

Moderne Verfahren der Bildgebung erlauben neue Einblicke in die innere Struktur und Funktion des menschlichen Gehirns. Dies gilt insbesondere für die Magnetresonanztomografie (MRT), die sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten zum mittlerweile wichtigsten Verfahren der nichtinvasiven diagnostischen Bildgebung in der Medizin entwickelt hat. Eine Vielzahl von technischen Varianten der mit Magnetfeldern und Rundfunkwellen arbeitenden MRT haben einen Zugang zu unterschiedlichsten klinischen Fragestellungen und grundlegenden Aspekten der Hirnforschung eröffnet. Diese Ansätze sind nicht nur für Untersuchungen neurologischer und psychiatrischer Erkrankungen von erheblicher Bedeutung, sondern bieten völlig neue Perspektiven für die funktionelle Erforschung des zentralen Nervensystems. In langjähriger Zusammenarbeit von Forschern des Göttinger Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie und der Abteilung Neuropädiatrie der Universität Göttingen ist es gelungen, Verfahren zu entwickeln, die heute für die Diagnose und Therapiekontrolle bei einer Vielzahl von Hirnerkrankungen im Kindesalter eingesetzt werden.

Komplementär zu Röntgentechniken stellen die MRT-Bilder nicht die Knochen, sondern die Verteilung des Wassers in den weichen Körpergeweben dar: also das Gehirn und nicht den Schädel (siehe S. 34). Dabei gelingt es, aus den mit Ultrakurzwellen angeregten Radiowellen der Atomkerne des Wasserstoffs (Protonen) anatomische Aufzeichnungen mit hoher räumlicher Auflösung und natürlichen Gewebekontrasten zu erzielen, die nicht unbedingt den Einsatz eines Kontrastmittels erfordern (Abb. 1). Im wesentlichen beruht die MRT-Signalstärke neben der Konzentration des Wassers auf den molekularen Eigenschaften der Wasserprotonen in den Gewebestrukturen. Beispielsweise ergeben sich aus Unterschieden in der Beweglichkeit des Wassers MRT-Bilder mit spezifischen Kontrasten für die Hirnflüssigkeit in den zentralen Hirnkammern, für die mit Myelin ummantelten Nervenfortsätze in den Fasern der weißen Hirnsubstanz und für die Nervenzellkörper in der grauen Hirnsubstanz der Hirnrinde. Diese Eigenschaften ergeben für die MRT zugleich eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber krankhaften Veränderungen des Gewebes. Zusätzlich gestatten spezielle Verfahren, die die stationären MRT-Signale im Gewebe von den schnell transportierten Wasserprotonen in den Blutgefäßen unterscheiden, eine selektive Darstellung des Gefäßbaums im zentralen Nervensystem (Abb. 2). Mit derartigen Auf-

Blicke ins Gehirn – Bilder vom Denken

Magnetresonanztomografie des menschlichen Gehirns

Jens Frahm

nahmen lassen sich Verengungen erkennen, die durch eine regionale Mangelversorgung des Gehirns mit Sauerstoff zu einem Schlaganfall führen können.

Fingerabdrücke des Stoffwechsels

Ein besonderes Bemühen in der Weiterentwicklung der MRT rich-

tet sich auf eine zunehmend umfassendere Charakterisierung des Hirngewebes, die über eine rein strukturelle oder anatomische Darstellung hinausgeht. Ein viel versprechender Ansatz sind räumlich lokalisierte Untersuchungen des Hirnstoffwechsels (Abb. 3). Mit Hilfe der Magnetre-

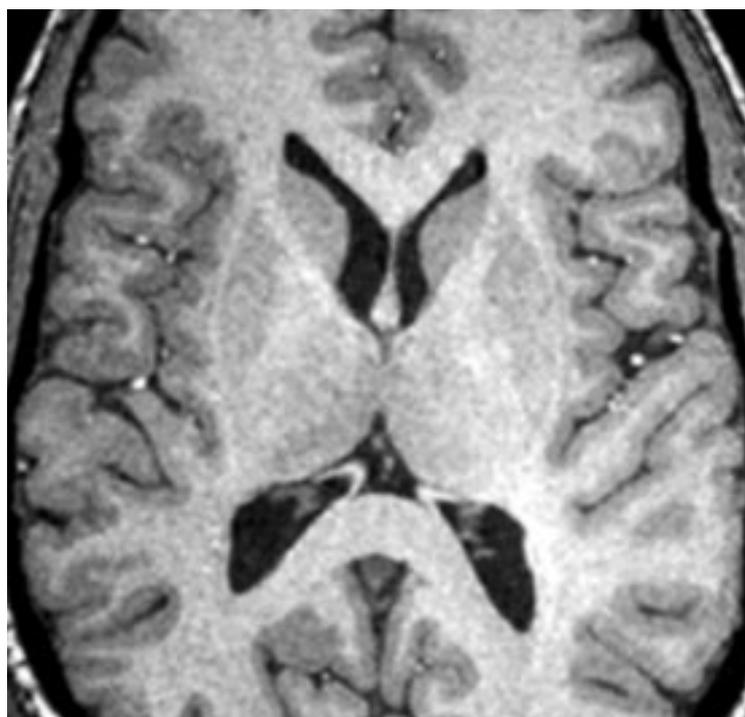


Abb. 1
Magnetresonanztomografie des menschlichen Gehirns. In diesem anatomischen Schnittbild (T1-Wichtung) unterscheiden sich die Nervenzellkörper in der grauen Hirnsubstanz (dunkel) von den Nervenfasern der weißen Hirnsubstanz (hell) und der Flüssigkeit in den Hirnkammern (schwarz).
Abbildungen:
Jens Frahm



Abb. 2
Angiografische
Projektion der Gefäße
aus MRT-Bildern des
zentralen Bereiches
des Gehirns.

sonanz-Spektroskopie (MRS, siehe S. 34) gelingt es, Protonensignale aus definierten Bereichen des Gehirns aufzuzeichnen, deren genaue Lage und Größe aufgrund von MRT-Bildern frei gewählt werden können. Nach technischer Unterdrückung des für die Bildgebung verwendeten Wassersignals ergeben sich typische Muster von Stoffwechselprodukten, die sowohl der zellulären Zusammensetzung des Gewebes entsprechen als auch die wesent-

lichen Stoffwechselprozesse widerspiegeln. Damit repräsentieren die Spektren neurochemische Fingerabdrücke, die über morphologische Befunde hinaus eine genauere Beschreibung einer krankhaften Veränderung erlauben (Abb. 3). Beispielsweise zeichnet sich in der MRS das Stoffwechsellmuster eines Tumors aus hirneigenem Gewebe (Gliom) durch hohe Konzentrationen von Myo-Inosit (Ins) und Cholin-haltigen Verbindungen (Cho) aus, die vor allem in den Zellen des

Gliagewebes enthalten sind. Auf der anderen Seite fehlt im Tumorgewebe im Vergleich zu gesundem Hirngewebe die Substanz N-Azetilaspartat (tNAA), die ausschließlich in intakten Nervenzellen vorkommt. In langjähriger Zusammenarbeit mit der Abteilung Neuropädiatrie des Bereichs Humanmedizin der Universität Göttingen wurden MRS-Verfahren für eine regional und altersgemäß differenzierte Quantifizierung der neurochemischen Muster im menschlichen Gehirn weiterentwickelt. Auf dieser Grundlage wird die MRS heute für die Diagnose und Therapieverfolgung bei einer Vielzahl von Hirnerkrankungen im Kindesalter eingesetzt.

Bilder vom Denken und Handeln

Eine der faszinierendsten Entwicklungen in der MRT ist die Entdeckung, dass sich dynamische Messvarianten mit einer Zeitauflösung von 0.1 bis drei Sekunden nutzen lassen, um die Änderung einer Hirntätigkeit sichtbar zu machen. Der zugrunde liegende Mechanismus beruht auf der Tatsache, dass die Verarbeitung von Sinneseindrücken oder die Bewältigung einer Aufgabenstellung in den beteiligten

Abb. 3
Magnetresonanztomografie und Spektroskopie. (links) Das Stoffwechsellmuster eines Tumors (Gliom), der im MRT-Bild (T2-Wichtung) hell dargestellt wird (Mitte). Im Vergleich zur gegenüberliegenden Kontrollregion ist der Tumor durch einen Verlust an Nervenzellen gekennzeichnet, die stets eine hohe Konzentration an N-Azetilaspartat (tNAA) aufweisen (rechts).

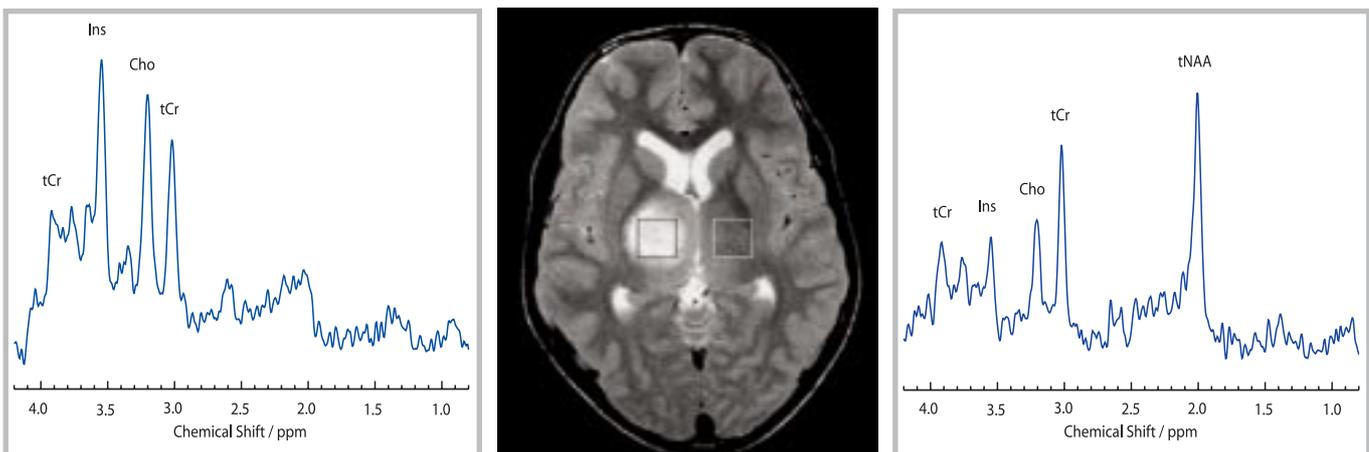
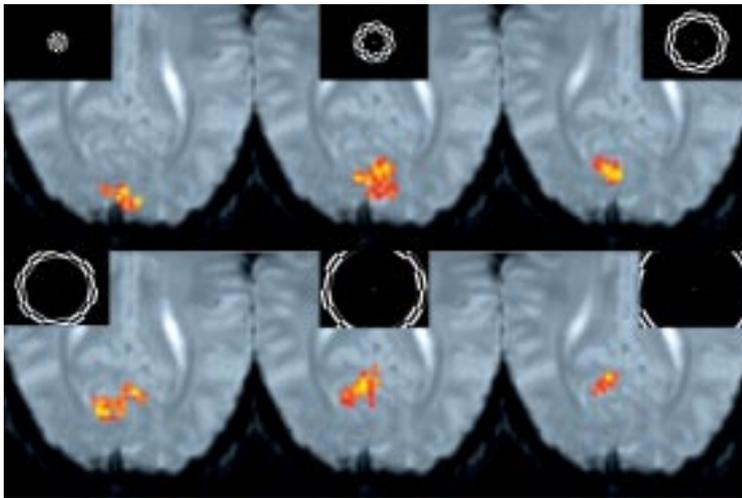




Abb. 4
Funktionelle Kartierung der Sehrinde. Ausgehend von der Repräsentation des zentralen Sehens höchster Sehschärfe am hinteren Pol des Gehirns (oben links) wandern die Repräsentationen der äußeren Anteile des Gesichtsfeldes bei peripherem Sehen in weiter vorne gelegene Areale der Sehrinde (unten rechts). Die Einschübe zeigen die verwendeten Stimuli, wobei die Versuchsperson ein zentrales Kreuz im Gesichtsfeld fixiert.

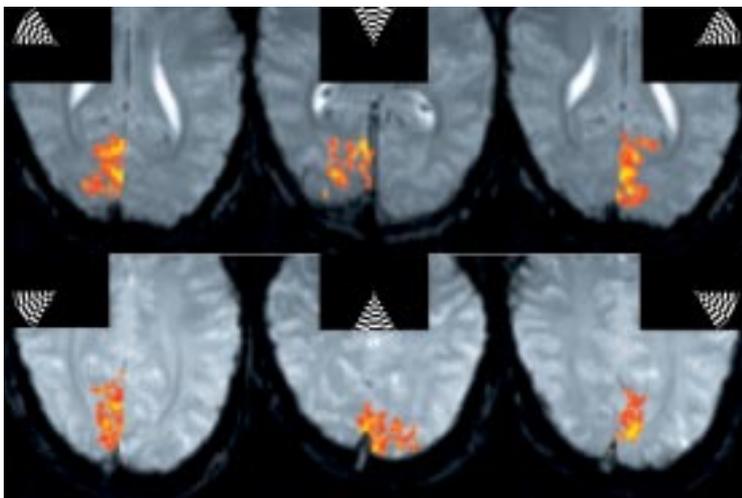


Hirnarealen den regionalen Blutfluss und Stoffwechsel beeinflusst. Die entsprechend veränderte Sauerstoffversorgung ist mit einem veränderten Hämoglobin-Gehalt in den Gefäßen verbunden. Dieser Effekt kann in der MRT als Signalveränderung sichtbar gemacht werden, da Hämoglobin ohne die Bindung eines Sauerstoffmoleküls eine paramagnetische Verbindung ist und für die MRT wie ein körpereigenes Kontrastmittel wirkt. Ein zeitlicher Vergleich der in den MRT-Bildern auftretenden Intensitätsänderungen mit dem Wechsel der von der Versuchsperson abverlangten Aufgabe, erlaubt dann eine Identifizierung der beteiligten Hirnsysteme. Dies geschieht in der Regel in Form einer farbkodierten Aktivierungskarte, die die

funktionelle Anatomie der entsprechenden Informationsverarbeitung im Gehirn repräsentiert.

Für die praktische Vorgehensweise einer Hirnfunktionsmessung ist der Wechsel zwischen mindestens zwei verschiedenen Zuständen wichtig. In diesem Paradigma sollte jeder Zustand durch eine möglichst genau spezifizierte, objektivierbare Leistung bestimmt sein, die dem Gehirn zu einem definierten Zeitpunkt und für eine bestimmte Dauer abverlangt wird. Dabei spielt es naturgemäß eine Rolle, welche Hirnfunktionszustände miteinander und in welcher Reihenfolge verglichen werden. Aufschlussreiche Beispiele betreffen Untersuchungen zur funktionellen Organisation derjenigen Hirnrindenareale, die sich der Verar-

Abb. 5
Funktionelle Kartierung der Sehrinde. Die Repräsentationen von Teilen des Gesichtsfeldes finden sich in jeweils gegenüberliegenden Bereichen der Sehrinde. In den MRT-Bildern entspricht die rechte Seite der linken Hirnhälfte, so dass das rechte Gesichtsfeld (rechte Spalte) in der linken Hirnhälfte repräsentiert wird. Analog wird das obere Gesichtsfeld in tiefer gelegenen Arealen der Sehrinde verarbeitet (obere Reihe) als das untere Gesichtsfeld (untere Reihe).



beitung primärer Sinneseindrücke wie dem Sehen, Hören oder Fühlen widmen.

Als eines der wichtigsten Hirnsysteme in der biologischen Evolution zeigt die Sehrinde eine strenge »Retinotopie«, die einer wohl definierten räumlichen Organisation der kortikalen Repräsentationen des Sehens, also der einzelnen Anteile des Gesichtsfeldes, entspricht. Im Vergleich zur Verarbeitung des zentralen Sehens höchster Sehschärfe am hinteren Pol des Gehirns finden sich die äusseren Anteile des Gesichtsfeldes bei peripherem Sehen in weiter vorne gelegenen Arealen der Sehrinde (Abb. 4). In ähnlich geordneter Weise werden Sinneseindrücke aus einzelnen Segmenten des Gesichtsfeldes in jeweils gegenüberliegenden Bereichen der Sehrinde verarbeitet (Abb. 5). Dabei ist zu beachten, dass die MRT-Bilder dem Betrachter »gegenüberstehen«, so dass die linke Hirnhälfte im rechten Teil des Bildes dargestellt wird. Die Informationsverarbeitung aus den Segmenten des rechten oberen und unteren Gesichtsfeldes wird also in der linken Hirnhälfte gefunden, während Segmente des linken Gesichtsfeldes in der rechten Hemipshäre repräsentiert werden. In analoger Weise werden obere Anteile des Gesichtsfeldes in den tiefer gelegenen Arealen der Sehrinde verarbeitet, während das untere Gesichtsfeld hauptsächlich in den obersten Schichten durch die Sehrinde gefunden wird.

Derartige Untersuchungen des menschlichen Gehirns bestätigen auf ebenso einfache wie elegante Weise aufwändige Befunde aus früheren tierexperimentellen Studien. Das gilt auch für weitere Aspekte der funktionellen Organisation der Sehrinde, die insgesamt eine große Anzahl komplementärer Aufgaben mit Hilfe hochspezialisierter Populationen von Nervenzellen übernimmt: Als Beispiele dienen die Verarbei-

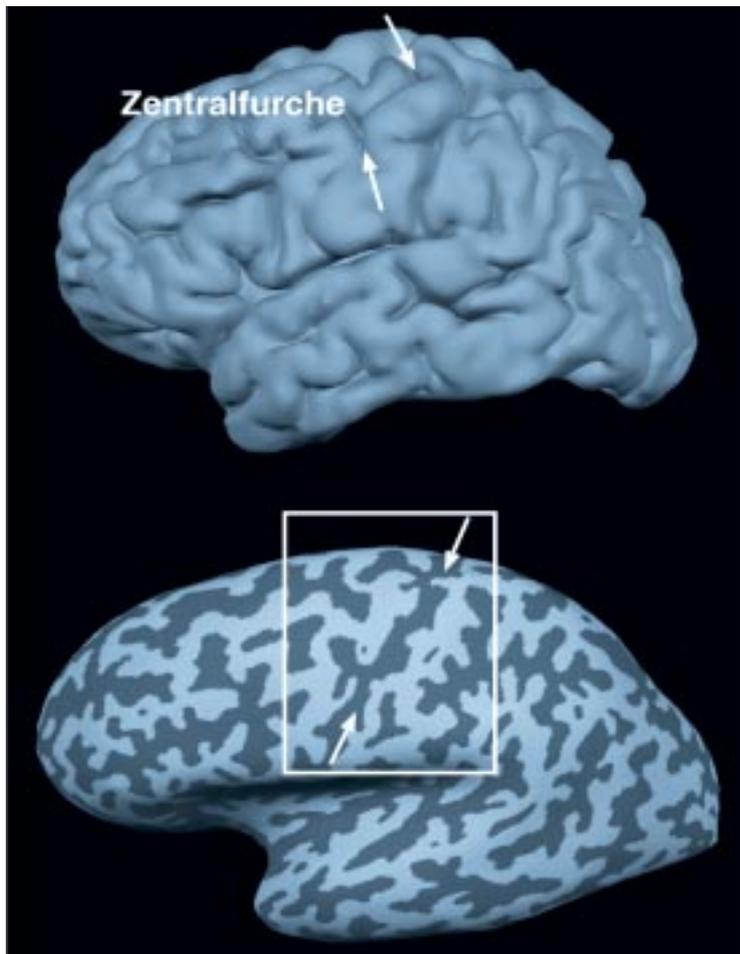


Abb. 6
Rekonstruktion der Hirnoberfläche aus MRT-Bildern mit der durch Pfeile gekennzeichneten seitlichen Zentralfurche (oben) sowie als flache Karte der mathematisch aufgeblähten grauen Hirnsubstanz (unten).

Magnetresonanz

Die Verfahren der magnetischen Resonanz beruhen auf der Beobachtung von Radiofrequenzsignalen, also Rundfunkwellen, die von den Wasserstoffatomkernen (= Protonen) im Gewebe ausgesendet werden, wenn sie in einem starken Magnetfeld mit einem kurzen Impuls aus Ultrakurzwellen angeregt werden. Aufgrund des hohen Wassergehaltes der Zellen in biologischem Gewebe ergibt das Signal der Wasserprotonen die mit Abstand stärkste Antwort. Es wird daher für eine bildliche Darstellung des Hirngewebes mit der *Magnetresonanz-Tomografie (MRT)* genutzt.

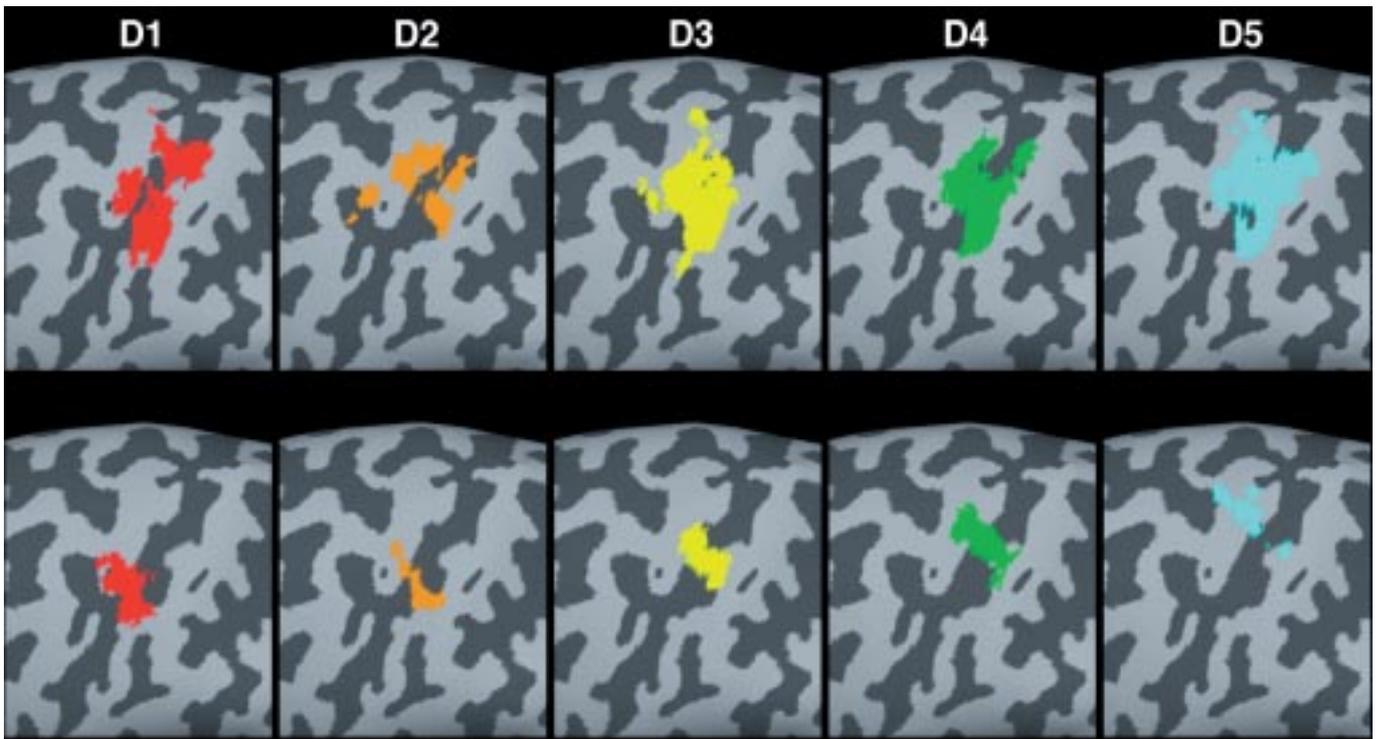
Für die MRT werden räumlich unterscheidbare Wassersignale durch magnetische Zusatzfelder erzeugt. Aus einer Vielzahl von Einzelmessungen mit veränderten Ortskodierungen lassen sich anschließend zwei- oder dreidimensionale Bilder des Gewebes errechnen. Die Kontraste in den MRT-Bildern, etwa zwischen weißer Hirnsubstanz (Verbindungen von Nervenfasern) und grauer Hirnsubstanz (Hirnrinde aus den Nervenzellkörpern), entstehen durch Unterschiede in der Beweglichkeit des Wassers in den einzelnen Gewebesorten. Wird das starke Wassersignal technisch unterdrückt, so erscheinen erheblich schwächere Radiowellen mit geringfügig anderen Frequenzen. Sie repräsentieren Protonensignale verschiedener chemischer Verbindungen in den Zellen und ergeben Informationen über die chemische Zusammensetzung des Hirngewebes. Die Nutzung dieser Muster für eine Charakterisierung des Hirnstoffwechsels nennt man *Magnetresonanz-Spektroskopie (MRS)*.

Jens Frahm

tion von Farben, Formen und Bewegungen, die Synthese der Informationen zum räumlichen Sehen, die kategoriale Einstufung von Objekten (Gegenstände oder Lebewesen) oder das Erkennen von Gesichtern. Aktuelle Fragen betreffen daher zunehmend die Interaktion der Verarbeitung eingehender kortikaler Reize mit bereits im Gehirn gespeicherten Gedächtnisinhalten und Modulationen durch Aufmerksamkeitsprozesse, die das scheinbar objektive »Sehen« in unser kortikales »Wahrnehmen« übersetzen.

Der zunehmende Grad an vernetzter Informationsverarbeitung bei kognitiven oder emotionalen Prozessen erfordert nicht nur eine Berücksichtigung aller denkbaren Rahmenbedingungen bei der Realisierung der Aufgabenstellung durch die Versuchsperson, sondern behindert oftmals auch eine einfache Interpretation der Aktivierungskarten. Diese Komplexität erfordert daher erhebliche Sorgfalt bei der Umsetzung einer bestimmten wissenschaftlichen Fragestellung in ein Untersuchungsparadigma. Ein eindrucksvolles Beispiel für die Bedeutung der genauen Wahl des Paradigmas ist die scheinbar einfache Fragestellung nach der Fein-Organisation des motorischen Handareals. Während es seit langem bekannt ist, dass die einzelnen Gliedmassen des Körpers auf der Bewegungsrinde der jeweils kontralateralen Hirnhälfte entlang der seitlichen Zentralfurche (Abb. 6, oben) funktionell getrennt sind, wurde die Existenz einer entsprechenden »Somatotopie« für die kortikalen Repräsentationen einzelner Fingerbewegungen innerhalb des Handareals bis vor kurzem kontrovers behandelt.

Da eine Betrachtung der durch die verschiedenen Fingerbewegungen ausgelösten Aktivierungen in den vielen gemessenen Schichtbildern sehr unübersichtlich ist, empfiehlt es sich, eine flache Karte der etwa zwei bis vier



Millimeter starken Hirnoberfläche aus grauer Hirnsubstanz zu rekonstruieren, die durch mathematisches »Aufblasen« der dreidimensional gekrümmten Rindenareale errechnet wird (Abb. 6, unten). Die Übertragung der einzelnen Aktivierungskarten erlaubt dann eine zusammenhängende Bewertung der Fingerbewegungen im Handareal entlang der Zentralfurche (Abb. 7). Der Vergleich der Repräsentationen vom Daumen (D1) bis zum kleinen Finger (D5) zeigt eine nahezu vollständige Überlappung, wenn die Bewegung eines einzelnen Fingers mit Ruhe verglichen wird: Mit anderen Worten, wenn das Untersuchungsparadigma nach allen Gebieten einer Fingerkodierung fragt (Abb. 7, oben). Dagegen lässt sich eine klare somatotopische Anordnung der Finger nachweisen, wenn die Bewegung eines einzelnen Fingers mit der Bewegung eines anderen Fingers verglichen wird: Wenn also alternativ die Frage gestellt wird, wo die Repräsentation eines Fingers gegenüber derjenigen eines anderen Fingers dominiert. Auf die-

se Weise wandern die Gebiete der jeweils stärksten Repräsentation vom unteren Ende des Handareals für den Daumen bis zum oberen Ende für den kleinen Finger (Abb. 7, unten).

Diese funktionelle Somatotopie lässt sich evolutionsbiologisch sehr plausibel deuten, da unsere Hände sowohl gemeinsame Aktivitäten der Finger wie das Greifen ermöglichen – also eine Überlappung von Nervenzellen begünstigen, die für einzelne Finger kodieren – als auch eine Befähigung zu Einzelfingerbewegungen aufweisen etwa beim Spielen eines Musikinstrumentes. Interessanterweise wird im Handareal der sensorischen Hirnrinde bei gleicher Reihenfolge eine klassisch getrennte Somatotopie des Fühlens einzelner Finger aufrechterhalten.

Insgesamt wendet sich die funktionelle MRT des Gehirns zunehmend der Erforschung höherer kognitiver Prozesse wie Aufmerksamkeit, Lernen, Gedächtnis und Bewusstsein zu. Dass dazu allerdings weiter verfeinerte Paradigmen zur Definition und Kon-

trolle objektivierbarer Gehirnleistungen erforderlich sind, sollte trotz aller faszinierenden Ausblicke nicht außer Acht gelassen werden.

Göttinger Perspektiven

Grundsätzliche Bedeutung erwächst den bildgebenden Verfahren aus der Erkenntnis, dass sich spezifische Leistungen des Gehirns nicht allein aus molekularen oder zellbiologischen Kenntnissen ableiten lassen, sondern Untersuchungen des Gesamtsystems erfordern. Ein besonderer Vorteil der nichtinvasiven MRT besteht daher in der Möglichkeit, Untersuchungen am Menschen durch Studien am Tier zu ergänzen. Umgekehrt sollten auf diese Weise frühzeitig neurogenetische Erkenntnisse an Mausmodellen oder neue therapeutische Ansätze für den Menschen nutzbar gemacht werden. Eine enge Verknüpfung neurowissenschaftlicher Ansätze und klinischer Fragestellungen wird in Göttingen durch das DFG Forschungszentrum Molekularphysiologie des Gehirns (CMPB) und das Zentrum

Abb. 7
Repräsentationen von Fingerbewegungen (D1 = Daumen bis D5 = kleiner Finger) im Handareal der motorischen Hirnrinde (Zentralfurche in Abb. 6). Die Überlappung der Repräsentationen einzelner Finger bei einer Messung gegen Ruhe (oben) zeigt bei einem direkten Vergleich von Fingerbewegungen untereinander eine geordnete Reihung einzelner funktioneller Fingerdominanzen (unten).

für Neurobiologie des Verhaltens (ZNV) hergestellt.

Medizinische Fortschritte durch verbesserte Einsichten in neurologische und psychiatrische Erkrankungen sollen durch ein Gemeinschaftsprojekt der Max-Planck-Gesellschaft mit dem Bereich Humanmedizin erreicht werden, das mit nachhaltiger Unterstützung durch das Land Niedersachsen zur Zeit seine Arbeit an der Universität Göttingen aufnimmt. Es sieht eine Forschergruppe mit eigenem MRT-System vor, die in Zusammenarbeit mit klinischen Einrichtungen die neuen Möglichkeiten der MRT des Gehirns für die patientenorientierte Forschung weiterentwickeln wird. ◀

Literatur

Frahm J., Hanefeld F. (1997) Localized proton magnetic resonance spectroscopy of brain disorders in childhood. In: *Magnetic Resonance Spectroscopy and Imaging in Neurochemistry*¹¹ (H.S. Bachelard, Hrsg), Plenum, New York, 329-402.

Frahm J., Hänicke W. (1998) Rapid scan techniques. In: *Magnetic Resonance Imaging*¹¹ (D.D. Stark, W.G. Bradley, Hrsg), Mosby, St. Louis, 87-124.

Frahm J., Fransson P., Krüger G. (1999) Magnetic resonance imaging of human brain function. In: *Modern Techniques in Neuroscience Research* (U. Windhorst, H. Johansson, Hrsg), Springer, Berlin, 1055-1082.

Frahm J. (2000) Zur materiellen Organisation menschlichen Denkens: Magnetresonanztomografie des Gehirns. In: *Das Gehirn und sein Geist* (N. Elsner, G. Lüer, Hrsg), Wallstein, Göttingen, 53-70.

Wilken B, Dechent P, Herms J, Maxton C, Markakis E, Hanefeld F, Frahm J. (2000) Quantitative proton magnetic resonance spectroscopy of focal brain lesions. *Pediatr Neurol* 23:22-31.

Dechent P, Frahm J. (2003) Functional somatotopy of finger representations in human primary motor cortex. *Hum Brain Mapp* 18:272-283.



Prof. Dr. Jens Frahm, Jahrgang 1951, studierte Physik an der Universität Göttingen und wurde 1977 promoviert. Er habilitierte sich 1993 im Fach Physikalische Chemie und wurde 1997 an der Universität Göttingen zum außerplanmäßigen Professor ernannt. Seit 1992 ist Prof. Frahm wissenschaftlicher Leiter und Geschäftsführer der Biomedizinischen NMR Forschungs GmbH am MPI für biophysikalische Chemie. Er ist stellvertretender Sprecher des Zentrums für Neurobiologie des Verhaltens (ZNV) sowie Mitglied des DFG Forschungszentrums Molekularphysiologie des Gehirns (CMPB), des Europäischen Graduiertenkollegs »Neuroplasticity: From Molecules to Systems« und des Instituts für Multiple Sklerose-Forschung. Prof. Frahm ist Mit-Initiator des Gemeinschaftsprojektes der Max-Planck-Gesellschaft mit der Universität Göttingen zur patientenorientierten Forschung in der Neurologie und Psychiatrie mittels MRT-Verfahren.

Noninvasive imaging methods yield novel insights into the structure and function of the human brain. This particularly applies to magnetic resonance imaging (MRI) which nowadays has emerged as the central modality for diagnostic imaging in medicine. The considerable technical flexibility and versatility of MRI offers a wide range of questions in both basic and clinical neuroscience. In addition to morphologic imaging at high spatial resolution and with excellent soft-tissue contrast, specific applications provide access to the cerebral vascularization or the chemical and cellular composition of

the tissue. Recent advances in functional brain mapping link dynamic MRI signal changes via altered cerebral hemodynamics to switches between different states of neural activity. The approach allows for a most fascinating visualization of the cortical networks underlying cognitive information processing in the conscious human brain. Apart from mapping the neurofunctional organization across and within cortical systems, this unique access to normal and aberrant brain function is also expected to improve the diagnosis and management of neurologic and psychiatric disorders.



Faszination des Genies – Das Gehirn des greisen Gelehrten

Magnetresonanz-Tomografie am Gehirn von Carl Friedrich Gauß

(red.) Im Alter von fast 78 Jahren verstarb der erste Direktor der Göttinger Universitätssternwarte, Carl Friedrich Gauß, am 23. Februar 1855 nachts um ein Uhr und zwei Minuten in seiner Dienstwohnung in der 1813 erbauten Sternwarte. Er galt den Menschen seiner Zeit als einmaliges mathematisches Genie, und so wurde einen Tag später, am Vormittag des 24. Februar, die Leiche seziiert, sein Gehirn entnommen und ein Gipsabdruck der Schädelinnenseite angefertigt. Nach der Entnahme wurde das Organ gewogen und in einem Glasgefäß präpariert, das dann im Institut für Physiologie der Göttinger Universität aufbewahrt wurde. Künftige Wissenschaftlergenerationen sollten mit den damals scheinbar unbegrenzt anwachsenden Möglichkeiten der modernen Naturwissenschaften dereinst die anatomische Beschaffenheit und den Ort von Genialität am Gehirn des greisen Gelehrten erforschen können.

Anschließend wurde der Leichnam in der Sternwarte aufgebahrt, bevor der als einer der größten Mathematiker der Geschichte geltende Gauß auf dem Göttinger Albani-Friedhof beerdigt wurde. Seine fundamentalen Untersuchungen zur Zahlentheorie und zur Berechnung astronomischer Bahnen hatten den 1777 geborenen Carl Friedrich Gauß bereits berühmt gemacht, bevor er 1807 als Professor an die Georgia Augusta nach Göttingen

berufen wurde. Die königlich-hannoversche Regierung hatte an dem Gelehrten vor allem deshalb Interesse, weil er die Durchführung der Landvermessung in Norddeutschland sicherstellen sollte. In Göttingen erfindet Gauß zusammen mit Wilhelm Weber den elektromagnetischen Telegraphen, den die beiden Wissenschaftler zum innerstädtischen Austausch von Informationen einsetzten und der die modernen Kommunikationstechnologien begründete.

Das Gauß'sche Gehirn wurde 1977 in den Neubau des Universitätsklinikums überführt und wird dort seit 1995 in den Räumen des Instituts für Ethik und Geschichte der Medizin zusammen mit anderen Gehirnen des 19. Jahrhunderts aufbewahrt. Wegen des abgesunkenen Formalin-Spiegels im Gauß-Präparat wurde 1998 eine Neupräparation notwendig. Diese Gelegenheit sollte genutzt werden, mit modernen Verfahren mehr über das Gehirn zu erfahren: Ziel war dabei ausdrücklich nicht, die Fragen des 19. Jahrhunderts zur Genialität des Mathematikers zu lösen. Vielmehr sollte mit einer Analyse des Gehirns durch die hochmoderne bildgebende Magnetresonanz-Tomografie (MRT) die anatomischen Strukturen des Gehirns im Detail abgebildet und pathologische Abweichungen festgestellt werden, ohne dass bei dieser Methode der Untersuchungsgegenstand beschädigt wird. Die Ergebnisse

werden als digitale Bilddaten geliefert, die anschließend fast unbegrenzt archiviert und verlustfrei kopiert werden können. Bei diesen Untersuchungen waren sogar Gauß'sche Lehrsätze der Mathematik beteiligt, denn die magnetische Kraftflussdichte des MR-Tomographen wird in »Gauss« angegeben.

Prof. Dr. Jens Frahm vom Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie unterzog das historische Organ-Präparat insgesamt acht verschiedenen MRT-Untersuchungen und erhielt 526 Aufnahmen und Datensätze, die anschließend von einem Mediziner ärztlich begutachtet wurden. Demnach zeigte das Gehirn des greisen Gelehrten keine Anzeichen neurodegenerativer Erkrankungen wie sie beispielsweise bei der Alzheimerschen Krankheit oder bei Verkalkungen in MRT-Bildern charakteristisch sichtbar sind. Diese Befunde belegen die Ausführungen seiner Zeitgenossen, nach denen Gauß bis ins hohe Alter an keinen Demenzen litt und bis zuletzt geistig vollkommen gesund war.

Die ausführliche Beschreibung der MRT-Untersuchungen am Gehirn von Carl Friedrich Gauß können nachgelesen werden in den Mitteilungen der Gauss-Gesellschaft, Nr. 36, Seite 9 bis 19 (1999), »Magnetresonanz-Tomografie des Gehirns von Carl Friedrich Gauß« von Axel D. Wittmann, Jens Frahm und Wolfgang Hänicke.