuellen Hirnrinde verarbeitet. Die Hypothese der Forscher ist, dass erst durch die synchrone



„Eine prominente Kritik an der Vorstellung eines Freien Willens geht davon aus, dass dieser allein schon deshalb eine Illusion sein müsse, weil die Dynamik neuronaler Prozesse deterministischen Gesetzen folge. Dies ist aber nicht der Fall. Thermisches Rauschen führt auf allen Ebenen des Gehirns zu zufälligen Schwankungen, so dass Denk- und Entscheidungsprozesse letztlich immer unbestimmt bleiben. Diese Erkenntnis sollte nicht als Erklärung von Willensfreiheit missverstanden werden, zeigt aber, dass die vermeintlichen Schlussfolgerungen des sogenannten ‚Neuronalen Determinismus‘ aus wissenschaftlicher Sicht nicht haltbar sind.“

Andreas Herz^{1, 5, 14, 25, 40}

Aktivität der Neuronen in diesen verschiedenen Bereichen das Objekt als Einheit wahrgenommen wird.

Lange Zeit dachte man, dass ein Nervennetz entweder die Rate von Nervenimpulsen zuverlässig weiterleiten oder aber deren Zeitpunkte präzise übermitteln könne, nicht aber beides gleichzeitig. Ad Aertsen^{2, 9}, Arvind Kumar² und Stefan Rotter^{2, 9} zeigten kürzlich jedoch mit Hilfe von Netzwerksimulationen, dass beide Arten der Informationsübertragung unter bestimmten, wohlverstandenen Bedingungen sehr wohl in ein und demselben neuronalen Netzwerk möglich sind. Damit konnten sie ein grundlegendes Modell der neuronalen Signalübertragung wesentlich erweitern.

Neben den neuronalen Mechanismen der Informationsübertragung stellt sich den Neurowissenschaftlern

auch noch eine weitere große Frage. Entgegen klassischer Annahmen folgen Nervenzellen nicht einem simplen, stereotypen Reiz-Reaktionsschema. Bei gleichem Stimulus reagiert eine Zelle im einen Fall, im anderen aber nicht. Diese „Unzuverlässigkeit“ werde dadurch ausgeglichen, so war man lange der Meinung, dass viele Zellen gleichzeitig arbeiten und sich derartige „Fehler“ herausmitteln. Doch neue Versuche haben gezeigt, dass bereits die Aktivität einzelner Zellen das Verhalten eines Tieres beeinflussen kann (s. Interview mit Michael Brecht, S. 20). Eine weitere Annahme ist, dass dieser neuronale „Geräuschpegel“ die Empfindlichkeit einzelner Zellen und die Synchronität ganzer Netzwerke regulieren kann. Herauszufinden, welche Funktionen außerdem im Signalfeuerwerk des Gehirns verborgen sind, ist weiterhin eine Herausforderung für die Wissenschaftler des Bernstein Netzwerks.

Balzende Männchen bringen Weibchen aus dem Takt

Nervenzellen können Informationen auf verschiedene Weisen codieren: in der Feuerrate oder in den genauen Zeitpunkten, zu denen Aktionspotentiale ausgesendet werden, beispielsweise in Bezug zu einer Oszillation des ganzen Netzwerks. Jan Benda^{5, 36} hat eine weitere Variante der zeitlichen Codierung aufgedeckt. In diesem Fall wird nicht gefragt: „Wieviel weicht ein einzelnes Neuron von der Oszillation ab?“, sondern: „Wie synchron schwingt die ganze Gruppe von Neuronen?“ Einen solchen „Synchronitätscode“ nutzen die Elektrorezeptoren von schwach-elektrischen Fischen. Begegnet ein männlicher Fisch einem Weibchen, sendet er Balzsignale. Diese Signale bringen die synchrone Schwingung der Elektrorezeptor-Neurone des Weibchens durcheinander, sie feuern nun weniger synchron. Begegnet ein männlicher Fisch einem anderen Männchen, werden hingegen Aggressionssignale ausgetauscht. Diese Signale führen dazu, dass die Elektrorezeptor-Neurone synchroner feuern als bisher. Die Synchronität der neuronalen Antworten enthält also für die Fische wichtige Informationen über ihre Umwelt. Zufällige Fluktuationen der elektrischen Sig-

nale des Gehirns – so genanntes Hintergrundrauschen – bekommen angesichts eines solchen Synchronitätscodes eine ganz spezielle Bedeutung. Die Stärke des Rauschens verändert die Synchronität der Neurone. „Bisher hat man im Hintergrundrauschen meist nichts weiter als eine systembedingte, unvermeidliche Störgröße gesehen. Es kann aber auch sein, dass durch das Hintergrundrauschen die genauen Verarbeitungseigenschaften des Neurons eingestellt werden“, meint Benda^{5, 36}.



Schwach-elektrische Fische produzieren ein elektrisches Feld, das sie für Orientierung und Kommunikation verwenden.



Interview mit Michael Brecht ^{1, 15}
*Humboldt Universität zu Berlin
Koordinator des Bernstein
Zentrums Berlin*

Wie funktioniert die reverse Physiologie?

Mit Hilfe von Elektroden reizen wir einzelne Zellen im Gehirn eines Tieres und messen dann die Verhaltensänderungen. Dadurch können wir den Einfluss einzelner Zellen, beispielsweise in einer sensorischen Wahrnehmungsaufgabe, auf die wir Ratten trainieren, sehr gut untersuchen. Im Vergleich zur klassischen Neurophysiologie, bei der das Tier mit einem Signal gereizt und dann die neuronale Antwort gemessen wird, gehen wir also sozusagen den umgekehrten Weg.

Wie groß ist der Einfluss einzelner Zellen vor dem Hintergrund des neuronalen Rauschens?

Sehr groß. Wir können eindeutig Bewegungen auslösen, auch wenn wir nur eine einzelne Zelle reizen. Früher ging

man davon aus, dass das Gehirn nur durch das Mitteln der Aktivitäten vieler Zellen präzise arbeiten kann. Ich glaube, dass unsere Experimente diese Hypothese widerlegen. Wir denken, dass das Gehirn wesentlich präziser arbeitet als früher vermutet. Wie, ist im Kern allerdings noch nicht verstanden.

Ist die neuronale Variabilität also eher unverstandene neuronale Aktivität als echtes Rauschen?

Da gehen die Meinungen unter Wissenschaftlern sehr weit auseinander. Ich glaube aber, dass es so ist. Ansonsten wäre es wirklich unmöglich, durch eine einzelne Zelle einen Effekt im Verhalten zu erzielen.

Taktgeber im Gehirn helfen dem Gedächtnis auf die Sprünge

Wenn Milliarden Nervenzellen Informationen austauschen, stellen sich in ihrer Aktivität oftmals bestimmte Rhythmen ein. An diesem Prozess sind Neuronen beteiligt, die andere Zellen nicht aktivieren, sondern hemmen (sog. inhibitorische Neuronen). Es ist bekannt, dass diese bei Gedächtnisbildung und Informationsverarbeitung eine zentrale Rolle spielen. Marlene Bartos² und britische Kollegen schalteten die Funktion schneller inhibitorischer Neuronen im Hippocampus von Mäusen aus. Dieser Teil des Gehirns ist Sitz des Orts- und Arbeitsgedächtnisses. Die Tiere wiesen zu Beginn des Versuchs keine Verhaltensänderungen auf. Erst als die Tiere ein intaktes Arbeitsgedächtnis benötigten, um sich in einem Labyrinth zurechtzufinden, zeigten sie Defizite und machten deutlich mehr Fehler als gesunde Tiere. Daraus schlossen Bartos² und Kollegen, dass schnell hemmende Neuronen speziell für das räumliche Arbeitsgedächtnis von Bedeutung sind. Auch bei Schizophrenie tritt eine Verminderung des Arbeitsgedächtnisses auf. Bislang wurden die Defizite hauptsächlich in der Großhirnrinde vermutet. Die neuen Ergebnisse weisen nun darauf hin, dass diese Erkrankung zum Teil auch auf eine veränderte Funktion schnell hemmender Zellen im Hippocampus zurückzuführen sein kann.



Der richtige Takt im Gehirn wird von hemmenden Neuronen angegeben und spielt bei Gedächtnisbildung und Verhalten eine wichtige Rolle.

Computermodelle des Gehirns

Komplexe Systeme wie beispielsweise das Klima, die Börse und unser Gehirn sind schwer zu verstehen. Intuition oder einfaches Kombinieren versagen, wenn wir uns das Verhalten des Gesamtsystems mit all seinen vielfältigen Interaktionen erschließen möchten. Um die Zusammenhänge besser zu verstehen, und um Hypothesen zu einzelnen Aspekten zu testen, sind mathematische Modelle und Computersimulationen eine große Hilfe. Sie enthalten Regeln, welche die Wechselwirkungen zwischen den Systemparametern – im Beispiel des Klimas etwa Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Temperatur – beschreiben. Auf dieser Grundlage treffen sie Vorhersagen (zum Beispiel für das Wetter der nächsten Tage) und stellen Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Parametern dar.

Neurobiologische Experimente untersuchen einzelne Aspekte neuronaler Prozesse und Interaktionen. Aufgrund dieser Ergebnisse formulieren Wissenschaftler mathematische Regeln und Modelle, um diese – entweder mit Papier und Bleistift oder in einer Computersimulation – zur Prüfung detaillierter Fragen zu verwenden, wie zum Beispiel: Welche Prozesse sind für die Reizübertragung zwischen Nervenzellen besonders kritisch? Wie verarbeitet eine Nervenzelle tausende Eingangsimpulse gleichzeitig? Welche Berechnungen kann ein bestimmtes neuronales Netzwerk leisten? Mit den Mitteln der modernen Computertechnologie können die Wissenschaftler heute Zell- und Netzwerkmodelle enormer Komplexität und biologischer Realitätsnähe untersuchen.

Die elementaren Bausteine des Nervensystems sind Neuronen. Sie übermitteln Signale in Form von elektrischen Impulsen, den so genannten Aktionspotentialen oder Spikes. Im Jahr 1952 formulierten Alan Lloyd Hodgkin und Andrew Fielding Huxley ein mathematisches Modell, das die Entstehung und Weiterleitung von Spikes im Riesenaxon des Tintenfisches erklärt. Dieses Modell bildet bis heute die Grundlage vieler Simulationen des Gehirns und lange Zeit wurde ange-

nommen, dass es für alle Tiere gleichermaßen zutrifft. Maxim Volgushev³² und Fred Wolf^{3,10,12,32} konnten jedoch vor wenigen Jahren mit hochpräzisen Messungen zeigen, dass die Spike-Erzeugung im Säugerhirn schneller und variabler ist als diese Theorie vorhersagt. Sie erstellten ein modifiziertes Modell, das mit den neuen Befunden kompatibel ist und im Vergleich zum ursprünglichen Modell auf feine Unterschiede im molekularen Mechanismus der Spike-Erzeugung hindeutet.

An den Kontaktstellen zwischen zwei Neuronen, den Synapsen, wird der elektrische Impuls des Aktionspotentials in ein chemisches Signal umgewandelt. Das vorgeschaltete Neuron schüttet Transmittersubstanzen aus, die vom nachgeschalteten Neuron registriert werden. Dieser Übersetzungsprozess eröffnet vielfältige Möglichkeiten zur Regulation der Reizweiterleitung. Wie stark die Reizung des nachgeschalteten Neurons ausfällt, hängt unter anderem stark von der Vorgeschichte der jeweiligen synaptischen Aktivität ab. Erwin Neher^{3,10} gelang es, in Experimenten und im Modell zu zeigen, warum die Stärke von Synapsen davon abhängt, wie viele Impulse in einem kurzen Zeitabschnitt eingetroffen sind. Diese „Kurzzeit-Plastizität“ ermöglicht es uns unter anderem, auf Reize sehr schnell, aber auch in Abhängigkeit vom Kontext sehr unterschiedlich zu reagieren.

Bei vielen neuronalen Erkrankungen wie Depression oder Parkinson ist die Ausschüttung von Neurotransmittern beeinträchtigt. Gabriel Wittum^{8,21} und Andreas Draguhn^{4,21} untersuchen, unter anderem im Computermode, welchen Einfluss dies auf die Signalverarbeitung hat und wie Medikamente die Beeinträchtigungen lindern können.

Mathematische Modelle erlauben es, neuronale Verarbeitungsprozesse auf mehreren Ebenen zu untersuchen, von molekularen Wechselwirkungen bis hin zur Kommunikation großer neuronaler Netzwerke. Die „Kunst“ derartiger Computersimulationen liegt in der richtigen



Selbst moderne Computercluster rechnen Stunden, um wenige Minuten neuronaler Aktivität zu simulieren.



„Wenn das Gehirn Sinneseindrücke aufnimmt, verrechnet oder sich erinnert, verarbeitet es Informationen, die in Folgen von Aktionspotentialen in mehreren Nervenzellen verschlüsselt sind. Wie aber hängen die Folgen der Impulse von der Verknüpfungsstruktur des Gehirns ab, oder gar von den genauen Eigenschaften der einzelnen Nervenzellen und deren Verbindungen? Um solche Fragen zu untersuchen, braucht man adäquate Netzwerkmodelle.“

Ad Aertsen^{2,9}

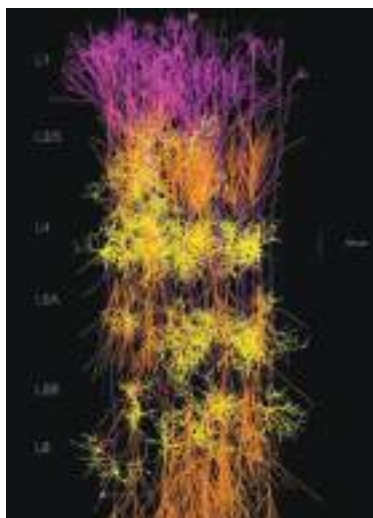
Balance zwischen Detail und Abstraktion. Wo dabei das Optimum liegt, hängt ganz von der Fragestellung ab. Ad Aertsen^{2,9}, Markus Diesmann^{2,9}, Abigail Morrison² und Stefan Rotter^{2,9} nutzen ein System aus parallel rechnenden Computern, um ein Netzwerk aus mehreren 100.000 Neuronen, jedes einzelne mit jeweils 10.000 synaptischen Kontakten, zu simulieren – das entspricht etwa einigen Kubikmillimetern der Großhirnrinde. Mehrere Stunden rechnet das System, um nur wenige Minuten neuronaler Funktion – einschließlich biologischer Details wie synaptischer Plastizität, der postulierten Grundlage des Lernens – zu simulieren, (s. „Lernen und Erinnern“, S. 30). Peter Bastian^{4,34}, Andreas Draguhn^{4,21} und Stefan Lang⁴ simulieren zusätzlich zur elektrischen Aktivität innerhalb der Nervenzellen auch die elektrischen Felder in den Zellzwischenräumen. Sie erhoffen sich davon ein besseres Verständnis dessen, wie elektrische Signale, die beispielsweise mit der Elektroenzephalografie (EEG) gemessen werden, entstehen.

Auch die Vorhersage eines Phänomens neuronaler Dynamik, das man in anderen Systemen unter dem Begriff „selbstorganisierte Kritikalität“ kennt, wurde mit mathe-

matischen Modellen möglich. Lässt man etwa Sand auf einen Sandhaufen rieseln, so bleiben die meisten Sandkörner einfach liegen. Oft entstehen jedoch kleinere oder größere Lawinen. Ein ähnliches Verhalten wurde in neuronalen Systemen vorhergesagt und experimentell beobachtet, wo aus kleinen spontanen Erregungen neuronale Aktivitätslawinen werden können. Falls dieser Effekt von selbst zustande kommt und sich über eine große Bandbreite erstreckt, spricht man von selbstorganisierter Kritikalität. Theo Geisel^{3,10}, Michael Herrmann^{3,10} und Anna Levina³ erklären die Dynamik neuronaler Lawinen durch die Wirkung von selbstregelnden Mechanismen auf der synaptischen Ebene und interpretieren ihre Funktion so: Gerade dadurch, dass das Gehirn auch im „Leerlauf“ Aktivität jeden Ausmaßes produziert, kann es einen Zustand aufrechterhalten, in welchem es für Reize von verschiedenster Stärke sensitiv bleibt. Auf diese Weise werden schwache Reize nicht übersehen, während stärkere immer noch zu einer adäquaten Reaktion führen.

Aber wie kann es sein, dass unser Gehirn Aktivität produziert, auch wenn gar kein Reiz von außen gegeben wird, etwa wenn wir unseren Gedanken nachhängen? In großen Netzwerken, in denen jedes einzelne Neuron mit vielen anderen verschaltet ist, konnte Stefan Rotter^{2,9} zum ersten Mal beobachten, dass neuronale Aktivität über lange Zeit und auch ohne weiter bestehenden Außenreiz aufrecht erhalten blieb. Das Netzwerk beschäftigte sich sozusagen mit sich selbst. Könnte solches Verhalten der Baustoff für Gedanken und Erinnerungen sein?

Von den Grundlagen von Hören oder Sehen über die Entstehung des Gedächtnisses bis hin zur Wirkungsweise von Medikamenten – bei einer Vielfalt von Fragen helfen Computermodelle, Theorien durchzuspielen und Hypothesen zu überprüfen. Eine Übertragung von neurophysiologischen Prozessen in Computerprogramme bietet auch neue Ansatzpunkte für technologische Entwicklungen (s. „Ersatzteile für das Gehirn“, S. 33 und „Roboter der Zukunft“, S. 36).



Dreidimensionale Rekonstruktion einer kortikalen Kolumne. Sie stellt eine wichtige Einheit im Großhirn dar und ist etwa einen Millimeter breit.



Selbstorganisation statt Umwelt und Genen

In den Gehirnen von Frettchen, Spitzhörnchen und Buschbabys entdeckte ein Team um Fred Wolf^{3,10,12,32} und Siegrid Löwel^{10,12,32} eine überraschende Ähnlichkeit: Die Anordnung von Nervenzellen in der Sehrinde, die auf Kanten der gleichen Orientierung antworten, folgten in den drei Arten exakt demselben Design. Weder frühe Umwelteinflüsse



Die Organisation der Sehrinde gleicht sich bei Spitzhörnchen (links) und Buschbaby auf verblüffende Weise.

noch Vererbung konnten diesen Befund erklären. Mit Hilfe eines mathematischen Modells jedoch, das beschreibt, wie sich neuronale Schaltkreise im Gehirn selbstorganisiert entwickeln, konnten die Wissenschaftler die Gehirnarchitektur exakt vorhersagen. Die neue Erkenntnis unterstreicht die fundamentale Rolle der Selbstorganisation bei der Hirnentwicklung. Ein vertrautes Beispiel für einen Selbstorganisationsprozess ist der so genannte Paranusseffekt, durch den die größten Nüsse in der Müslipackung stets nach oben wandern. Modelle zur Selbstorganisation dienen auch als Erklärung für physikalische Prozesse wie dem Dünenwachstum und finden unter anderem in der Analyse von Verkehrsstaus und bei der Arbeitsorganisation von Großgruppen Anwendung.

Augenbewegungen im mathematischen Modell

Sehen wir ein fahrendes Auto, müssen wir unsere Augen mit genau der richtigen Geschwindigkeit bewegen, um dem Objekt zu folgen. An solchen Augenfolgebewegungen sind zwei Hirnareale beteiligt, die ihre Informationen auf parallelen Wegen erhalten. Stefan Glasauer⁵ und Kollegen erstellten ein Computermodell mit den wichtigsten Verschaltungen des biologischen Vorbilds. Das Modell war in der Lage, einem Objekt zu folgen. Und mehr noch: „Erstmals ist es uns gelungen, zu erklären, wofür die parallelen anatomischen Verarbeitungspfade gut sind“, so Glasauer⁵. Sie wiesen nach, dass in einem Areal die Grundgeschwindigkeit, im anderen vor allem die Beschleunigung berechnet wird. Ihr Modell bestätigte sich in Experimenten, in denen bei Probanden durch transkranielle Magnetstimulation (TMS) gezielt eines der beiden Areale für wenige Sekunden ausgeschaltet wurde.



Pfeifende Simulationen

Tinnitus – laute Musik, ein Knall oder einfach nur zu viel Stress können ein dauerhaftes Pfeifen im Ohr verursachen. Schätzungen zufolge leiden fünf bis zehn Prozent der Deutschen unter einem Ohrgeräusch. Doch wie wird es im Gehirn erzeugt? Vom Innenohr werden Informationen über den Hörnerv an eine erste Verarbeitungsstufe im Gehirn geleitet, den Nucleus Cochlearis. Dieser wirkt unter anderem wie ein Verstärker: sind die Nervenzellen des Hörnervs zu wenig aktiv, zum Beispiel in Folge von Hörverlust, erhöht der Verstärker das Signal. Allerdings feuern die Zellen des Hörnervs auch ohne Reizung. Wenn diese Spontanaktivität übermäßig verstärkt wird, ist es wie



bei einem CD-Spieler, den man ohne CD auf volle Lautstärke dreht – ein Rauschen entsteht. Diesen Zusammenhang zwischen neuronaler Verstärkung und Tinnitus konnten Richard Kempter^{1,15,29} und Roland Schiette¹ erstmals in einem Computermodell darstellen. „Unsere Studien dienen dazu, grundsätzlich den Zusammenhang zwischen Hörverlust und Tinnitus zu verstehen“, erklärt Kempter^{1,15,29}. Aus diesem Verständnis lassen sich auch neue Therapiemaßnahmen ableiten. „Unsere Hoffnung wäre, dass gezielte Beschallung mit akustischen Signalen im richtigen Frequenzbereich die durch Hörverlust verursachte Hyperaktivität zurücktreibt“, so Kempter^{1,15,29}.

Neurologische Erkrankungen verstehen

Wahrnehmung, Erinnerung, Gefühle. Wie selbstverständlich greifen wir auf diese Leistungen unseres Gehirns zurück und vertrauen darauf, dass sie korrekt und der Situation angemessen sind. Erst wenn Störungen in diesen grundlegenden Funktionen auftreten, werden wir uns bewusst, was ein gesundes Gehirn tagtäglich für uns leistet. Längst schon stellen Depression, Schizophrenie oder Alzheimer echte Volkskrankheiten dar. Neurologische und psychiatrische Erkrankungen machen etwa ein Drittel der Gesundheitsausgaben in den Industrienationen aus.

Die Erforschung neurologischer Störungen brachte in den letzten Jahrzehnten detaillierte Einblicke in deren Ursachen und Auswirkungen. Im Zuge der fortschreitenden Erbgutanalyse identifizierten Wissenschaftler immer wieder Genvarianten, die gehäuft bei Patienten mit bestimmten neuronalen Erkrankungen auftreten, so genannte Risikogene. Man weiß, dass verschiedene Erkrankungen auf eine veränderte Ausschüttung neuronaler Botenstoffe oder auf eine eingeschränkte Funktionsfähigkeit bestimmter Ionenkanäle zurückzuführen sind. Bildgebende Verfahren ermöglichen eine immer detailliertere Untersuchung krankheitsbedingter Veränderungen von zellulären Strukturen bis hin zu ganzen Hirnarealen (s. „Ein Blick ins Gehirn“, S. 28). Doch wie beeinflussen sich die unterschiedlichen Hierarchieebenen – Gene, Zellen, Hirnareale – gegenseitig? Wie wirken sich verschiedene Genvarianten auf Kognition und Verhalten aus? Noch mangelt es weitgehend an einem

mechanistischen Verständnis, das jedoch von hoher klinischer Bedeutung wäre.

Computational Neuroscience kann dabei einen wichtigen Beitrag leisten. Mit ihr werden theoretische Modelle entwickelt, die Zusammenhänge zwischen genetischen Voraussetzungen und kognitiven Funktionen bzw. ihren pathologischen Änderungen aufzeigen können. Dabei sind der interdisziplinäre Forschungsansatz sowie die damit verbundene Möglichkeit, über mehrere Hierarchieebenen hinweg zu forschen, von besonderer Bedeutung.

In Computermodellen simulieren Peter Bastian^{4,34} und Daniel Durstewitz⁴ Vorgänge neuronaler Netzwerke, die infolge von psychiatrischen Erkrankungen wie Schizophrenie oder Depression verändert sind. Im ersten Schritt erzeugen sie ein realistisches Computermodell des veränderten Netzwerkverhaltens. Dann untersuchen sie verschiedene Parameterkonfigurationen dahingehend, ob diese im neuronalen Modell eine dem gesunden Zustand entsprechende Dynamik wieder herstellen können. Sie versuchen den Weg der Krankheit im Computermodell also gewissermaßen umzukehren. Weil derartige Simulationen am Computer durchgeführt werden, die generell mit Silizium-Chips arbeiten, wird diese neue Forschungsrichtung auch als „in-silico-Neuropharmakologie“ bezeichnet (s. Interview mit Daniel Durstewitz, S. 25).

Lernen nach dem Schlaganfall

Allein in Deutschland trifft jedes Jahr rund 200.000 Menschen der Schlag. Mehr als zwei Drittel der Patienten tragen bleibende Schäden davon. Vieles, was vorher normal war – Laufen, Sprechen, Essen – muss erst wieder gelernt werden. Häufig jedoch erlangen die Betroffenen ihre ursprünglichen Fähigkeiten nicht vollständig zurück. Warum das Lernen nach einem Schlaganfall so mühsam ist und wie man es verbessern könnte untersucht Siegrid Löwel^{10,12,32}. „Aus eigenen Untersuchungen wissen wir, dass auch Hirnregionen an Plastizität verlieren, die gar nicht unmittelbar betroffen waren“, so Löwel^{10,12,32}. Welche nicht-lokalen Kontrollmechanismen für das Zusammenwirken weit von-



einander entfernter Hirnareale verantwortlich sind, wollen die Forscher mit Experimenten an Mäusen aufklären. Mit der Kombination zweier bildgebender Verfahren (optische Ableitungen und 2-Photonen-Mikroskopie) sollen tiefe Einblicke in die neuronalen Vorgänge möglich werden.



Doch jedes Modell ist nur so gut wie die Daten, aus denen es gebildet wurde. Darum bleibt die detaillierte experimentelle Untersuchung ein unverzichtbarer Bestandteil der Forschung. Unter anderem bemühen sich Hilmar Bading^{4,21} und Hannah Monyer^{4,21} um ein tiefgreifendes Verständnis dessen, wie sich Genetik und neuronale Aktivität gegenseitig beeinflussen.

Auch die Epilepsieforschung nutzt das Potential der Computational Neuroscience. Ulrich Egert^{2,9}, Michael Frotscher² und Carola Haas² untersuchen im Hippocampus neuronale Prozesse der Epilepsie. Auf Grundlage histologischer Analysen, extrazellulärer Ableitungen und Compu-

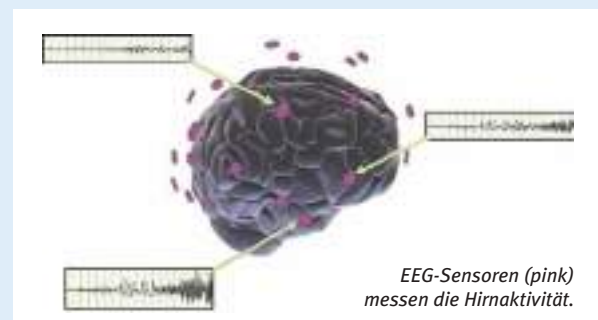
tersimulation des Hippocampus analysieren sie sowohl die Entstehung als auch die Weiterleitung epileptischer Aktivitäten. Sind diese Prozesse besser verstanden, können darauf neue Therapieformen aufbauen.

Die Erkenntnisse und neu entwickelten Analysemethoden der Computational Neuroscience tragen schon heute wesentlich zu einem besseren Verständnis neurologischer Krankheiten bei. Darauf aufbauend werden neue Therapieansätze entwickelt. Neben den klinischen Anwendungen ergibt sich aus der Untersuchung neuronaler Defekte auch immer eine Chance, Prozesse im gesunden Gehirn besser zu verstehen.

Anfallsvorhersage bei Epilepsie

Epilepsie ist in Deutschland eine der häufigsten neurologischen Erkrankungen. Bei einem nicht unerheblichen Teil betroffener Patienten wirken derzeit verfügbare Medikamente nicht ausreichend. Andreas Schulze-Bonhage^{2,9,42} und Jens Timmer² entwickeln eine Methode, mit der die Anfälle vorhergesagt werden können. Durch EEG-Messungen werden typische Erregungsmuster festgestellt und eine Warnung gegeben. „Noch sind diese Verfahren nicht ausreichend sensitiv, um alle Anfälle korrekt vorherzusagen“, erklärt Hinnerk Feldwisch-Drentrup². Um die Vorhersage weiter zu verbessern, werden weltweit große EEG-Datenbanken ausgewertet und die Informationen verglichen. Ziel ist es, die Patienten in Echtzeit zuverlässig vor einem Anfall zu warnen. So könnten die Betroffenen gefährliche Situationen meiden oder sogar einen sich

anbahnenden Anfall durch schnell wirkende Medikamente stoppen. Auch durch eine geeignete Tiefe Hirnstimulation (s. „Ersatzteile für das Gehirn“, S. 33) könnte die Gehirnaktivität wieder normalisiert werden.



Interview mit Daniel Durstewitz⁴

Zentralinstitut für Seelische Gesundheit
Mannheim, Koordinator des Bernstein
Zentrums Heidelberg-Mannheim

Welche Rolle spielen einzelne Gene bei der Entwicklung neuronaler Erkrankungen?

Für viele psychiatrische Erkrankungen, wie etwa Schizophrenie oder Depression, wurden in den letzten Jahren eine Reihe von Risikogenen identifiziert, deren Eigenschaften sich bei Erkrankten und Gesunden unterscheiden. Wie sie neuronale Informationsverarbeitung beeinflussen, und wie sich darüber beobachtete Effekte auf Kognition und Verhalten erklären lassen, sind zentrale Fragestellungen unserer Arbeit. Dafür sind Ansätze aus dem Bereich der Computational Neuroscience wichtige Instrumente.

Was versteht man unter „in-silico-Neuropharmakologie“?

Damit meinen wir die Untersuchung neuropharmakologischer Wirkungen mithilfe von Computersimulationen.

Neuronale Netzwerke, deren Eigenschaften auf biophysikalischer Ebene beschrieben sind, werden auf dem Rechner simuliert. Sie weisen Merkmale auf, wie sie für ein bestimmtes psychiatrisches Krankheitsbild, beispielsweise Schizophrenie, typisch sind. Derartige Computersimulationen erlauben es uns, vergleichsweise schnell verschiedene Parameterkonfigurationen durchzuspielen, die in einem „kranken System“ wieder eine dem gesunden Gehirn entsprechende Funktionalität herstellen könnten.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Substanzen für Medikamente spricht man auch von „in-silico-Entwicklung“. Was ist der Unterschied zu Ihrem Ansatz?

Im Zuge der Medikamentenentwicklung geht es darum, die chemische Struktur eines Wirkstoffs zu optimieren. Uns geht es darum, mit Computersimulationen neuronaler Systeme zu einem besseren Verständnis psychiatrischer Erkrankungen beizutragen. Aus solchen Simulationsstudien lässt sich dann aber möglicherweise auch ableiten, durch welche pharmakologischen Wirkstoffkombinationen sich bestimmte Krankheitsbilder am besten manipulieren lassen.

Erkennen ist mehr als Sehen

Der Mensch ist ein visuelles Wesen. Aber wie konstruiert unser Gehirn aus den elektromagnetischen Wellen des Lichts Objekte, Gesichter und ganze Landschaften? Wie wird aus dem zweidimensionalen Abbild der Welt auf der Netzhaut unsere dreidimensionale Wahrnehmung? Und wie wird entschieden, was unsere Aufmerksamkeit verdient?

Bereits die Netzhaut (Retina) leistet einen ersten Beitrag zur Informationsverarbeitung: nicht nur einzelne Bildpunkte, sondern auch abstraktere Informationen über Eigenschaften von Kanten, Farbkontrasten und Bewegungen leitet sie an das Gehirn weiter. Tim Gollisch⁵ untersucht, wie dabei einzelne Retinazellen auf Lichtunterschiede reagieren und im Zusammenspiel mit ihren Nachbarzellen Bilder vorverarbeiten.

Im Gehirn selbst werden komplexere visuelle Eigenschaften analysiert. Dank intensiver Grundlagenforschung beginnen wir heute zu verstehen, wie im Gehirn unter anderem Formen und Bewegungsmuster verarbeitet werden. Wie wir „erkennen“ erklärt das aber noch nicht. Erst durch die richtige Interpretation können wir Farben und Formen eine Bedeutung zumessen. Wir erkennen, was wir sehen, indem wir Objekte richtig in den Kontext einordnen und mit unseren Erfahrungen verknüpfen. Selbst Dinge, die wir noch nie zuvor gesehen haben – etwa ein abstraktes Bild oder eine abstrakte Skulptur – können wir erfassen. Das leisten Computer noch nicht. „Maschinen können nur eine stark eingeschränkte Klasse von Objekten erkennen, von denen sie eine spezielle Vorkenntnis haben. Wir versuchen die Prinzipien der Formanalyse zu verstehen, damit Computer irgendwann auch Bilder mit ganz unterschiedlichen Inhalten richtig interpretieren können“, sagt Matthias Bethge^{6,35}.

„**Keine Maschine** erkennt Objekte so gut wie der Mensch“, sagt Felix Wichmann^{1,6,7}. Mit Modellen des maschinellen Lernens erweitert er das methodische Repertoire der Kognitionsforschung. Beispielsweise anhand des Vergleichs hunderter Bilder verschiedener Gesichter soll die Maschine lernen, Gesetzmäßigkeiten zu erkennen. „Der Vorteil an diesem Ansatz ist: die Maschine kann ich hinterher auseinanderbauen und hineinschauen“, erklärt Wichmann^{1,6,7}. Versteht man dadurch das beim Menschen zugrundeliegende Prinzip besser, könnte

man wiederum Computer mit dieser Fähigkeit ausstatten und sie beispielsweise für Erkennungs- oder Sortierungsaufgaben einsetzen.

Nur ein Bruchteil der Information, die auf die Netzhaut fällt, erreicht jedoch unsere Wahrnehmung. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass höhere neuronale Funktionen wie Aufmerksamkeit auf frühe Verarbeitungsschritte zurückwirken. Dafür konnten Stefan Treue^{3,10} und sein Team Hinweise bei Primaten finden. Im wahrsten Sinne des Wortes schärft die Aufmerksamkeit die Sinne – wir sehen vor allem das, was für uns wichtig ist (s. Interview mit Stefan Treue, S. 27). Die Bewegungen unserer Augen können dabei verraten, worauf wir unsere Aufmerksamkeit richten. Dank technischer Systeme, die die Augenbewegung messen und analysieren, können Wissenschaftler dies in einem natürlichen Umfeld untersuchen. Die Frage nach den neuronalen Grundlagen der Aufmerksamkeit und dem Zusammenspiel verschiedener Hirnareale bei der Aufmerksamkeitssteuerung ist auch aus medizinischer Sicht relevant, unter anderem für die Entwicklung wirksamer Diagnose- und Behandlungsmethoden für Aufmerksamkeitsstörungen.

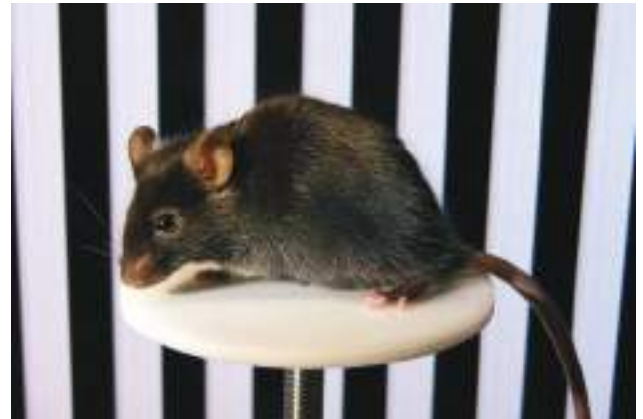


Die EyeSeeCam wurde unter Mitwirkung von Stefan Glasauer⁵ entwickelt. Sie misst Augen- und Kopfbewegungen und steuert mit diesen Informationen eine Kamera an der Seite der Apparatur. So kann der Versuchsleiter „mit den Augen der Versuchsperson“ sehen.

Wie kommt es, dass das Gehirn so schnell und so verlässlich auf visuelle Eindrücke reagieren kann? Wie erkennt es Objekte aus verschiedenen Perspektiven wieder und ergänzt fehlende Bildinhalte, wenn Objekte teilweise verdeckt sind? Wie kombiniert es Informationen über Farbe und Form eines Objektes? Die Liste der Fragen, die das visuelle System aufgibt, scheint unendlich. Das Gehirn hat für diese komplexen Aufgaben ein ausgeklügeltes Instrumentarium entwickelt. Zu seiner Entschlüsselung tragen die Arbeiten vieler Forscher im Bernstein Netzwerk bei.



Sehtest für Mäuse: So wie wir spontan einem fahrenden Zug mit den Augen folgen, so verfolgen Mäuse ein bewegtes Streifenmuster durch Kopfbewegungen. Anhand dieser Bewegungen können Forscher wie Siegrid Löwel^{10, 12, 32} herausfinden, welche Streifenbreite die Maus in diesem Test noch erkennen kann, d. h., welche Sehschärfe sie hierfür hat.



Zellen warnen Nachbarn vor

Erscheint auf einem Bildschirm erst ein kurzer und direkt im Anschluss ein langer Balken, sieht es so aus, als würde der kurze zu einem langen Balken anwachsen: es wird eine Scheinbewegung wahrgenommen. Tatsächlich aber werden wir vermutlich Zeuge, wie das Gehirn sich auf kommende Ereignisse vorbereitet. Die Darstellung des kurzen Balkens führt in der Sehrinde nicht nur zu einer Aktivierung der Zellen, die für die Wahrnehmung des kleinen Balkens zuständig sind, sondern auch zu einer graduellen Voraktivierung von Nachbarzellen, die weiter entfernte Bereiche repräsentieren. Doch diese sich ausbreitende Aktivierung bleibt zunächst unter der Wahrnehmungsschwelle und daher für uns unsichtbar. Werden die voraktivierten Zellen aber tatsächlich durch den langen Balken gereizt, erreichen sie ihre Feuerschwelle schneller. Es entsteht eine Aktivitätswelle, der Balken scheint zu wachsen. Wie dabei nachbarschaftliche Aktivierung und Hemmung innerhalb großer

Zellpopulationen im Gehirn verrechnet werden, konnten Dirk Jancke¹⁹ und sein Team mittels Computersimulationen aufklären. Damit enthüllten sie einen Mechanismus, der beim Sehen bewegter Objekte eine wichtige Rolle spielen könnte, da er neuronale Verrechnungszeiten verkürzt.



Erscheint nach einem kurzen ein langer Balken, so scheint der kurze Balken zu wachsen. Der Grund ist, dass Nervenzellen ihre Nachbarn in der Hirnrinde voraktivieren, so dass diese schneller reagieren.



Interview mit Stefan Treue^{3, 10}
Direktor des Deutschen
Primatenzentrums, Göttingen

Wo entsteht Aufmerksamkeit?

Man geht heute davon aus, dass für die Steuerung von Aufmerksamkeit ein Netzwerk aus Arealen im frontalen und parietalen Cortex zuständig ist. Welchem Aspekt die Aufmerksamkeit zugewandt werden soll, ist das Ergebnis einer Abwägung verschiedener Parameter: besonders auffällige Inhalte unserer Umwelt, Informationen über die aktuelle Situation und erworbene Erfahrungen und Erinnerungen fließen mit ein.

Verändert sich unsere Wahrnehmung durch Aufmerksamkeit?

Ohne Aufmerksamkeit liefert unsere Wahrnehmung bloß eine grobe Skizze unserer Umwelt. Lenken wir sie aber

auf bestimmte Aspekte, wird unsere Wahrnehmung schneller, präziser und sensibler für kleine Änderungen. Das heißt aber auch, dass verschiedene Beobachter ein und dieselbe Situation sehr unterschiedlich wahrnehmen können, weil jeder seine Aufmerksamkeit möglicherweise auf andere Punkte lenkt.

Können wir uns auf mehrere Eigenschaften eines Objekts (z. B. Farbe, Form, Bewegung) gleichzeitig konzentrieren?

Anders als beim „klassischen“ Multitasking müssen wir unsere Aufmerksamkeit nicht zwischen den verschiedenen Eigenschaften eines Objekts aufteilen. Ein automatischer Prozess scheint dafür zu sorgen, dass sich die Aufmerksamkeit vielmehr auf alle Aspekte des Objektes erstreckt, auch wenn wir uns nur auf einen Aspekt konzentrieren. Das wird üblicherweise so interpretiert, dass wir die verschiedenen Aspekte eines Objektes gemeinsam repräsentieren, und daher immer das Objekt als Ganzes im Fokus unserer Aufmerksamkeit steht.

Ein Blick ins Gehirn



Moderne bildgebende Verfahren erlauben einen Blick in das lebende Gehirn und auf seine Aktivität, ohne einen Eingriff zu erfordern. So können auch Fragen angegangen werden, die im Tierexperiment nicht zu klären sind. Was ist Bewusstsein? Wie spielen Schmerz und Bewusstsein zusammen? Wie und wann entstehen Entscheidungen? Mit diversen Verfahren wird ein Traum vieler Wissenschaftler wahr – dem Gehirn beim Arbeiten zuzusehen.

Eine anatomisch detaillierte Darstellung des lebenden Gehirns ist mit Computertomografie (CT) und Magnetresonanztomografie (MRT) möglich, was seit Jahrzehnten einen großen Gewinn für Wissenschaft und Medizin darstellt. Manche Strukturen aber lassen sich damit nicht verfolgen, wie etwa die Verbindungswege zwischen einzelnen Arealen der Großhirnrinde. Diese Einschränkung kann man mit der diffusionsgewichteten MRT überwinden. Insbesondere mit der Diffusions-Tensor-Darstellung (DTI) wird die richtungsabhängige Bewegung von Wassermolekülen bestimmt. Da sich das Wasser schneller entlang der Nervenfasern als quer dazu bewegt, kann aus dieser Information der Verlauf von Nervenfaserbündeln ermittelt werden. Wie unter anderem Jens Frahm^{3,10} und Jürgen Hennig⁹ zeigen konnten, stellt die DTI sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch in der klinischen Forschung, zum Beispiel bei der Vorbereitung chirurgischer Eingriffe und bei der Analyse neurologischer Erkrankungen wie Schizophrenie oder Morbus Alzheimer, ein wertvolles Hilfsmittel dar.



Magnetresonanztomograf

Die großen Rätsel des Gehirns sind in der neuronalen Aktivität verborgen. Mit der Elektroenzephalografie (EEG) konnte man vor über 80 Jahren erstmals kognitive Prozesse des Gehirns darstellen. Die synchrone Aktivität vieler Nervenzellen erzeugt ein elektrisches Feld, das durch Sensoren auf der Kopfhaut gemessen werden kann. Die EEG kann somit Teile der Hirnaktivität „in Echtzeit“ darstellen. Wissenschaftler des Bernstein Netzwerks nutzen diese Technik zur Vorhersage epileptischer Anfälle (s. „Neurologische Erkrankungen verstehen“, S. 24) und für die Entwicklung von Neuro-Feedback-Methoden, mit denen zum Beispiel Kinder mit Aufmerksamkeitsstörungen ihre Hyperaktivität

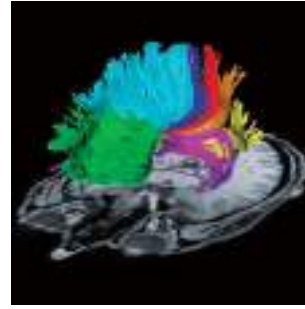
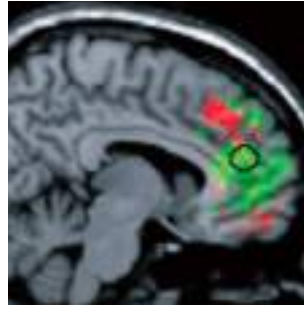
zu kontrollieren lernen. Aufgrund des relativ geringen technischen Aufwands eignet sich die EEG-Technik auch für die Bedienung so genannter Gehirn-Computer-Schnittstellen (s. „Ersatzteile für das Gehirn“, S. 33).

Detailliertere Illustrationen der räumlichen Verteilung von Hirnaktivität liefert die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT). Auf den Millimeter genau misst sie Veränderung des Sauerstoffgehaltes im Blut, was als guter Parameter für eine Veränderung der neuronalen Aktivität gilt. Um mit der fMRT festzustellen, ob und wo sich die Aktivität verändert hat, müssen die Signale mathematisch analysiert werden. Herkömmliche Vorgehensweisen untersuchen die Veränderung der Hirnaktivität an einzelnen, voneinander unabhängigen Raumpunkten (Voxeln). Oft aber sind neuronale Veränderungen, die mit einem Gedanken oder einer Wahrnehmung einhergehen, nicht an klar definierbaren Bereichen festzumachen. „Wir suchen räumlich verteilte Aktivierungsmuster, die für bestimmte mentale Zustände charakteristisch sind“, erklärt John-Dylan Haynes^{1,7} seinen Ansatz, der die hochentwickelten Analysemethoden der Computational Neuroscience nutzt. So konnte er zeigen, dass Entscheidungen im Gehirn schon deutlich vor unserer bewussten Wahrnehmung heranreifen.

Wie verarbeitet das Gehirn Informationen über Entscheidungen anderer Menschen? Wie beeinflusst dieses Wissen individuelle Entscheidungen? Mit einer Kombination aus fMRT-Messungen und Computermodellen versucht Jan Gläscher³⁸ herauszufinden, wie soziale Einflüsse auf die neuronalen Grundlagen unserer Entscheidungen einwirken. Welche Mechanismen wirken, wenn wir meinen, die falsche Entscheidung getroffen zu haben? Gemeinsam mit Christian Büchel¹⁷ untersucht Gläscher³⁸ auch die Rolle des orbitofrontalen Kortex, einem wichtigen Bewertungszentrum im Frontalhirn. Derartige Untersuchungen verraten uns viel über menschliches Handeln und seine motivationalen Hintergründe. Sie dienen aber auch als Grundlage therapeutischer Ansätze für Menschen, deren Bewertungs- und Entscheidungsprozess gestört ist, wie bei Depression oder Zwangsstörungen.



*Wo entstehen Absichten?
Die fMRT misst über den Sauerstoffverbrauch der Neuronen indirekt deren Aktivität. Grün markierte Bereiche kodieren verborgene Absichten, bevor sie ausgeführt werden. Rot markierte Bereiche kodieren Absichten, die aktuell ausgeführt werden. Das feinkörnige Aktivierungsmuster unterscheidet sich je nach Intention.*



Mit Hilfe der Diffusions-Tensor-Darstellung können die Nervenfaserbündel, die verschiedene Areale in den beiden Hirnhälften miteinander verbinden, verfolgt werden.

Optogenetik – Das Gehirn „sehen“ lassen

Wenn uns ein Licht aufgeht, meinen wir das nur metaphorisch. Doch seit wenigen Jahren sind Wissenschaftler tatsächlich in der Lage, Nervenzellen lichtempfindlich zu machen. Dies wurde durch die Entdeckung des lichtgesteuerten Ionenkanals Channelrhodopsin möglich, den Ernst Bamberg¹⁰ gemeinsam mit Kollegen aus Botanik und Biophysik erstmals beschrieben hat. Mit genetischen Methoden übertrug er dieses Protein in die Membranen von Nervenzellen. Bei Belichtung öffnet sich der Membrankanal, was zu einer Aktivierung der Nervenzelle führt – die Ner-

venzelle ist also in der Lage, auf Lichtreize mit elektrischer Aktivität zu antworten. Mittlerweile sind weitere Proteine bekannt, die auf verschiedene Lichtfarben reagieren oder welche die Nervenzellen nicht aktivieren sondern hemmen. Dies eröffnet weitreichende Perspektiven: sehr gezielt können Nervenzellen an- oder abgeschaltet werden. So können die Funktionen einzelner Zellen oder auch größerer Hirnareale studiert und neue Eingriffsmöglichkeiten für neuronale Erkrankungen getestet werden. Die Entwicklung dieser vielversprechenden Methode zeigt beispielhaft, wie Grundlagenforschung wegweisende Impulse für die angewandte und klinische Neurowissenschaften bereitstellt.

Schmerzendes Gehirn

Auch wenn einem der Finger oder der Fuß schmerzt – die neuronale Reaktion, die zur Bewusstwerdung des Schmerzes führt, findet im Gehirn statt. Dem Schmerzempfinden liegt ein typisches Muster neuronaler Aktivität zu Grunde, an dem mehrere Hirnareale beteiligt sind. Diese „Neuromatrix des Schmerzes“ untersuchen Wissenschaftler um Jens Haueisen²², Wolfgang Miltner²², Jürgen Reichenbach²² und Herbert Witte²². Bei gesunden Probanden oder Testpersonen mit akutem oder chronischem Schmerz untersuchen

die Forscher mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT), der Elektroenzephalografie (EEG) und der Magnetoenzephalografie (MEG) die Reaktion des Gehirns auf leichte Schmerzreize. Um die komplexe Reaktion des Gehirns adäquat auswerten zu können, arbeiten die Forscher an Verbesserungen der mathematischen Analyseverfahren für fMRT, EEG und MEG. Aus einem besseren Verständnis der neuronalen Grundlagen des Schmerzes werden sich langfristig bessere Therapiemöglichkeiten für Schmerzpatienten ergeben.



Interview mit John-Dylan Haynes^{1,7}
Charité
Professor für „Theorie und Analyse weiträumiger Hirnsignale“ am Bernstein Zentrum Berlin

Das Medieninteresse an bildgebenden Verfahren der Neurowissenschaften ist enorm. Woran liegt das?

Wir gehen täglich mit Menschen um und können bestenfalls erahnen, was in ihnen vorgeht. Es ist ein alter Menschheitstraum, einen Einblick in die Gedanken eines Anderen zu bekommen – oder vielleicht auch ein Alptraum. Nun wird dieser Traum auf wissenschaftliche Füße gestellt und es deutet sich an, dass er eines Tages Wirklichkeit werden könnte. Ich denke, das löst eine ambivalente Faszination aus. Zum Einen macht es neugierig und eröffnet vielversprechende Möglichkeiten – zum Anderen erzeugt es Unbehagen.

Wie nah sind Sie heutzutage dem oft betitelten „Gedankenlesen“?

Wir können keine beliebigen Gedanken aus dem Gehirn auslesen. Dazu bräuchte man eine Art Lexikon, in dem alle Gedanken mit ihrer jeweiligen Gehirnaktivität verzeichnet sind. Die Vielfalt der möglichen Gedanken legt uns da prinzipielle Grenzen auf. Aber innerhalb dieser Grenzen können wir durchaus entscheidende Bereiche der Gedanken und Entscheidungsfindung untersuchen.

Eine amerikanische Firma behauptet, schon heute mittels fMRT Lügen detektieren zu können. Trauen Sie dem?

Prinzipiell glaube ich schon, dass es möglich sein sollte, zu erkennen ob jemand lügt oder nicht. Aber dafür müssten erst einmal Daten darüber vorliegen, welche Aktivitätsmuster im Gehirn beim Lügen unter realen Bedingungen entstehen. Soweit ich weiß, hat niemand diese Daten und wird sie auch so schnell nicht bekommen.

Lernen und Erinnern

Jeder Mensch hat seine ganz eigene Lebensgeschichte. Was wir erlebt haben, prägt uns – oder genauer: unser Gehirn. Schon seit langem fragen sich die Menschen, aus welchem „Stoff“ Erinnerungen gemacht sind. Einen Teil dieses Rätsels haben Neurowissenschaftler mittlerweile entschlüsselt.

Beim Denken, Rechnen oder Musik hören – immer ist unser Gehirn hoch aktiv. Der Informationstransport geschieht dabei in Form von elektrischen Impulsen. An jeder Kontaktstelle zwischen zwei Neuronen, der Synapse, wird das elektrische Signal in ein chemisches umgewandelt. Botenstoffe werden von der vorgeschalteten Zelle ausgeschüttet und fördern oder hemmen in der nachgeschalteten Zelle wiederum die Ausbildung neuer elektrischer Impulse. Was etwas umständlich klingt, ist von größter Bedeutung: denn hier findet Lernen statt.

Diese Signalweiterleitung kann die Eigenschaften einer Synapse verändern: die Menge vorhandener Botenstoffen wird variiert, ebenso wie die Wahrscheinlichkeit einer erneuten Ausschüttung. Auch die Fähigkeit der nachgeschalteten Zelle, auf das chemische Signal zu antworten, kann moduliert werden. Der Psychologe Donald Hebb formulierte schon im Jahre 1949 die später nach ihm benannte „Hebb'sche Regel“: Ist Neuron A wiederholt an der Erregung von Neuron B beteiligt, dann verstärkt sich der Kontakt von A zu B.

Erst viele Jahre später fanden Wissenschaftler heraus, dass diese Verstärkung von der genauen zeitlichen Differenz abhängt, mit der die Neurone relativ zueinander einen Impuls abgeben. Je kürzer Neuron A vor Neuron B feuert, desto mehr verstärkt sich eine erregende synaptische Verbindung. Sendet hingegen Neuron B kurz vor Neuron A ein Signal, wird die Verbindung abgeschwächt. Wissenschaftler um Leo van Hemmen⁵ haben diesen zeitlichen Zusammenhang zum ersten Mal mathematisch formuliert. Dieses Prinzip, das später „Spike-Timing-Dependent Plasticity“ (STDP) genannt wurde, ist heute aus der Computational Neuroscience nicht mehr wegzudenken. Wie van Hemmen⁵ und seine Kollegen gezeigt haben, ermöglicht die STDP auch die Entstehung komplexer Verschaltungen. Die erstaunliche Genauigkeit neuronaler Sinnessysteme, dank derer beispielsweise Eulen oder Schlangen allein aufgrund

akustischer Informationen Beute orten können, wird wahrscheinlich erst durch STDP möglich.

Viele Verhaltensweisen, wie zum Beispiel der Gesang von Singvögeln, werden in ihren Grundzügen vererbt. Doch die grobe genetische Vorgabe muss durch Lernen und Üben optimiert werden. Welche Hirnareale an diesem Lernprozess beteiligt sind, ist bei Vögeln bereits teilweise bekannt: ein Signalweg variiert den ursprünglichen Gesang kontinuierlich, ein anderer führt zu einer positiven Rückmeldung bei verbesserten Versionen des Gesangs. Dadurch werden jeweils die neuronalen Verbindungen gefestigt, die für die beste Variante des Gesangs verantwortlich sind. Ob dieses System auch bei anderen Tieren beim Bewegungslernen eine Rolle spielt, möchte Onur Güntürkün¹³ herausfinden.



„Man sollte sich nicht schlafen legen, ohne sagen zu können, dass man an diesem Tag etwas gelernt hat“, sagte einst Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799), deutscher Schriftsteller und Professor für Experimentalphysik. Hier irrte der Gelehrte, denn auch während des Schlafes werden Erinnerungen gefestigt. Informationen, die vor dem Vergessen bewahrt werden sollen, müssen aus dem „Arbeitsgedächtnis“ im Hippocampus in die Großhirnrinde übermittelt werden, um dort langfristig gespeichert zu werden. Dabei treten im Hippocampus kurze, synchrone Netzwerkschwingungen – Oszillationen genannt – auf, die besonders im Schlaf beobachtet werden. Wissenschaftler des Bernstein Netzwerks beschäftigen sich damit, wie diese Oszillationen entstehen. Uwe Heinemann^{1,15} und Kollegen haben gezeigt, dass unter anderem langfristige Änderungen an den Synapsen für die Entstehung solcher Oszillationen verantwortlich sind.

„Lernen passiert ständig und auf verschiedenen Zeitskalen“, sagt Petra Ritter¹⁵. Gemeinsam mit Richard Kempter^{1,15,29} untersucht sie, wie Oszillationen und Lernvorgänge genau zusammenhängen. Derartige Erkenntnisse könnten unter anderem dazu genutzt werden, Lernprozesse bei Schlaganfallpatienten zu unterstützen, die viele alltägliche Fertigkeiten neu erlernen müssen.



„Über das Lernen auf zellulärer Ebene weiß man schon recht viel: wenn wir etwas lernen, verändert sich die Stärke einiger Synapsen, der Verbindungen zwischen Neuronen. Wie aber wird die Information, die so in den Synapsen gespeichert wurde, wieder ausgelesen? Welchen Einfluss haben diese Veränderungen auf die Aktivität des Gehirns, so dass wir uns an Gelerntes erinnern können? Diese Fragen stehen im Zentrum unserer Forschungsarbeit.“

Christian Leibold^{5, 16, 45}

Wie wir lernen ist auch für die Entwicklung moderner Computersysteme und Roboter von Interesse. Schon seit einiger Zeit orientieren sich Ingenieure an biologischen Vorbildern, wie z. B. dem Lernen bei Kleinkindern (s. „Roboter der Zukunft“, S. 36). Denn lernende Systeme sind weitaus flexibler und fehlertoleranter als fest vorprogrammierte. Diese Flexibilität ist von größter Bedeutung, wenn künstliche Systeme in einer natürlichen Umwelt agieren sollen. Denn nie wird man alle möglichen Ereignisse planen können. Von besonderem Interesse ist dies für die Verbesserung der Interaktion und Kommunikation zwischen Mensch und Maschine. Wenn Maschinen lernen, menschliche Anweisungen schneller und genauer zu erfassen, ist dies unter anderem für die Bedienung neuroprothetischer Kommunikationssysteme ein großer Fortschritt.

Viele Fragen über unsere Fähigkeit zu lernen und erinnern konnten in den letzten Jahrzehnten gelöst werden. Doch von einem grundlegenden Verständnis dessen, wie genau und welche Erinnerungen gespeichert und wieder korrekt ausgelesen werden, sind wir noch weit entfernt.

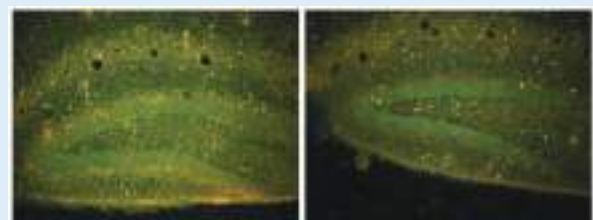


An den Kontaktstellen zwischen den Nervenzellen werden Signale durch Botenstoffe übertragen, die in Vesikeln (orange) gespeichert sind.

Neue Zellen im Gehirn – viel hilft nicht immer viel

Unser Gehirn steckt in einem Dilemma: langfristige Speicherung gegenüber Anpassungs- und Lernfähigkeit. Wie das Gehirn die Entwicklung neuer Verknüpfungen sehr genau steuert, lässt sich am Hippocampus untersuchen, in dem zeitlebens neue Zellen entstehen und in das Netzwerk integriert werden müssen. Der Hippocampus ist der Vermittler zwischen Kurz- und Langzeitgedächtnis. Markus Butz³ untersuchte mit Kollegen, was geschieht, wenn zu viele Zellen in dieser Region entstehen. Die Forscher zogen Wüstenrennmäuse unter Isolation auf. Dies führte dazu, dass sich die Zelldichte im Hippocampus erhöhte. Jedoch war der Auf- und Umbau von Verknüpfungen – wesentlich für Lernvorgänge – zwischen Nervenzellen deutlich geringer als üblich. Reduzierten die Forscher die Zellteilungsrate durch Medikamentengabe, sank die Zelldichte im Hippocampus und die neuronalen Verknüpfungen wurden wieder wesentlich stärker auf- und abgebaut. Den scheinbaren

Widerspruch zwischen Zelldichte und Intensität des Umbaus erklärten die Forscher in einem mathematischen Modell: wetteifern zu viele Zellen um Eingangsreize, erhält keine Zelle genug, um sich richtig zu integrieren. Im Modell verstärkten manche Zellen die Eingangssignale, indem sie sich selbst reizten. Derartige Rückkopplungen könnten auch in der Epilepsie-Entstehung eine Rolle spielen.



Reorganisationsprozesse im Hippocampus sind als helle Körnchen erkennbar. Isoliert aufgezogene Tiere (rechts) zeigen deutlich geringere Reorganisation als normale Tiere.



Angst lässt sich kaum verlernen

Angst ist ein wichtiger Schutzmechanismus unseres Körpers. Sie versetzt ihn in Alarmbereitschaft und sorgt damit für erhöhte Reaktionsfähigkeit. Gefährliche Situationen werden im Gedächtnis besonders gut gespeichert und beeinflussen unser Verhalten über lange Zeit. Auch Ängste, die wir schon abgelegt zu haben glaubten, können in einer bestimmten Situation wieder unvermindert auftreten. Grund hierfür könnte sein, dass die Angst nicht gelöscht, sondern nur verdeckt wurde. Dieser Ansicht sind Ioannis Vlachos², Arvind Kumar² und Ad Aertsen^{2,9}. Ein evolutionsgeschichtlich sehr alter Teil des Gehirns ist für diesen Lernvorgang verantwortlich: der Mandelkern. In einer Computersimulation bauten die Forscher einen Teil dieser Struktur nach. Eine Gruppe der Zellen aktivierte das Angstverhalten, eine andere unterdrückte diese Angst. Wurde der Einfluss der zweiten Gruppe kleiner, zum Beispiel durch eine Veränderung des Kontexts, kehrte die Angst schlagartig zurück. Diese Erkenntnis kann für die Entwicklung von Therapien gegen Angststörungen von besonderer Bedeutung sein.

Bienen lernen süße Düfte

Wie erfolgreich Bienen bei der Nahrungssuche sind, hängt maßgeblich davon ab, wie gut sie nektarreiche Blüten schon von Weitem anhand ihres Duftes erkennen können. Martin Strube-Bloss^{1,11}, Martin Nawrot^{1,2,11} und Randolph Menzel^{1,11,28}, ließen Bienen fünf verschiedene Düfte riechen, von denen einer mit einer Zuckerlösung belohnt wurde. Um die neuronalen Grundlagen des Gedächtnisprozesses zu untersuchen, maßen sie die Aktivität einzelner Nervenzellen in einer Hirnregion, die als Kandidat für Duftgedächtnis im Bienenhirn gilt. Die Messungen brachten ans Licht, dass bestimmte Zellen zwar nicht während, aber drei Stunden nach der Lernphase auf den Duft hin aktiv waren. Dies deutet darauf hin, dass die Zellen für das Erinnern während des Mittelzeit-Gedächtnisses wesentlich sind. Diese Gedächtnisbildung während eines späteren Zeitpunkts ist ein wichtiger Vorgang im Gehirn, der nun auch in Computermodellen nachvollzogen werden wird.



Wenn die Biene den richtigen Geruch wahrnimmt, streckt sie ihren Rüssel hervor, um die Zuckerlösung aufzusaugen.

Ersatzteile für das Gehirn

Mit einem Holzbein haben moderne Prothesen schon lange nichts mehr gemeinsam. Hochtechnologische Arm- und Beinprothesen, die direkt vom Gehirn gesteuert werden, sind in nicht allzu ferner Zukunft denkbar. Computersysteme können bereits mit der „Kraft der Gedanken“ gesteuert werden. Winzige Retina-Implantate werden entwickelt, die Blinden bereits heute erste Seheindrücke ermöglichen, und unscheinbare Cochlea-Implantate lassen Gehörlose wieder hören.

Unfälle oder Krankheiten können die Signalleitung zwischen Gehirn und Muskeln unterbrechen. Dies ist beispielsweise bei Querschnittslähmungen der Fall, bei denen Beine und oft auch Arme dauerhaft gelähmt bleiben. Auch eine Reihe neurologischer Erkrankungen beeinträchtigt die willentliche Muskelkontrolle. Im Endstadium neurodegenerativer Erkrankungen wie der amyotrophen Lateralsklerose (ALS) kommt es zum so genannten „Locked-in“-Syndrom. Obwohl bei vollem Bewusstsein, sind die Patienten zu keinerlei Bewegung und Kommunikation mehr imstande – sie sind von der Außenwelt abgeschnitten. Eine Reihe von Wissenschaftlern des Bernstein Netzwerks arbeitet an der Entwicklung so genannter „Brain-Computer Interfaces“ (Hirn-Computer-Schnittstellen), die die Hirnaktivität auslesen und zur Steuerung von technischen Hilfsmitteln oder Kommunikationssystemen nutzbar machen.

Hirnaktivität kann grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen gemessen werden: invasiv und nicht-invasiv. Nicht-invasive Verfahren wie die Elektroenzephalografie (EEG) sind relativ einfach zu handhaben und risikofrei, da sie ohne operativen Eingriff auskommen. Elektroden auf der Kopfhaut registrieren das durch die Gehirnaktivität erzeugte elektrische Feld und senden die Daten an einen Computer (s. „Ein Blick ins Gehirn“, S. 28). Durch willentliche Erzeugung bestimmter Hirnsignale können verschiedenste Systeme bedient werden: von der Computermaus bis zum Flipperautomaten. Die Steuerung funktioniert meist ähnlich: In einer Trainingsphase lernt der Computer verschiedene Hirnaktivitäten zu erkennen, wie sie zum Beispiel durch die Vorstellung der Bewegung der linken oder rechten Hand erzeugt werden. Diese ordnet er bestimmten Steuersignalen zu, mit denen etwa ein Cursor auf dem Bildschirm nach links oder rechts verschoben werden kann. Mit der EEG-Technik sollen zudem Systeme verwirklicht werden, die während des Autofahrens oder Fliegens den

Wachheitszustand des Fahrers messen und vor Sekundenschlaf warnen sollen. Durch die Schädeldecke erscheinen die Erregungsmuster des Gehirns allerdings diffus wie beim Blick durch eine Milchglasscheibe. Darum bleiben derartige EEG-Methoden bis auf Weiteres auf Vorgänge limitiert, bei denen aus wenigen Möglichkeiten die gewünschte gewählt werden soll.



„Mentale Schreibmaschine“, entwickelt von Klaus-Robert Müller^{1,7,24}, Gabriel Curio^{1,7} und Benjamin Blankertz⁷. Auf dem Bildschirm blinken nacheinander Buchstaben auf. Der Proband konzentriert sich auf den nächsten Buchstaben, den er schreiben will. Erscheint dieser, kann im EEG eine spezifische Hirnaktivität gemessen und der entsprechende Buchstabe ausgewählt werden. Die Schreibgeschwindigkeit solcher Systeme beträgt etwa ein Wort pro Minute.

Die präzise Steuerung eines Prothesenarmes erfordert Vorgehensweisen, die im wahrsten Sinne des Wortes näher dran sind. Bei invasiven Verfahren werden haarfeine Elektroden einige Millimeter in das schmerzunempfindliche Gehirn eingeführt und die elektrische Aktivität einzelner Neuronen oder Neuronengruppen gleichzeitig an mehreren Stellen gemessen. Aus der neuronalen Aktivität kann zum Beispiel eine gedachte Greifbewegung im Detail rekonstruiert und daraus ein direktes Steuersignal für eine Armprothese erzeugt werden. In Tierexperimenten wurde eine derartige Steuerung bereits erfolgreich getestet. Doch invasive Verfahren bringen auch Herausforderungen mit sich: gesundes Gewebe wird zerstört, Immunreaktionen können zu Entzündungen oder zu verminderter Funktion des Implantats führen. Darum wenden Carsten Mehring^{2,9,31}, Tonio Ball^{2,9}, Jörn Rickert⁹ und Ad Aertsen^{2,9} eine alternative Methode an, bei der die Sensoren zwischen Schädelknochen und Hirnoberfläche platziert werden, aber nicht ins Gehirn eindringen. Dieses semi-invasive Verfahren nennt sich Elektroenzephalografie (EEG). „Wir suchen damit einen



Mit einem Cochlea-Implantat können Gehörlose trotz defekter Sinneszellen des Innenohrs wieder hören. Der äußere Teil verarbeitet Schallinformationen und sendet Signale an das Implantat. Dieses stimuliert den intakten Hörnerv an verschiedenen Stellen in der Cochlea mit elektrischen Reizen und ermöglicht so eine akustische Wahrnehmung.



optimalen Kompromiss zwischen voll-invasiven und nicht-invasiven Methoden“, erklärt Mehring^{2,9,31}. „Bis zu einer routinemäßigen Anwendung von Brain-Computer Interfaces wird sicherlich noch einige Zeit vergehen. Der Beweis, dass sie funktionieren können, ist aber bereits erbracht“, meint der Physiker.

Große Fortschritte konnten innerhalb der letzten Jahrzehnte auf dem Gebiet der Neuroprothetik erzielt werden. Inzwischen steht eine ganze Bandbreite verschiedenster Technologien zu Verfügung, um den Informationsfluss zwischen dem Gehirn und den Sinnessystemen oder Muskeln wieder herzustellen. Um Implantate zu entwickeln, die di-

rekt in das komplexe neuronale Regelwerk des Gehirns eingreifen, muss die Funktion des Gehirns mit seinen vielfach rückgekoppelten Netzwerken noch besser verstanden werden. Und selbst damit ist es noch nicht getan. „Das Gehirn ist ein äußerst plastisches Organ, das sich ständig durch Lernen und Anpassung ändert“, sagt Ulrich Egert^{2,9}. „Neuroprothetische Implantate müssen daher die Fähigkeit haben, sich an veränderte Bedingungen zu adaptieren, das heißt, sich eigenständig an die Signalqualität anzupassen, Qualitätskontrollen durchzuführen und Fehler zu beheben.“ Damit bleibt auf dem Feld der Mensch-Computer-Interaktion noch viel Forschungsbedarf.

Auf dem Weg zur Sehprothese

Ein etwa 40-jähriger Mann liest seinen Namen vor und entdeckt dabei zwei Rechtschreibfehler. Nichts Ungewöhnliches, wäre er nicht seit vielen Jahren erblindet. Sein neues Sehvermögen verdankt Miikka einem drei mal drei Millimeter großen Chip, der ihm unter die Netzhaut implantiert wurde. Eberhart Zrenner⁶ entwickelte mit seinem Team in Kooperation mit der Retina Implant AG eine Sehprothese, die Platz hat für 1500 Sensoren, Verstärker und Elektroden. Nach Verlust der Photorezeptoren übernimmt die Prothese deren Aufgabe und erkennt Licht unterschiedlicher Intensitäten. Die Informationen werden in elektrische Reize umgewandelt, an die inneren Netzhautschichten angekoppelt und dann vom Nervensystem weiterverarbeitet. Inzwischen wurden 18 Patienten operiert, die die Implantate auch zu Hause und im Freien benutzen. Die Stromversorgung geschieht über eine kleine Spule unter der Haut hinter dem Ohr. Unterschiedliche Graustufen, große bewegte Objekte,



Durch die Krankheit Retinitis pigmentosa erblindet, kann der Patient Miikka dank eines Retina-Implantats seinen Namen lesen und entdeckt dabei sogar zwei Schreibfehler.

aber auch Alltagsgegenstände wie Messer, Gabeln, Teller, Tassen, Uhrzeiger oder Türkliniken können von einigen behandelten Patienten erkannt werden. Noch wird die Technologie erprobt und weiterentwickelt, ein wichtiger Schritt hin zu einer Sehprothese ist aber getan.



Interview mit Oliver Müller⁹

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Leiter der Nachwuchsgruppe „Zur
Relevanz der Natur des Menschen als
Orientierungsnorm für Anwendungs-
fragen der biomedizinischen Ethik“ am
Institut für Geschichte der Medizin

Hat sich unser Menschenbild durch die Erkenntnisse der modernen Neurowissenschaften verändert?

Ich denke nicht, dass es fundamentale Änderungen gibt. Manche Neurowissenschaftler, Journalisten oder Politiker wollen aber offenbar unser Menschenbild ändern und die Grundlagen unseres Selbst und unserer Moral neu bestimmen, wenn sie behaupten, das „Ich“ und unsere Freiheit seien bloß Illusionen. Schon Karl Jaspers hatte diese allzu schnellen Schlussfolgerungen „Hirn-Mythologien“ genannt. Das war 1913...

Greift eine Neuroprothese in die Identität ihres Trägers ein?

Identität und Selbstverständnis konstituieren sich zunächst durch die eigene Biographie und da gehört für den Träger einer Neuroprothese die Prothese dazu. Die Technik verändert auch die Lebenswirklichkeit, greift in Bewusstseinsprozesse ein und verspricht eine Kontrolle, eine Beherrschung dieser Prozesse. Dies wird die Identität des Patienten verändern.

Ist das an sich bedenklich?

Nein, das muss nichts Schlechtes sein – auch ein guter therapeutischer Erfolg ändert die eigene Lebenswirklichkeit. Doch muss man eben Veränderungen von Bewusst-

sein und Persönlichkeit genau beobachten. Möglicherweise liegen hier gefährliche Manipulationsmöglichkeiten vor. Man kann die Sichtweise übrigens auch umkehren: der Mensch wird Teil einer Maschine, er passt sich der inkorporierten Technik an.

Neuro-Enhancement hat die Optimierung von Hirnleistungen zum Ziel. Wohin könnten solche Bestrebungen in der Neuroprothetik führen?

In der Neuroprothetik stellt sich die Frage der Verbesserung auf eine spezifische Weise: Hier geht es um Erzeugung von optimierten Mischwesen aus Mensch und Maschine, die Veränderung des Menschen zu einer Arbeits- oder Kampfmaschine, um eine Cyborgisierung.

Müssen wir solche „Cyborgs“ in naher Zukunft befürchten?

Es geht hier um sehr unwahrscheinliche Zukunftsszenarien. Dennoch bringt die Diskussion um die Cyborgisierung wichtige Aspekte hervor, denn letztlich geht es hier immer um die Grenzen der Technik, um das, was wir als „menschlich“ erachten. So wäre es etwa ethisch höchst problematisch, wenn wir Menschen nicht mehr heilen, sondern neurotechnologisch an Ökonomisierungsprozesse anpassen und dabei andere Aspekte wie Sozialität oder Religiosität marginalisieren.

„Schrittmacher“ für das Gehirn

Bei einer Reihe neurologischer Erkrankungen sind heute die pathophysiologischen Mechanismen im Gehirn teilweise bekannt, wie etwa bei der Parkinson'schen Krankheit. Doch ein erheblicher Teil der Betroffenen spricht nicht oder nicht mehr auf die üblichen Medikamente an. In solchen Fällen kann die Tiefe Hirnstimulation einen Ausweg bieten. Dabei werden den Patienten kleine Elektroden in spezifische Hirnregionen implantiert. Verbunden mit einer Batterie, die im Brustbereich implantiert wird, senden die auch als „Hirnschrittmacher“ bezeichneten Geräte kleine Stromimpulse aus, die die Region gezielt erregen oder hemmen. Damit soll eine Modulation der neuronalen Aktivität und eine Wiederherstellung der Funktion erreicht werden. Marcos Tatagiba⁹ und Alireza Gharabaghi⁹ erzielen mit dieser Methode gute Erfolge bei Parkinson und anderen Tremorerkrankungen. Eine Anwendung auf weitere neurologische Erkrankungen wie Epilepsie wird derzeit erprobt.



Für die Tiefe Hirnstimulation werden feine Elektroden in das schmerzempfindliche Gehirn implantiert.

Roboter der Zukunft

Jeder einfachen, alltäglichen Geste liegt eine immense Gehirnleistung zu Grunde. Bereits beim Einschenken eines Glases Wasser koordinieren wir das Zusammenspiel dutzender Muskeln, reagieren auf die Bewegung des Wassers und schätzen die noch benötigte Flüssigkeitsmenge per Augenmaß ab. Lange Zeit versuchte man, Robotern derartige Handlungen Schritt für Schritt einzuprogrammieren. Doch ein solches Vorgehen ist nicht nur extrem aufwändig, sondern auch sehr fehleranfällig. Sobald sich die Bedingungen geringfügig ändern, versagt das bisherige Programm. Darum nutzen Wissenschaftler heute eine andere Strategie: sie lassen Roboter lernen. Welche Lernmethode dabei zum Tragen kommt, ist ganz unterschiedlich.

Allein durch Ausprobieren können lernende Roboter erfolgreiche Verhaltensweisen entwickeln. Wissenschaftler um Florentin Wörgötter^{3,10} haben auf diese Weise einen der schnellsten Laufroboter der Welt gebaut. Der mechanische Zweibeiner variiert einzelne Einstellungen der Beinbewegung zufällig. Erhöht sich dadurch die Ganggeschwindigkeit, merkt sich die Maschine die derzeitigen Einstellungen und wiederholt die Prozedur. Eines der Ziele dieser Forschungsarbeiten im Bernstein Netzwerk ist es, Lernvorgänge besser zu verstehen. Um zu prüfen, ob man bestimmte Prinzipien des Lernens verstanden hat, werden diese in mathematische Formeln überführt. Dann programmieren die Wissenschaftler damit einen Roboter. Anhand seines Verhaltens lassen sich diverse Fragen beantworten: Wie schnell lernt der Roboter? Lernt er wirklich das, was er lernen soll? Auch Lernmodelle aus der Psychologie, wie das Lernen durch Belohnung, können an den Maschinenwesen getestet werden. Zusätzlich werden in den Experimenten Methoden optimiert, um Roboter mit unterschiedlichsten Handlungsmustern auszustatten – egal ob sie sich zurechtfinden, gezielt greifen oder Informationen interpretieren sollen. Roboter mit derartigen Fähigkeiten könnten selbstständig den Weg finden oder auf Zuruf bestimmte Handgriffe durchführen.

Wir Menschen lernen aber nicht nur durch Ausprobieren, sondern auch, indem wir uns Verhaltensweisen anschauen und Anleitungen folgen. Bis Roboter solche Lernmethoden anwenden können, muss besonders eine Fähigkeit verbessert werden: die Interpretation und Verarbeitung von Sinnesinformationen. „Bisher muss man den

Robotern sorgfältig aufbereitete Informationen sozusagen mit dem Löffel einflößen“, beschreibt Christoph von der Malsburg⁸ die Grenzen derzeitiger Systeme. Im schlimmsten Fall sind diese Informationen aber schon bei der Fertigstellung veraltet. Darum gehen von der Malsburg⁸ und seine Kollegen einen anderen Weg. „Unser Vorbild sind Kleinkinder, die durch autonomes Erkunden ihrer visuellen Umwelt das Sehen erlernen“, erläutert Jochen Triesch⁸.

Das Fernziel verschiedener Forschungsarbeiten im Bernstein Netzwerk ist es, Roboter zu konstruieren, die ihre Umwelt neugierig erforschen und dabei lernen, Objekten eine Bedeutung beizumessen. Wie Kleinkinder sollen sie mit Gegenständen „spielen“ und Schlussfolgerungen ziehen. Sie sollen lernen, dass ein Gegenstand von verschiedenen Perspektiven ganz unterschiedlich aussehen kann, dass man in eine Tasse etwas hinein füllen kann oder auch, dass man einen Zylinder rollen kann, wenn man ihn auf die Seite legt. Derartige künstliche Sehsysteme haben weitreichende Anwendungsfelder – von der Sicherheitstechnik über die Qualitätskontrolle im Bereich der industriellen Produktion bis hin zu automatisierter Navigation und Steuerung, z. B. bei selbstlenkenden Fahrzeugen. Wenn Roboter wie Kinder spielend lernen, haben sie einen großen Entwicklungsschritt in Richtung Autonomie getan.

Bislang aber sind wir von wirklich autonomen Service-Robotern weit entfernt. „Noch müssen wir nach kurzer Zeit mit Ölfkanne und Schraubenzieher anrücken“, meint Florentin Wörgötter^{3,10}. Die Zeit bis zur Entwicklung wirklich autonomer Maschinen sollte unter anderem dazu genutzt werden, die ethischen Randbedingungen für den Einsatz autonomer Maschinen zu klären.

„RunBot“ ist einer der schnellsten zweibeinigen Laufroboter der Welt.





Interview mit Florentin Wörgötter^{3,10}

Georg-August-Universität Göttingen
Kordinator des Bernstein Fokus:
Neurotechnologie, Göttingen

Stimmt es, dass Ihre Roboter lernen, Getränke zu servieren?

Nein, so weit sind wir leider noch nicht. Aber wir arbeiten an selbstlernenden Systemen. Um einem Roboter beizubringen, wie man ein Glas Wasser einschenkt, habe ich zwei Möglichkeiten: entweder ich programmiere den gesamten Handlungsablauf ein. Oder ich statte ihn mit der Fähigkeit zu lernen aus.

Worin liegt dabei die Herausforderung?

Um von einem Menschen zu lernen ist es nötig, dass der Roboter dessen Bewegungen erkennt und richtig interpretiert. Dann muss das Wissen in die richtige Handlung überführt werden. Hierbei muss der Lernprozess stattfinden. Heute sind wir soweit, dass ein Roboter nach zehn Versuchen das Getränk eingießen kann. Ähnlich wie ein kleines Kind lernt er nach und nach, die Dynamik seiner Bewegungen so einzustellen, dass er nichts verschüttet. Das ist nicht einfach.

Welchen Nutzen haben solche Roboter?

Zuerst einmal sind Roboter Modelle. Sie dienen ebenso wie Computermodelle dazu, eine bestimmte Frage zu

untersuchen, zum Beispiel: Wie funktioniert die Steuerung des zweibeinigen Gangs? Aber auch: Wie lernen wir bestimmte Bewegungsabläufe? Computersimulationen können mir dafür wichtige Hinweise liefern. Doch wenn ich wissen will, wie sich mein Modell in der Realität verhält, bei Gegenlicht oder einem schiefen Boden, erfahre ich mit Robotern deutlich mehr. Denn in ein Computermodell kann ich niemals alle möglichen, zum Teil ungeahnten Umwelteinflüsse einfließen lassen.

Gibt es auch konkrete Anwendungen für diese Systeme?

Durchaus. Sehr wichtig sind diese Erkenntnisse beispielsweise bei der Entwicklung so genannter Orthesen, also äußerlicher Stützelemente für Gelenke. Diese sollen in Zukunft Menschen mit einer Muskelschwäche oder sogar partiell Querschnittsgelähmte beim Gehen unterstützen. Hat man einen Roboter konstruiert, der auf zwei Beinen geht und Gleichgewicht hält, kann ich dieses Wissen auch bei der Steuerung einer solchen Orthese einsetzen. Da die Orthese bei jedem Menschen Unterschiedliches leisten muss, kann ich mit einem Roboter im Vorfeld verschiedene individuell patientenangepasste Szenarien durchspielen und die Orthesensteuerung darauf anpassen.

Chaos macht Robotern Beine

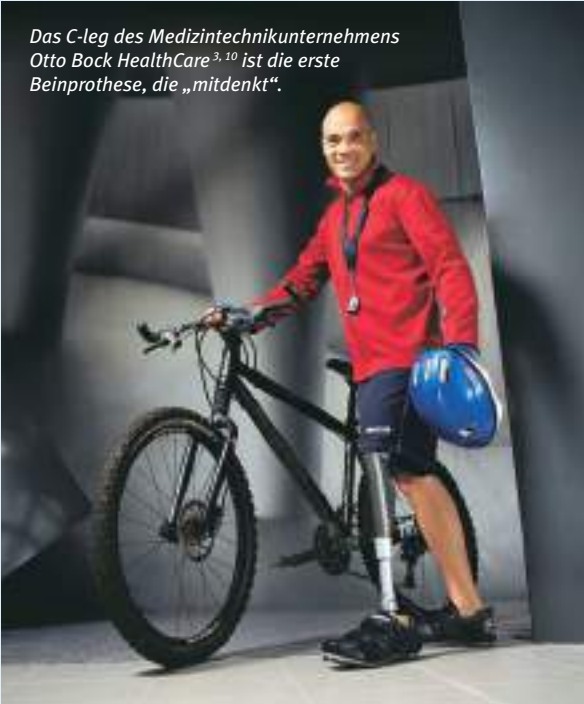
Einfache Bewegungen wie reflexartiges Gehen oder Atmen werden durch das Wechselspiel weniger Neuronen im Hirn oder Rückenmark reguliert. Auch bei der Gangsteuerung von Robotern kann man derartige effiziente Steuerungsmechanismen nutzen. Bisher waren die Maschinen jedoch auf einzelne Gangarten beschränkt und konnten sich nicht an veränderte Gegebenheiten anpassen. Nun haben Silke Steingrube³, Poramate Manoonpong³, Marc Timme³ und Florentin Wörgötter^{3,10} einen sechsbeinigen Roboter entwickelt, der seine Gangart je nach Umgebung ändert. Das Geheimnis liegt in der so genannten „Chaos-Kontrolle“. Im Ausgangszustand produziert ein winziges Steuer-Netzwerk ein chaotisches Aktivitätsmuster der Beine. Einfache Signale, die der Roboter von seinen Sensoren erhält, überführen das Chaos in ein periodisches Muster, das den Gang bestimmt. Je nach Notwendigkeit können unterschiedliche Muster – und damit unterschiedliche Gangarten – erzeugt werden. Damit kann der Hexapode effizient Steigungen erklimmen und sich selbst befreien, wenn er in ein Loch getreten ist. Ein Lernmechanismus ermöglicht es dem Roboter, die optimal angepasste Gangart einzulegen, sobald eine Situation wiederkehrt.



Die Beinbewegung des Hexapoden wird nach dem Prinzip der Chaos-Kontrolle gesteuert.



Das C-leg des Medizintechnikunternehmens Otto Bock HealthCare^{3,10} ist die erste Beinprothese, die „mitdenkt“.



Die Laufprothese, die sich an Bewegungen anpasst

Vor mehr als zehn Jahren entwickelte das Medizintechnikunternehmen Otto Bock HealthCare^{3,10} die erste Beinprothese, die „mitdenkt“. Ein Sensor in der Fußplatte registriert, in welcher Laufphase sich der Patient befindet und gibt diese Information an das Kniegelenk der Prothese weiter, das entsprechend ver- und entriegelt. Den Patienten wird so das Gehen wesentlich erleichtert.

Basierend auf den Forschungsergebnissen aus dem Projekt „RunBot“ entwickeln Florentin Wörgötter^{3,10} und Kollegen gemeinsam mit Otto Bock HealthCare^{3,10} verbesserte Laufprothesen bzw. Orthesen. Der Laufroboter dient dabei als wichtiges Modell. Indem die Forscher den Roboter mit Gewichten manipulieren, können sie vorhersagen, wie die Prothese auf ein größeres Körpergewicht oder große Belastung reagiert. Mit verschiedenen Sensoren soll sie sich zudem an das Laufverhalten ihres Trägers anpassen und – bis zu einem gewissen Grad – in der Lage sein, Bewegungsmuster (z. B. Treppensteigen oder Hinsetzen) vorauszusagen.

Roboter fragt nach dem Weg

Sie sind in einer neuen Stadt und haben keinen Stadtplan? Kein Problem, denn schnell können Passanten durch Erklärungen oder durch Gesten weiterhelfen. Diese zugleich einfache und effiziente Strategie soll es auch modernen Robotern ermöglichen, sich in einer fremden Umgebung zurechtzufinden. Kolja Kühnlenz⁵ konstruierte gemeinsam mit Kollegen einen Roboter, der selbständig den Weg durch die Stadt findet. Im Gegensatz zu klassischen Ansätzen verwendet der Roboter weder Navigationsgeräte noch Karten, sondern spricht Passanten an. Gesprochene Hinweise nimmt er per Mikrofon auf, Gesten per Kamera. Laser scannen die Umgebung ab und warnen vor Hindernissen. Noch ist dieser Roboter größer als ein Kühlschrank und kann die Straße nur mit einem Assistenten überqueren. Doch immerhin ist er fähig, sich in einer komplexen Umgebung zu orientieren. Dies ist für Roboter ein wesentlicher Schritt in Richtung Selbständigkeit.

Der Roboter „iuro“ deutet Gesten und Sprache von Passanten, um den Weg zu finden.





Bernstein Zentren für Computational Neuroscience

1 Berlin

Koordination:
Michael Brecht
(Humboldt-Universität zu Berlin)

Förderperiode
ab 2004:
Charité-Universitätsmedizin Berlin

Brandt, Stephan
Curio, Gabriel
Haynes, John-Dylan
Heinemann, Uwe
Heinz, Andreas
Obrig, Hellmuth
Schmitz, Dietmar
Villringer, Arno

Freie Universität Berlin

Kuhl, Dietmar
Menzel, Randolph
Nawrot, Martin

Humboldt-Universität zu Berlin

Hennig, Matthias
Herzel, Hanspeter
Kempner, Richard
Lindner, Benjamin
Ronacher, Bernd
Schimansky-Geier, Lutz

Technische Universität Berlin

Müller, Klaus-Robert
(und Fraunhofer-Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik FIRST, Berlin)
Obermayer, Klaus

Weitere Institutionen

Grün, Sonja
(Forschungszentrum Jülich und Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen)
Herz, Andreas
(Ludwig-Maximilians-Universität München)
Wichmann, Felix
(Eberhard Karls Universität Tübingen)
Wiskott, Laurenz
(Ruhr-Universität Bochum)

Förderperiode

ab 2010:
Charité - Universitätsmedizin Berlin

Blankenburg, Felix
Blüthgen, Nils
Brandt, Stephan
Curio, Gabriel
Dreier, Jens P.
Gloveli, Tengis
Haynes, John-Dylan
Heinemann, Uwe
Heinz, Andreas
Herzel, Hanspeter
Kramer, Achim
Schmitz, Dietmar

Freie Universität Berlin

Nawrot, Martin
Pflüger, Hans-Joachim
Schmuker, Michael
Sigrist, Stephan

Humboldt-Universität zu Berlin

Kempner, Richard
Kurths, Jürgen
Ronacher, Bernhard
Schreiber, Susanne
Schimansky-Geier, Lutz

Technische Universität Berlin

Dahlem, Markus A.
Hövel, Philipp
Müller, Klaus-Robert
(und Fraunhofer-Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik FIRST, Berlin)
Martin, Robert
Obermayer, Klaus
Schöll, Eckehard

Weitere Institutionen

Engbert, Ralf
(Universität Potsdam)
Kiebel, Stefan
(Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig)
Lewin, Gary R.
(Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin, Berlin)
Wichmann, Felix
(Eberhard Karls Universität Tübingen)

2 Freiburg

Koordination:
Ad Aertsen
(Albert-Ludwigs-Universität Freiburg)
Direktor:
Stefan Rotter
(Albert-Ludwigs-Universität Freiburg)

Förderperiode

ab 2004:
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Ball, Tonio
Bartos, Marlene
Boucsein, Clemens
De Raedt, Luc
Egert, Ulrich
Frotscher, Michael
Haas, Carola
Häus, Jürgen
Schulze-Bonhage, Andreas
Schneider, Gerhard
Timmer, Jens
Vida, Imre
Vogt, Klaus †

Honda Research Institute Europe GmbH, Offenbach

Gewaltig, Marc-Oliver
Körner, Edgar

Weitere Institutionen

/ **Industriepartner**
Boven, Karl-Heinz
(Multi Channel Systems MCS GmbH, Reutlingen)
Diesmann, Markus
(Forschungszentrum Jülich und Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen)

Jonas, Peter
(Institute of Science and Technology, Klosterneuburg, Österreich)
Mehring, Carsten
(Imperial College, London, UK)
Nawrot, Martin
(Freie Universität Berlin)

3 Göttingen

Koordination:
Theo Geisel
(Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation und Georg-August-Universität Göttingen)

Förderperiode

ab 2005:
Deutsches Primatenzentrum, Göttingen

Gail, Alexander
Treue, Stefan
(und Georg-August-Universität Göttingen)

Georg-August-Universität Göttingen

Dutschmann, Mathias
Hasselhorn, Marcus
Keller, Bernhard
Kree, Reiner
Moser, Tobias
Paulus, Walter
Rammesayer, Thomas
Schild, Detlev
Wörgötter, Florentin
Zippelius, Annette

Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen

Frahm, Jens
(und Biomedizinische NMR Forschungs GmbH)
Neher, Erwin

Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen

Bodenschatz, Eberhard
Timme, Marc
Wolf, Fred

Weitere Institutionen

/ **Industriepartner**
Herrmann, J. Michael
(University of Edinburgh, UK)
Mosler, Lüder
(Otto Bock Health-Care GmbH, Duderstadt)
Stühmer, Walter
(Max-Planck-Institut für Experimentelle Medizin, Göttingen)

Förderperiode

ab 2010:
Deutsches Primatenzentrum, Göttingen

Fischer, Julia
(und Georg-August-Universität Göttingen)
Gail, Alexander

Scherberger, Hansjörg
(und Georg-August-Universität Göttingen)
Treue, Stefan
(und Georg-August-Universität Göttingen)

Georg-August-Universität Göttingen

Enderlein, Jörg
Fiala, André
Göpfert, Martin
Hohage, Thorsten
Liebetanz, David
Manoonpong, Poramate
Meyer, Alexander
Moser, Tobias
Parlitz, Ulrich
Schild, Detlev
Schmidt, Christoph F.
Wörgötter, Florentin

Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen

Battaglia, Demian
Biess, Armin
Levina, Anna
Neef, Andreas
Timme, Marc
Witt, Annette
Wolf, Fred

Weitere Institutionen

/ **Industriepartner**
Frahm, Jens
(Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen und Biomedizinische NMR Forschungs GmbH, Göttingen)
Graumann, Bernhard
(Otto Bock Health-Care GmbH, Duderstadt)
Stühmer, Walter
(Max-Planck-Institut für Experimentelle Medizin, Göttingen)

4 Heidelberg-Mannheim

Koordination:
Daniel Durstewitz
(Zentralinstitut für Seelische Gesundheit, Mannheim)

Förderperiode

ab 2010:
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Bading, Hilmar
Bastian, Peter
Draguhn, Andreas
Lang, Stefan
Monyer, Hannah
Queisser, Gillian
Schuster, Christoph
Stevens, Angela

Zentralinstitut für Seelische Gesundheit, Mannheim

Bartsch, Dusan
Flor, Herta
Gass, Peter
Hahn, Thomas
Kirsch, Peter
Meyer-Lindenberg, Andreas
Sartorius, Alexander
Spanagel, Rainer
Vollmayr, Barbara

Weitere Institutionen

Fiebach, Christian
(Goethe-Universität Frankfurt)

5 München

Koordination:
Andreas Herz
(Ludwig-Maximilians-Universität München)

Förderperiode

ab 2005:
Ludwig-Maximilians-Universität München

Brandt, Thomas
Büttner, Ulrich
Glasauer, Stefan
Grothe, Benedikt
Leibold, Christian

Technische Universität München

Buss, Martin
Hemmer, Werner
Luksch, Harald
van Hemmen, Leo

Weitere Institutionen

Borst, Alexander
(Max-Planck-Institut für Neurobiologie, Martinsried)
Gollisch, Tim
(Georg-August-Universität Göttingen)

Förderperiode

ab 2010:
Ludwig-Maximilians-Universität München

Benda, Jan
Brandt, Thomas
Gais, Steffen
Glasauer, Stefan
Grothe, Benedikt
Leibold, Christian
Wachtler-Kulla, Thomas
Wiegrebe, Lutz

Max-Planck-Institut für Neurobiologie, Martinsried

Borst, Alexander
Sakmann, Bert

Technische Universität München

Buss, Martin
Cheng, Gordon
Hemmer, Werner
Kühnlenz, Kolja
Luksch, Harald
van Hemmen, Leo

Weitere Institutionen

/ **Industriepartner**
Gollisch, Tim
(Georg-August-Universität Göttingen)
Hochmair, Ingeborg
(MED-EL GmbH, Starnberg)
Polder, Hans Reiner
(npi electronic GmbH, Tamm)

6 Tübingen

Koordination:
Matthias Bethge
(Werner Reichardt Zentrum für Integrative Neurowissenschaften, Eberhard Karls Universität und Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen)

Förderperiode

ab 2010:
Eberhard Karls Universität Tübingen

Busse, Laura
Ebner, Marc
Euler, Thomas
Giese, Martin
Lindner, Axel
Mallot, Hanspeter
Muench, Thomas
Nieder, Andreas
Rosenstiel, Wolfgang
Schaeffel, Frank
Schwarz, Cornelius
Thier, Peter
Werner, Annette
Wichmann, Felix
Zrenner, Eberhard

Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen

Bartels, Andreas
Bülthoff, Heinrich H.
Ernst, Marc
Fleming, Roland
Gretton, Arthur
Harmeling, Stefan
Kayser, Christoph
Keliris, Georgios A.
Kerr, Jason
Logothetis, Nikos K.
Noppeney, Uta

Weitere Institutionen

Schölkopf, Bernhard
(Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme, Stuttgart und Tübingen)

Bernstein Fokus: Neurotechnologie

7 Berlin

Koordination:
Klaus-Robert Müller
(Technische Universität Berlin und Fraunhofer-Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik FIRST, Berlin)

Charité - Universitätsmedizin Berlin

Curio, Gabriel
Haynes, John-Dylan
Lüschow, Andreas
Steinbrink, Jens

Technische Universität Berlin

Blankertz, Benjamin
Möller, Sebastian
Obermayer, Klaus



GEFÖRDERTE PROJEKTE UND WISSENSCHAFTLER IM BERNSTEIN NETZWERK

Weitere Institutionen
Burghoff, Martin
(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin)
Wichmann, Felix
(Eberhard Karls Universität Tübingen)

8 Frankfurt

Koordination:
Christoph von der Malsburg,
Jochen Triesch
(beide Frankfurt Institute for Advanced Studies)

Frankfurt Institute for Advanced Studies
Lücke, Jörg
Weber, Cornelius

Goethe-Universität Frankfurt

Baumeister, Johann
Brause, Rüdiger
Kloeden, Peter E.
Knopf, Monika
Kolling, Thorsten
Memisevic, Roland
Mester, Rudolf
Schneider, Gaby
Wittum, Gabriel

Honda Research Institute Europe, Offenbach

Eggert, Julian
Gewaltig, Marc-Oliver
Görick, Christian
Körner, Edgar
Rodemann, Tobias
Sendho, Bernhard

Max-Planck-Institut für Hirnforschung, Frankfurt

Kohler, Axel
Neuenschwander, Sergio
Nikolic, Danko
Singer, Wolf
Sireteanu, Ruxandra †

Weitere Institutionen

Galuske, Ralf
(Technische Universität Darmstadt)
Lindenstruth, Volker
(Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg)
Meyer-Hermann, Michael
(Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung, Braunschweig)
Pipa, Gordon
(Universität Osnabrück)
Scharf, Hanno
(Forschungszentrum Jülich GmbH und Goethe-Universität Frankfurt)
Zhu, Junmei
(European Molecular Biology Laboratory - European Bioinformatics Institute, Hinxton, UK)

9 Freiburg-Tübingen

Koordination:
Ulrich Egert
(Albert-Ludwigs-Universität Freiburg)

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Aertsen, Ad
Ball, Tonio
Boucsein, Clemens
Hefft, Stefan
Hennig, Jürgen
Kaube, Holger
Maio, Giovanni
Meier, Ralph
Müller, Oliver
Rickert, Jörn
Rotter, Stefan
Rühe, Jürgen
Schulze-Bonhage, Andreas
Spreer, Joachim
Stieglitz, Thomas
Urban, Gerald
von Elverfeldt, Dominik
Weiller, Cornelius

Eberhard Karls Universität Tübingen

Birbaumer, Niels
Bogdan, Martin
Braun, Christoph
Gharabaghi, Alireza
Preissl, Hubert
Soekadar, Surjo R.
Stett, Alfred
(und Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen)
Strehl, Ute
Tatagiba, Marcos

inomed Medizintechnik GmbH, Teningen

Altaner, Michael
Mattmüller, Rudi

Weitere Institutionen / Industriepartner

Boven, Karl-Heinz
(Multi Channel Systems MCS GmbH, Reutlingen)
Diesmann, Markus
(Forschungszentrum Jülich und Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen)
Körner, Edgar
(Honda Research Institute Europe GmbH, Offenbach)
Mehring, Carsten
(Imperial College, London, UK)
Schölkopf, Bernhard
(Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme, Stuttgart und Tübingen)
Staiger, Jochen
(Georg-August-Universität Göttingen)
Ugurbil, Kamil
(University of Minnesota, Minneapolis, USA)

10 Göttingen

Koordination:
Florentin Wörgötter
(Georg-August-Universität Göttingen)

Deutsches Primatenzentrum, Göttingen

Gail, Alexander
Treue, Stefan
(und Georg-August-Universität Göttingen)

Georg-August-Universität Göttingen

Farina, Dario
Löwel, Siegrid
Moser, Tobias
Paulus, Walter
Schild, Detlev

Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen

Egner, Alexander
Frahm, Jens
(und Biomedizinische NMR Forschungs GmbH)
Neher, Erwin

Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen

Biess, Armin
Geisel, Theo
(und Georg-August-Universität Göttingen)
Neef, Andreas
Wolf, Fred

Weitere Institutionen

Bamberg, Ernst
(Max-Planck-Institut für Biophysik, Frankfurt)
Herrmann, J. Michael
(University of Edinburgh, UK)
Lenarz, Thomas
(Medizinische Hochschule Hannover)
Stühmer, Walter
(Max-Planck-Institut für Experimentelle Medizin, Göttingen)

Bernstein Fokus: Neuronale Grundlagen des Lernens

11 Gedächtnis und Entscheidungsfindung

Koordination:
Dorothea Eisenhardt
(Freie Universität Berlin)

Freie Universität Berlin

Menzel, Randolph
Nawrot, Martin
Rojas, Raul

Weitere Institutionen

Gerber, Bertram
(Julius-Maximilians-Universität Würzburg)
Riedmiller, Martin
(Albert-Ludwigs-Universität Freiburg)

12 Visuelles Lernen

Koordination:
Siegrid Löwel
(Georg-August-Universität Göttingen)

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Holthoff, Knut
Hübner, Christian
Witte, Otto

Weitere Institutionen

Wolf, Fred
(Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen)

13 Sequenzlernen

Koordination:
Onur Güntürkün
(Ruhr-Universität Bochum)

Ruhr-Universität Bochum

Dinse, Hubert
Tegenthoff, Martin
(und Universitätsklinik Bergmannsheil, Bochum)

Weitere Institutionen

Mouritsen, Henrik
(Carl von Ossietzky Universität Oldenburg)
Pawelzik, Klaus
(Universität Bremen)
Scharff, Constance
(Freie Universität Berlin)

14 Kurzzeitgedächtnis

Koordination:
Hiromu Tanimoto
(Max-Planck-Institut für Neurobiologie, Martinsried)

Universität Konstanz

Galizia, Giovanni
Szyzka, Paul

Weitere Institutionen

Herz, Andreas
(Ludwig-Maximilians-Universität München)

15 Zustandsabhängigkeit des Lernens

Koordination:
Petra Ritter
(Charité - Universitätsmedizin Berlin)

Richard Kempter
(Humboldt-Universität zu Berlin)

Humboldt-Universität zu Berlin

Brecht, Michael
Schreiber, Susanne

Weitere Institutionen

Born, Jan
(Universität zu Lübeck und Eberhard Karls Universität Tübingen)
Dinse, Hubert
(Ruhr-Universität Bochum)
Heinemann, Uwe
(Charité - Universitätsmedizin Berlin)
Pleger, Burkhard
(Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig)

16 Plastizität neuronaler Dynamik

Koordination:
Christian Leibold
(Ludwig-Maximilians-Universität München)

Ludwig-Maximilians-Universität München

Felmy, Felix
Grothe, Benedikt
Loebel, Alex
Stemmler, Martin

17 Komplexe Lernvorgänge

Koordination:
Christian Büchel
(Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf)

Charité - Universitätsmedizin Berlin

Gallinat, Jürgen
Heinz, Andreas
Plotkin, Michail
Puls, Imke
Rapp, Michael
Wrase, Jana

Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Berlin

Heekeren, Hauke
Li, Shu-chen
Lindenberger, Ulman

Weitere Institutionen

Obermayer, Klaus
(Technische Universität Berlin)
Schubert, Florian
(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin)
Sommer-Blöchel, Tobias
(Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf)

18 Lernen von Verhaltensmodellen

Koordination:
Gregor Schöner
(Ruhr-Universität Bochum)

Ruhr-Universität Bochum

Igel, Christian
Iossifidis, Ioannis

Industriepartner

Edelbrunner, Hannes
(nisis GmbH, Bochum)
Hoch, Andreas
(SCHUNK GmbH & Co. KG, Lauffen (Neckar))

Bernstein Gruppen für Computational Neuroscience

19 Bochum

Koordination:
Gregor Schöner
(Ruhr-Universität Bochum)

Ruhr-Universität Bochum

Igel, Christian
Jancke, Dirk

20 Bremen

Koordination:
Klaus Pawelzik
(Universität Bremen)

Universität Bremen

Ernst, Udo
Fahle, Manfred
Kreiter, Andreas

21 Heidelberg

Koordination:
Gabriel Wittum
(Goethe-Universität Frankfurt)

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Bading, Hilmar
Draguhn, Andreas
Lindenstruth, Volker
Monyer, Hannah
Schuster, Christoph

22 Jena

Koordination:
Herbert Witte
(Friedrich-Schiller-Universität Jena)

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Hauelsen, Jens
Miltner, Wolfgang
Reichenbach, Jürgen



23 Magdeburg

Koordination:
Jochen Braun
(*Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg*)

Leibniz-Institut für Neurobiologie, Magdeburg
Ohl, Frank
(*und Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg*)
Scheich, Henning

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Hinrichs, Hermann
Michaelis, Bernd
Rose, Georg
Voigt, Thomas
Wendemuth, Andreas

Weitere Institutionen
Herrmann, Christoph
(*Carl von Ossietzky Universität Oldenburg*)

Bernstein Kooperationen für Computational Neuroscience

24 Neurovaskuläre Kopplung

Koordination:
Gregor Rainer
(*Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen*)

Müller, Klaus-Robert
(*Technische Universität Berlin und Fraunhofer-Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik FIRST, Berlin*)

25 Informations-Kodierung

Koordination:
Martin Göpfert
(*Georg-August-Universität Göttingen und Max-Planck-Institut für Experimentelle Medizin, Göttingen*)

Herz, Andreas
(*Ludwig-Maximilians-Universität München*)

26 Physiologie und Bildgebung

Koordination:
Kay Brune
(*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*)

Hess, Andreas
(*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*)
Ohl, Frank
(*Leibniz-Institut für Neurobiologie und Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg*)
Sibila, Michael
(*Technische Universität Berlin*)

27 Gedächtnis-Netzwerk

Koordination:
Uwe Thomas
(*Thomas Recording GmbH, Giessen*)

Munk, Matthias
(*Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen*)
Obermayer, Klaus
(*Technische Universität Berlin*)

28 Olfaktorische Kodierung

Koordination:
Giovanni Galizia
(*Universität Konstanz*)

Menzel, Randolf
(*Freie Universität Berlin*)

29 Zeitliche Präzision

Koordination:
Hermann Wagner
(*Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen*)

Kempter, Richard
(*Humboldt-Universität zu Berlin*)

30 Neuronale Synchronisation

Koordination:
Rüdiger Köhling
(*Universität Rostock*)

Hefft, Stefan
(*Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*)

31 Bewegungsassoziierte Aktivierung

Koordination:
Christoph Braun
(*Eberhard Karls Universität Tübingen*)

Mehring, Carsten
(*Imperial College, London, UK*)

32 Aktionspotential-Kodierung

Koordination:
Siegrid Löwel
(*Georg-August-Universität Göttingen*)

Volgushev, Maxim
(*Ruhr-Universität Bochum*)
Wolf, Fred
(*Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen*)

33 Transkranielle Stimulation

Koordination:
Helmut Buchner
(*Klinikum Vest GmbH Knappschaftskrankenhaus Recklinghausen*)

Knoll, Gunter
(*Universität Kassel*)
Paulus, Walter
(*Georg-August-Universität Göttingen*)
Schellhorn, Klaus
(*NeuroConn GmbH, Ilmenau*)

34 Netzwerk-Simulation

Koordination:
Peter Bastian
(*Universität Stuttgart*)

Borst, Alexander
(*Max-Planck-Institut für Neurobiologie, Martinsried*)

Bernstein Preis für Computational Neuroscience

35 2006

Bethge, Matthias
(*Werner Reichardt Zentrum für Integrative Neurowissenschaften, Eberhard Karls Universität und Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen*)

36 2007

Benda, Jan
(*Ludwig-Maximilians-Universität München*)

37 2008

Schreiber, Susanne
(*Humboldt-Universität zu Berlin*)

38 2009

Gläscher, Jan
(*Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf*)

39 2010

Ernst, Udo
(*Universität Bremen*)

40 Deutscher INCF Knoten (G-Node)

Ludwig-Maximilians-Universität München
Herz, Andreas
(*Koordination*)
Wachtler-Kulla, Thomas
(*Direktor*)

Deutsch-US-amerikanische Kooperationen in Computational Neuroscience

41 Berlin – Cambridge:
Die Rolle von Astrozyten in der Informationsverarbeitung kortikaler Netzwerke

Deutscher Koordinator:
Klaus Obermayer
(*Technische Universität Berlin*)

42 Freiburg – Cambridge:
Integration von bottom-up und top-down Signalen bei der visuellen Erkennung

Deutscher Koordinator:
Andreas Schulze-Bonhage
(*Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*)

43 Lübeck – New York:
Die Wirkung von schwachen elektrischen Strömen auf die Gedächtniskonsoolidierung im Schlaf

Deutscher Koordinator:
Lisa Marshall
(*Universität zu Lübeck*)

Deutscher Projektpartner:
Thomas Martinetz
(*Universität zu Lübeck*)

44 Mannheim – Los Angeles:
Persistierende Aktivität im medialen Temporallappen in vivo

Deutscher Koordinator:
Thomas Hahn
(*Zentralinstitut für Seelische Gesundheit, Mannheim*)

45 München – San Diego:
Hippocampale Repräsentation auditorischer und räumlicher Sequenzen

Deutscher Koordinator:
Christian Leibold
(*Ludwig-Maximilians-Universität München*)

Bernstein Koordinationsstelle (BCOS)

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Cardoso de Oliveira, Simone
(*Leitung*)
Faber, Johannes
(*Presse- und Öffentlichkeitsarbeit*)
Geiger, Petra
(*Projektsassistentin*)
Schwarzwälder, Kerstin
(*Junior Wissenschaftlerin*)

Industriepartner

Biomedizinische NMR Forschungs GmbH, Göttingen¹⁰

Brain Products GmbH, Gilching⁷

certon systems GmbH, Heidelberg⁸

Cochlear GmbH, Hannover¹⁰

Daimler AG, Sindelfingen⁸

Deutsche Telekom Laboratories, Berlin⁷

Honda Research Institute Europe, Offenbach^{2, 8, 9}

Infineon Technologies AG, Neubiberg⁵

inomed Medizintechnik GmbH, Teningen⁹

Leica Microsystems GmbH, Wetzlar¹⁰

L-1 Identity Solutions AG, Bochum⁸

Magnicon GbR, Hamburg⁷

MED-EL Deutschland GmbH, Starnberg¹⁰

Multi Channel Systems MCS GmbH, Reutlingen^{2, 9}

neuroConn GmbH, Ilmenau³³

NIRx Medizintechnik GmbH, Berlin⁷

nisys GmbH, Bochum¹⁸

npi electronic GmbH, Tamm⁵

Otto Bock HealthCare GmbH, Duderstadt^{3, 10}

Robert Bosch GmbH, Hildesheim⁸

SCHUNK GmbH & Co KG, Lauffen (Neckar)¹⁸

Thomas Recording GmbH, Gießen^{10, 27}

VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH, Wiesbaden⁸



- S. 1 Cammeraydave | Dreamstime.com
- S. 3 Graduate School of Systemic Neurosciences, Ludwig-Maximilians-Universität München
- S. 6 oben: Cammeraydave | Dreamstime.com;
unten: Universitätsarchiv Halle, Repro 40, Bl 18
- S. 7 oben: Bernstein Koordinationsstelle (BCOS);
unten links: David Willshaw; unten rechts: Larry Abbott
- S. 8 oben: Bernstein Zentrum Berlin; Mitte: Andreas Lompe;
unten: Janzer, Stuttgart / Bernstein Zentrum Heidelberg-Mannheim
- S. 9 oben: Nickl & Partner Architekten AG; Mitte: Benedikt Grothe;
unten: Gunnar Grah
- S. 10 oben: Bernstein Zentrum München; Mitte: Uwe Dettmar, Goethe-Universität Frankfurt; unten: Ulrich Dahl, Technische Universität Berlin
- S. 11 Bernstein Koordinationsstelle (BCOS)
- S. 12 links: Pressestelle Technische Universität Berlin, Ulrich Dahl;
oben Mitte: Ulrich Egert; unten Mitte: Eraxion | Dreamstime.com;
oben rechts: David Rotermond/Nils Treiber;
unten rechts: Chaoss | Dreamstime.com
- S. 13 oben links: Bradcalkins | Dreamstime.com; unten links: Alleng | Dreamstime.com; rechts: Katrin Weigmann und Kts | Dreamstime.com
- S. 14 oben links, oben rechts: Gunnar Grah; unten: Bernstein Fokus: Neurotechnologie, Frankfurt
- S. 15 oben links: Gunnar Grah; oben Mitte, oben rechts: Harald Rehling;
unten: Klaus Obermayer
- S. 16 oben: Hirsh Cohen; Mitte: Bernstein Koordinationsstelle (BCOS);
unten: G-Node
- S. 17 oben: Bernstein Koordinationsstelle (BCOS); Mitte: Katrin Weigmann;
unten: Bernstein Computational Neuroscience e.V.
- S. 18 oben: Adam1975 | Dreamstime.com; unten: Kts | Dreamstime.com
- S. 19 oben: Graduate School of Systemic Neurosciences, Ludwig-Maximilians-Universität München; unten: Rüdiger Krahe
- S. 20 oben: Michael Brecht; unten: Maek123 | Dreamstime.com
- S. 21 oben: Chaoss | Dreamstime.com; unten: Bernd Wiebelt
- S. 22 oben: Ingo Schneider; unten: Gabriel Wittum (Goethe-Universität Frankfurt) modifiziert nach: J. P. Eberhard, A. Wanner, G. Wittum (2006): Neurocomputing 70 (3): 327-342, erzeugt mit dem Neuronen-Generator NeuGen (Neugen.org).
- S. 23 oben links: wikimedia: CC-BY-SA-3.0; oben rechts: ©Hans Hillewaert / CC-BY-SA-3.0; Mitte: Creatista | Dreamstime.com;
unten: Elwynn | Dreamstime.com
- S. 24 oben, unten: Eraxion | Dreamstime.com
- S. 25 oben: Eraxion | Dreamstime.com und Andreas Schulze-Bonhage;
unten: Daniel Durstewitz
- S. 26 oben: Creatista | Dreamstime.com, unten: Arbeitsgruppe Dr. Erich Schneider, Institut für Klinische Neurowissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität München
- S. 27 oben: Bianka Götze, Friedrich-Schiller-Universität Jena; Mitte: Dirk Jancke; unten: Portrait von Prof. Dr. Stefan Treue, Foto: Ingo Bulla, Quelle: Georg-August Universität Göttingen
- S. 28 oben: Bernstein Zentrum Berlin; unten: Ryanphoto | Dreamstime.com
- S. 29 oben links: John-Dylan Haynes; oben rechts: Sabine Hofer (Biomedizinische NMR Forschungs GmbH und Bernstein Zentrum Göttingen), modifiziert nach: S. Hofer, K.D. Merboldt, R. Tammer, J. Frahm (2008): Cerebral Cortex 18:1079-1084;
unten: John-Dylan Haynes
- S. 30 oben: Katrin Weigmann und Kts | Dreamstime.com;
unten: Isseleel | Dreamstime.com
- S. 31 oben: Graduate School of Systemic Neurosciences, Ludwig-Maximilians-Universität München; Mitte: Eraxion | Dreamstime.com;
unten: Butz M. / Teuchert-Noodt G.
- S. 32 oben: Carlos Toledo/Bernstein Center Freiburg;
unten: Martin Strube-Bloss
- S. 33 oben: Berlin Brain-Computer Interface/Technische Universität Berlin, Ulrich Dahl;
unten: Michael Tangermann/Berlin Brain-Computer Interface
- S. 34 oben: Copyright by Cochlear Ltd.;
unten: Eberhard Karls Universität Tübingen / Retina Implant AG
- S. 35 oben: Oliver Müller; unten: Prof. Dr. Alireza Gharabaghi, Neurochirurgische Universitätsklinik Tübingen
- S. 36 oben: 2011 Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Technische Universität München; unten: Florentin Wörgötter und Poramate Manoonpong, Bernstein Zentrum für Computational Neuroscience, Department for Computational Neuroscience, III Physikalisches Institut - Biophysik, Georg-August Universität Göttingen
- S. 37 oben: Bernstein Zentrum Göttingen; unten: Poramate Manoonpong und Marc Timme, Network Dynamics Group, Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation und Georg-August Universität Göttingen
- S. 38 oben: Otto Bock HealthCare; unten: 2011 Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Technische Universität München