In die **Röhre** geguckt

Die Entwicklung der Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) ist eine Erfolgsgeschichte der Grundlagenforschung. Aus der medizinischen Diagnostik ist die MRT heute nicht mehr wegzudenken. Aber diese Forschung hat Zeit gebraucht – mehr als ein halbes Jahrhundert ist vergangen, seit Physiker ihre ersten Untersuchungen zur so genannten Kernspinresonanz starteten. Mit einem neuen methodischen Ansatz ist es **Nikos K. Logothetis** *und seinen Mitarbeitern vom* **Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik** *in Tübingen gelungen, das Verständnis für die Grundlagen der funktionellen MRT maßgeblich zu erweitern und damit die kognitive Neurobiologie voranzutreiben.*

Patient im Innern eines Tomographen.

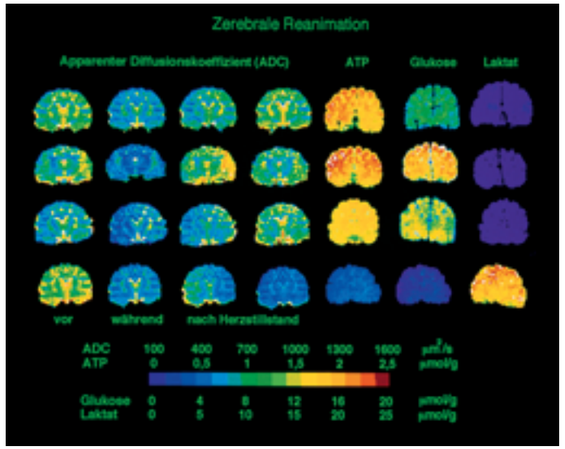
Foto: Okapia, München

Der Rettungswagen erreicht mit Blaulicht das Krankenhaus. Jetzt muss alles sehr schnell gehen. Der Patient wird mit Symptomen für Schlaganfall eingewiesen. Innerhalb kürzester Zeit müssen die Ärzte eine Diagnose stellen. Eine der dringendsten Fragen: Welche Teile des Gehirns sind von der Mangeldurchblutung oder der Blutung geschädigt worden? Anhand dieses Befunds werden erste Rehabilitationsmaßnahmen eingeleitet. Für die Diagnose steht den Ärzten heute an einer wachsenden Zahl von Krankenhäusern die fMRT, die „funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie“, zur Verfügung. Innerhalb weniger Minuten liefert sie den Medizinern Informationen darüber, ob der Patient einen Schlaganfall erlitten hat und welche Hirnregion betroffen ist.

Die Möglichkeiten der fMRT können gar nicht hoch genug eingeschätzt werden: Je schneller die Ärzte reagieren, umso größer ist der Anteil des Gehirns, den sie retten können. Der Schlaganfall ist nach Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs die dritthäufigste Todesursache in den westlichen Industrieländern. Pro Jahr erleiden in Deutschland schätzungsweise 250.000 Menschen einen Schlaganfall. Etwa zehn Prozent der Betroffenen sind jünger als 40 Jahre. Was noch viel schwerer wiegt: Der Schlaganfall ist eine der Hauptursachen für ernsthafte Behinderungen; in Deutschland leidet jeder vierte Behinderte an den Folgen eines Schlaganfalls. Mehr als eine Million Menschen, die einen Schlaganfall überlebt haben, sind berufsunfähig oder nicht mehr in der Lage, sich selbst zu versorgen.

Der große Vorteil der fMRT liegt darin, dass sie keine größeren Eingriffe in den Organismus erfordert. Die Mediziner sprechen deshalb von einer nicht-invasiven Methode. Elektromagnetische Wellen wirken hierbei auf den menschlichen Körper ein. Obwohl das von fMRT-Geräten erzeugte Magnetfeld eine sehr hohe Feldstärke aufweist – es ist etwa eine Million mal so groß wie das natürliche Magnetfeld der Erde – können

Schädigungen nach dem derzeitigen Kenntnisstand ausgeschlossen werden. Das physikalische Phänomen, das der fMRT zu Grunde liegt, ist die so genannte Kernspinresonanz. Der Weg zu ihrer Entdeckung ist von zahlreichen Nobelpreisen begleitet, und er beginnt bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit der Beschreibung der Eigenschaften von Atomen: Planck, Rutherford, Bohr, Schrödinger und Heisenberg sind die Namen der Physiker, die das Atommodell entworfen und damit das Fundament für eine der erfolgreichsten Entwicklungen in der Grundlagenforschung bereitet haben.



Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für neurologische Forschung in Köln haben MR-tomographische und spektroskopische Verfahren im Tierversuch getestet. Dazu haben sie bei vier verschiedenen Versuchstieren einen 15-minütigen Herzstillstand ausgelöst und die Wiederbelebung des Gehirns verfolgt. Die bildliche Darstellung erlaubt Aussagen über den Schädigungsgrad des Gehirns sowie eine genaue Analyse des Erholungsverlaufs. Bei der vorliegenden MR-Bildgebungsmethode werden die Durchblutungsänderungen des aktivierten Hirnareals dargestellt. Die oberen drei Reihen sind Beispiele für erfolgreiche und die unterste Reihe für eine nicht erfolgreiche Reanimation. Der Vergleich mit den Konzentrationsbildern von ATP, Glucose und Laktat zeigt, dass die MR-Bilder tatsächlich eng mit den biochemischen Veränderungen verknüpft sind. Auf der Basis solcher Untersuchungen ist es möglich, den Verlauf eines Hirninfarktes sowie den Erfolg verschiedener therapeutischer Maßnahmen zu dokumentieren.

Magnetische Momente

Im Jahr 1929 untersuchen Isaac Isidor Rabi und seine Mitarbeiter an der Columbia University in den USA die magnetischen Eigenschaften von Atomen und Molekülen. Die Physiker wissen zu diesem Zeitpunkt, dass der Atomkern aus zwei Arten von Partikeln besteht: positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen. Um den Kern herum bewegen sich die negativ geladenen Elektronen. Alle diese Partikel besitzen einen „Spin“ oder Eigendrehimpuls, das heißt, sie drehen sich wie ein kleiner Kreisel um ihre eigene Achse und erzeugen dabei ein magnetisches Moment. Ohne ein äußeres Magnetfeld sind die Drehachsen willkürlich verteilt, so dass sich die Magnetisierung gegenseitig ausgleicht. Bringt man einen Atomkern jedoch in ein äußeres Magnetfeld, so richtet sich das magnetische Moment des Kerns in diesem Feld aus – wie das Dipolmoment eines kleinen Stabmagneten mit Nord- und Südpol. Die Ausrichtung kann parallel oder antiparallel zum äußeren magnetischen Feld erfolgen, wobei die parallele Ausrichtung mit einem niedrigen, die antiparallele mit einem höheren Energieniveau einhergeht.

Rabi und seine Mitarbeiter wollen jene Bedingungen finden, unter denen es möglich ist, das magnetische Moment eines Atomkerns und somit seine Ausrichtung umzukehren. Es gelingt ihnen Ende der dreißiger Jahre, indem sie einen Strahl von Lithiumchlorid-Molekülen durch ein magnetisches Feld schicken und dabei Radiowellen aussetzen. Bei einer bestimmten Frequenz, der so genannten Resonanzfrequenz, liefern die Radiowellen genau die Energie, die die Kerne benötigen, um auf ein höheres Energieniveau zu springen und sich im Magnetfeld neu auszurichten. Die dabei auftretende Schwächung der Radiowellen liefert den Wissenschaftlern das Messsignal. Rabi hat damit einen Weg gefunden, um diesen Übergang nachzuweisen. Die neue Technik bezeichnen die Forscher als „molecular beam magnetic resonance“. Rabis Arbeitsgruppe setzt diese Technik vor allem ein, um noch völlig unbekannte Details über die Wechselwirkungen von Molekülen herauszufinden. Die Forscher können jetzt quasi „sehen“, wie individuelle Atome aneinander binden und wie ihre Kerne durch benachbarte Atome beeinflusst werden. Im Jahr 1944 erhält Rabi dafür den Nobelpreis für Physik.

Einfach Wasserstoff

Nach dem Zweiten Weltkrieg suchen unabhängig voneinander die Physiker Edward Purcell an der Harvard University und Felix Bloch an der Stanford University nach einer Vereinfachung der Methode, um die Kernspinresonanz auch in Flüssigkeiten und Festkörpern messen zu können. Beide Wissenschaftler entscheiden sich für die Untersuchung des Wasserstoffs, zum einen, weil es der einfachste Atomkern mit Spin ist, und zum anderen, weil er im menschlichen Körper am häufigsten vorkommt (der Körper besteht zu 70 Prozent aus Wasser, in jedem Tropfen Wasser befinden sich etwa 10^{24} Wasserstoffkerne).

Nahezu zeitgleich gelingt es den Forschergruppen, jene Bedingungen zu erzeugen, bei denen magnetische Resonanz eintritt. Ihre Experimente liefern das Verständnis für die heute als NMR-Spektroskopie bekannte Methode. Damit wird es unter anderem möglich, „Relaxationszeiten“ zu messen, also jene Zeitspanne, die ein System benötigt, um in den Gleichgewichtszustand zurückzukehren – und zwar im Bereich von Sekunden oder Bruchteilen von Sekunden. Purcell und Bloch werden 1952 ebenfalls mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet.

Wurde die Kernspinresonanz in den frühen fünfziger Jahren vorerst als physikalische Methode verstanden, mit der sich die magnetischen Eigenschaften von Kernen messen lassen, so führte die Beobachtung, dass das NMR-Signal von der chemischen Umgebung beeinflusst wird, zu einer geradezu explosionsartigen Verbreitung. Die chemische Umgebung der Atomkerne erzeugt nämlich eine Verschiebung der Resonanzfrequenz gegenüber dem freien Kern (bei gleicher Frequenz erfolgt die Resonanz des abgeschirmten Kerns bei höherem äußeren Magnetfeld). Diese „chemische Verschiebung“ ist eine charakteristische Größe für die unterschiedlichen Gruppen eines Moleküls. Sie kann dazu benutzt werden, um Substanzen zu charakterisieren.

Heute ist die NMR-Spektroskopie aus der chemischen Analyse nicht mehr wegzudenken, kein Industrie- oder Universitätslabor kommt ohne ein NMR-Gerät aus. Zu Beginn der sechziger Jahre ist die NMR-Technologie allerdings noch lange nicht ausgereift: Ein entscheidender Schritt nach vorne ist der Einsatz gepulster Radiowellen an Stelle einer einzelnen kontinuierlichen Welle. Der Puls enthält verschiedene Frequenzanteile. Dabei gilt: je kürzer die gepulste Radiowelle, desto breiter ihr Frequenzspektrum. Die Wissenschaftler müssen jetzt nicht mehr mühevoll Radiowellen verschiedener Wellenlänge testen, um die Resonanzfrequenz zu bestimmen. Die Pulstechnik wird zum Instrument der Wahl für Physiker und Chemiker bei der Untersuchung von Atomen und Molekülen. Nach wie vor ist die Auswertung des Messsignals jedoch außerordentlich zeitintensiv. Um den Prozess zu beschleunigen, bedarf es eines mathematischen Hilfswerkzeugs.

Ende der sechziger Jahre ist die Entwicklung des Computers soweit fortgeschritten, dass es möglich wird, die komplexen NMR-Spektren im Rahmen einer für den mathematischen Laien immer noch komplizierten Rechnung (Fourier-Transformation genannt) auszuwerten. Richard Ernst und Weston Anderson gelingt es, Pulstechnik und Rechen-Werkzeug erfolgreich miteinander zu kombinieren. Die neue Methode ist nicht nur tausendmal schneller als ihr Vorläufer, die Forscher können jetzt auch Signale beobachten, die nur noch ein Zehntel so groß sind. Für seinen Beitrag zur Weiterentwicklung der NMR-Spektroskopie erhält Richard Ernst im Jahr 1991 den Nobelpreis in Chemie.

Die Idee, die NMR als diagnostisches Instrument einzusetzen, taucht ebenfalls schon in den fünfziger Jahren auf. Aber es bedarf weiterer Entwicklungen, insbesondere in der Computertechnologie, bevor die Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT oder englisch MRI für „magnet resonance imaging“) Realität wird: Im Jahr 1971 verbindet der britische Ingenieur Godfrey Hounsfield ein Röntgengerät mit einem Computer und setzt diverse algebraische Verfahren ein, um einen Körper von verschiedenen Seiten optisch abzutasten und schließlich entsprechende Schnittbilder herzustellen. Er legt damit den Grundstein für die Computertomographie (CT). Knapp zwei Jahre später entwickelt der Chemiker Paul Lauterbur ein rechnerisches Verfahren, das es ermöglicht, mittels Kernspinresonanz Bilder zu erzeugen. Vorausgegangen waren Überlegungen, wie sich das registrierte NMR-Signal innerhalb einer Probe lokalisieren lässt. Wenn es gelänge, so Lauterbur, den Entstehungsort des Signals punktgenau festzulegen, dann ließe sich eine Art „Landkarte“ des Untersuchungsobjekts erstellen. In seinen Experimenten überlagert er daher das räumlich gleichförmige statische Magnetfeld mit einem zweiten, schwächeren Magnetfeld-Gradienten.

Ins Bild gesetzt

Da die Resonanzfrequenz der Atomkerne in einem äußeren magnetischen Feld proportional zur Stärke des Felds ist, liefert der Magnetfeld-Gradient für die verschiedenen Teile des Untersuchungsobjekts jeweils nur an einer Stelle die Resonanzbedingungen, so dass sich die Position der Moleküle festlegen und ein entsprechendes Bild konstruieren lässt (heute werden zur Erzeugung von MR-Bildern drei elektromagnetische Gradienten angelegt). Es bleibt dem Engländer Peter Mansfield und seinen Kollegen vorbehalten, 1976 das erste NMR-Bild eines menschlichen Körperteils zu veröffentlichen: eines Fingers, bei dem sowohl Knochen und Nerven als auch Arterien sichtbar werden.

Gespannter Zustand

Was passiert nun unter den eben beschriebenen Bedingungen? Wenn man einen Patienten in das starke Magnetfeld eines Kernspin- oder Magnet-Resonanz-Tomographen hineinfährt, richten sich die vielen kleinen „Wasserstoffmagnete“ im Körper teilweise aus. Diese Ordnung der ausgerichteten Teilchenmagnete wird jetzt durch einen hochfrequenten Magnetsender beeinflusst. Aufgrund dieser „Störung“ klappen die kleinen Teilchenmagnete aus ihrer geordneten Position heraus. Sie befinden sich jetzt in einem gespannten (energiereichen) Zustand, weil sie sich eigentlich wieder in dem großen Magnetfeld ausrichten wollen. In dem Moment, in dem die Störung abgeschaltet wird, begeben sich die Teilchenmagnete deshalb schnell wieder in ihre Ausgangslage, den energiearmen Zustand, zurück. Dabei geben sie eine bestimmte Energiemenge wieder ab. Diese entspricht einem Radiosignal bestimmter Wellenlänge (hierbei handelt es sich um die eingangs erwähnte Resonanzfrequenz). Durch „Spulen“ im MRT werden die Signale der Teilchenmagnete aufgefangen. Abhängig von der Anzahl und der näheren Umgebung der Teilchenmagnete ist das Signal stärker oder schwächer, das Zurückklappen dauert nur kurz (wenige Millisekunden) oder länger (wenige Sekunden). Der Patient merkt von alledem nichts. Anhand des gewebsspezifischen Verhaltens der Teilchenmagnete können Ärzte und Wissenschaftler im MR-Bild schließlich die Gewebe des menschlichen Körpers unterscheiden.

Heute liefert der Tomograph nicht nur Bilder aus dem Innern unseres Körpers, wobei jede nur denkbare Schnittebene möglich ist, sondern

Foto: MPI für biologische Kybernetik, Tübingen

erlaubt auch Aussagen über den Funktionszustand bestimmter Gewebe. Der Durchbruch für diese funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie, fMRT, gelang in den achtziger Jahren, als George Radda und seine Kollegen im englischen Oxford herausfanden, dass sich die MRT auch eignet, um Änderungen im Sauerstoffgehalt des Bluts nachzuweisen. Das Prinzip hinter dieser als BOLD (englisch: blood oxygen level dependent) bezeichneten Methode war bereits 40 Jahre zuvor von Linus Pauling und Charles D. Coryell beschrieben worden. 1936 legen sie eine Publikation vor, in der sie über die magnetischen Eigenschaften von Hämoglobin berichten, dem Sauerstoff transportierenden Pigment, das den roten Blutkörperchen ihre Farbe verleiht.

Rotes oder blaues Blut

Die beiden Chemiker hatten herausgefunden, dass sich die magnetische Empfindlichkeit von sauerstoffbeladenem arteriellen Blut um 20 Prozent von dem sauerstoff-freien venösen Blut unterscheidet. Im Jahr 1990 zeigt Seiji Ogawa von den At&T Bell Laboratories in Tierversuchsstudien, dass desoxygeniertes Hämoglobin im Gegensatz zu oxygeniertem Hämoglobin die Stärke des magnetischen Felds, dem es ausgesetzt wird, in seiner unmittelbaren Umgebung erhöht. Regionen, die also viel desoxygeniertes Hämoglobin enthalten, verändern das magnetische Feld um die Blutgefäße herum, und dies wiederum spiegelt sich im MR-Bild wider.

Was den Einsatz der fMRT anbelangt, gibt es mittlerweile einen regelrechten Boom – und zwar über den klinischen Bereich hinaus. Insbesondere in der neurobiologischen Forschung hat diese Technik den Wissenschaftlern neue Einblicke in das Gehirn verschafft. So ist das fMRT ein Instrument geworden, um die Entwicklung neuronaler Netzwerke für das Sehen, Sprechen und Hören zu untersuchen. Bis auf weniger als einen Millimeter genau können Forscher die Aktivitätsmuster im Gehirn studieren.

Beim Denken zugeschaut

Nach einer Phase der Euphorie macht sich unter den Wissenschaftlern allerdings Skepsis breit, wie aussagekräftig die „bunten Bilder“ wirklich sind. Mit der fMRT lassen sich zwar Unmengen von Daten produzieren, vielfach fehlt es aber an Hintergrundinformationen oder Grundlagen, um die Messwerte überhaupt richtig interpretieren zu können. So klafft eine große Lücke zwischen der räumlich aufgelösten Betrachtung der Hirnaktivität mittels fMRT und den vielen auf der Basis elektrophysiologischer Ableitungen am Tiermodell erlangten Erkenntnissen. Dies hatte bisher vor allem technische Ursachen: Dem zeitgleichen Einsatz beider Untersuchungsmethoden und damit dem Brückenschlag vom Tierversuch hin zu den am Menschen gewonnenen Befunden stand die Interferenz zwischen dem starken Magnetfeld des Tomographen und den an den Elektroden gemessenen Strömen im Weg.

Dieses Hindernis konnten Nikos Logothetis und seine Mitarbeiter vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen nun überwinden: Mithilfe von Spezialelektroden und einer aufwändigen Datenverarbeitung ist es ihnen nicht nur gelungen, zweifelsfrei nachzuweisen, dass mit der BOLD-fMRT tatsächlich Veränderungen der Neuronenaktivität gemessen werden; die Forscher haben darüber hinaus festgestellt, dass das BOLD-Signal vor allem den Eingang neuronaler Information in die jeweilige Hirnregion sowie ihre dortige Verarbeitung widerspiegelt und weniger die Ausgangssignale, die an andere Hirnregionen weitergegeben werden.

Mit ihrer neuartigen experimentellen Anordnung können die Tübinger Wissenschaftler verschiedene Aspekte neuronaler Aktivität untersuchen und auch zwischen den so genannten Aktionspotenzialen und lokalen Feldpotenzialen unterscheiden. Aktionspotenziale sind elektrische Impulse, die von einzelnen Neuronen oder einer relativ kleinen Gruppe von Neuronen stammen; es handelt sich um Alles-oder-Nichts-Signale, die nur auftreten, wenn der auslösende Reiz stark genug war. Im Wissenschaftlerjargon heißt es dann „die Neuronen feuern“. Die Aktionspotenziale spiegeln somit den Output, also das Ausgangssignal, wider. Registriert werden diese Signale von Ableitelektroden, die sich in unmittelbarer Nähe der Nervenzellen befinden. Die lokalen Feldpotenziale sind dagegen sich langsam verändernde elektrische Potenziale, die das Eingangssignal an den Synapsen und seine Weiterverarbeitung in einer größeren Neuronenpopulation wiedergeben.

Die Max-Planck-Forscher haben nun die Antworten auf einen optischen Reiz im visuellen Kortex von narkotisierten Affen zeitgleich mit diesen drei verschiedenen Methoden untersucht. Der Vergleich der Messreihen ergab, dass die fMRT-Daten signifikant mit den lokalen Feldpotenzialen und weniger mit den Einzelzell- und so genannten Multi-Unit-Ableitungen korrelieren. „Unsere Untersuchungen deuten darauf hin, dass Änderungen des Sauerstoffgehalts im Blut nicht unbedingt mit Ausgangssignalen, also dem ‚Feuern‘ der Neurone, einhergehen. Vielmehr sehen wir beim fMRT Änderungen des lokalen Feldpotenzials und damit das Einlaufen von Signalen aus anderen Hirnregionen und deren Prozessierung“, sagt Nikos Logothetis. Und: „Wir haben jetzt erstmals die Möglichkeit, zu verstehen, was einzelne Neurone tun und wie sie ihre Aufgabe im Kontext funktionsspezifischer neuronaler Netzwerke erfüllen.“

Kombinierter Scharfblick

Eine wichtige Erkenntnis aus den ersten experimentellen Untersuchungen der Tübinger ist, dass die BOLD-fMRT-Daten – wohl aufgrund der großen Variabilität der Gefäßreaktionen – einen viel kleineren Störabstand (Signal-Rausch-Verhältnis) haben als die elektrophysiologischen Ableitungen. „Dies hat zur Folge, dass bei der üblichen statistischen Auswertung menschlicher fMRT-Daten die Ausdehnung der neuronalen Aktivität im Gehirn unterschätzt wird“, so Logothetis. Anders ausgedrückt: Das Fehlen eines fMRT-Signals bedeutet also nicht unbedingt, dass in diesem Hirnbereich keine neuronale Informationsverarbeitung stattfindet – die elektrophysiologischen Messungen belehren uns eines Bessren. Und darauf werden sich auch die Kognitionswissenschaftler in Zukunft bei der Interpretation ihrer fMRT-Daten einstellen müssen.

Der größere Beitrag des lokalen Feldpotenzials zum fMRT-Signal ist übrigens auch konsistent mit Untersuchungen zu seinen bioenergetischen Grundlagen. Schon lange wissen die Forscher, dass die neuronale Aktivität und der energetische Stoffwechsel unmittelbar miteinander gekoppelt sind. Im Ruhezustand verbraucht das menschliche Gehirn 20 Prozent des Sauerstoffs im Körper, obwohl es weniger als zwei Prozent der Körpermasse ausmacht.

Ein kurzfristiger Anstieg der Hirnaktivität (und damit des Energiebedarfs) wird begleitet von einem gesteigerten Blutfluss (Erhöhung der Durchflussrate) und einem ebenfalls gesteigerten Glucosebedarf. Letzterer spiegelt offensichtlich die synaptische Aktivität wider. Untersuchungen mittels NMR-Spektroskopie haben nämlich gezeigt, dass sich 80 bis 90 Prozent des gesamten kortikalen Glucose-Verbrauchs beim Menschen auf den Energiebedarf so genannter glutamerger Neurone zurückführen lassen – Neurone also, die sich des Botenstoffs Glutamin bedienen. Deren Aktivität wiederum wird bei den Feldpotenzial-Messungen erfasst.

Die Geschichte der funktionellen Magnet-Resonanz-Tomographie ist noch lange nicht zu Ende geschrieben. Sicher ist jedoch eines: Die fMRT ist Ergebnis jahrzehntelanger Grundlagenforschung, sie wurde immer wieder stimuliert durch Forscher, die über den Tellerrand ihrer eigenen Disziplin hinausgeschaut haben, und sie wäre wohl nie im Rahmen bürokratischer Forschungsplanung entstanden.

Christina Beck

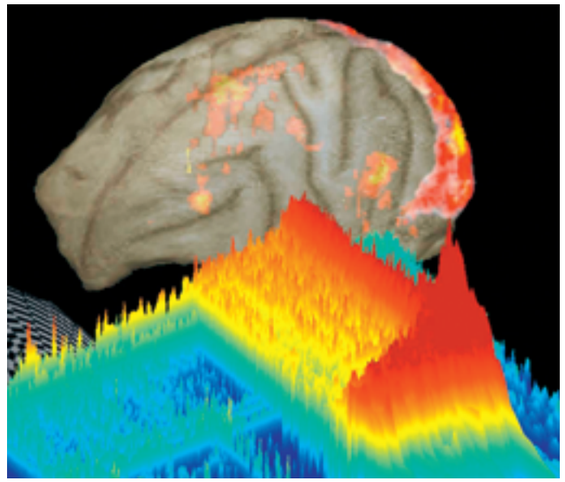


Foto: MPI für biologische Kybernetik

Ein Schachbrettmuster (links) als visueller Reiz löst Neuronenaktivität im Gehirn aus, die mit Einzelzellableitungen (vorne) bzw. funktioneller Magnet-Resonanz-Tomographie (hinten) aufgezeichnet wird. Um die verschiedenen Signale zeitgleich registrieren zu können, haben die Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für biologische Kybernetik eine ganz neuartige experimentelle Anordnung entwickelt. Damit ist es ihnen gelungen nachzuweisen, dass mit BOLD-fMRT tatsächlich Veränderungen der Neuronenaktivität gemessen werden. Das BOLD-Signal spiegelt danach vor allem den Eingang neuronaler Information in die jeweilige Hirnregion sowie ihre dortige Verarbeitung wider und weniger die Ausgangssignale, die an andere Hirnregionen weitergegeben werden.

1936

Linus Pauling und Charles D. Coryell entdecken, dass sich das magnetische Verhalten von Hämoglobin mit seinem Oxygenierungsstatus ändert.

1937

Isaac Isidor Rabi und seine Mitarbeiter entwickeln die Grundlagen der Kernspinresonanz, indem sie Lithiumchlorid-Moleküle durch ein Magnetfeld schicken und dabei Radiowellen aussetzen.

1945

Unabhängig voneinander gelingt es Felix Bloch und Edward Purcell, das Phänomen der Kernspinresonanz in Flüssigkeiten und Festkörpern nachzuweisen.

1964

Richard Ernst und Weston Anderson können durch Einsatz der so genannten Pulstechnik und der Fourier-Analyse die NMR-Technologie entscheidend vorantreiben.

1971

Godfrey Hounsfield baut den ersten Computer-Tomographen (CT) und legt damit den Grundstein für nahezu alle bildgebenden Verfahren, die heute zum Einsatz kommen.

1972

Paul Lauterbur verknüpft die CT-Entwicklung mit Überlegungen zur Lokalisierung des NMR-Signals; die Idee der Überlagerung mit einem Magnetfeld-Gradienten liefert die Grundbedingungen zur Erzeugung von Bildern mittels MRT.

1976

Peter Mansfield und seine Mitarbeiter veröffentlichen das erste mit einem MRT erzeugte Bild eines menschlichen Körperteils – eines Fingers.

1990

Seiji Ogawa entdeckt, dass sich gewebsspezifische Veränderungen im Sauerstoffgehalt im MR-Bild nachweisen lassen. Das so genannte BOLD-Verfahren ermöglicht somit eine Auswertung des Funktionszustands der Gewebe.

2001

Nikos K. Logothetis und seinen Mitarbeitern gelingt es mit einer neuartigen experimentellen Anordnung, zeitgleich elektrophysiologische Messwerte und fMRT-Daten aufzuzeichnen und damit die funktionsspezifischen Zusammenhänge aufzudecken.