

Radiologe 2013 · 53:584–591
 DOI 10.1007/s00117-013-2483-8
 Online publiziert: 21. Juni 2013
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

M. Garcia · C. Stippich

Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie,
 Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin, Universitätsspital Basel, Basel

Funktionelle Neuroanatomie: Sensomotorisches System

Dieser Artikel gibt einen orientierenden Überblick zum strukturellen Aufbau und zur Physiologie des motorischen und somatosensorischen Systems. Als klinische Anwendung wird der Einsatz der fMRT bei Patienten mit rolandischen Hirntumoren dargestellt.

Anatomische und funktionelle Grundlagen

Sensomotorisches System

Sensorische Afferenzen

Die Wahrnehmung von Reizen wird von Rezeptoren aufgenommen und über Afferenzen in das Hinterhorn des Rückenmarks weitergeleitet. Dort erfolgt die Umschaltung auf das 2. Neuron und Kreuzung zur Gegenseite. Die Umschaltung auf das 3. Neuron findet im Thalamus statt, von wo aus die Impulse v. a. zum primären somatosensiblen Kortex (S1) des Gyrus postcentralis weitergeleitet werden [1, 30].

Afferente somatosensible Bahnen im Rückenmark:

- Der *Funiculus posterior* (Hinterstrang) leitet Afferenzen für die propriozeptiven Empfindungen. Er unterteilt sich in einen medial gelegenen Fasciculus gracilis (für die untere Extremität) und einen lateral gelegenen Fasciculus cuneatus (für die obere Extremität, siehe z. B. [11], Abb. 10–17, p 240).
- Der *Tractus spinothalamicus anterior et lateralis* (Vorderseitenstrang) lei-

tet Afferenzen für taktile Empfindung sowie für Temperatur- und Schmerz-wahrnehmung zum Kortex (siehe z. B. [11], Abb. 10–20, p 244).

- *Tractus spinocerebellaris anterior et posterior*: Afferenzen der Tiefensensibilität erreichen nicht den Kortex, sondern das Kleinhirn, das dann hierüber den Muskeltonus und das Zusammenspiel zwischen Agonisten

und Antagonisten beeinflussen kann, (siehe z. B. [11], Abb. 10–21, p 246).

- *Weitere Afferenzen*: Tractus spinoreticularis, spinotectalis, spinoolivaris und spinovestibularis.

Motorische Efferenzen

Impulse für Willkürbewegungen werden v. a. im primären motorischen Kortex (M1) des Gyrus praecentralis generiert

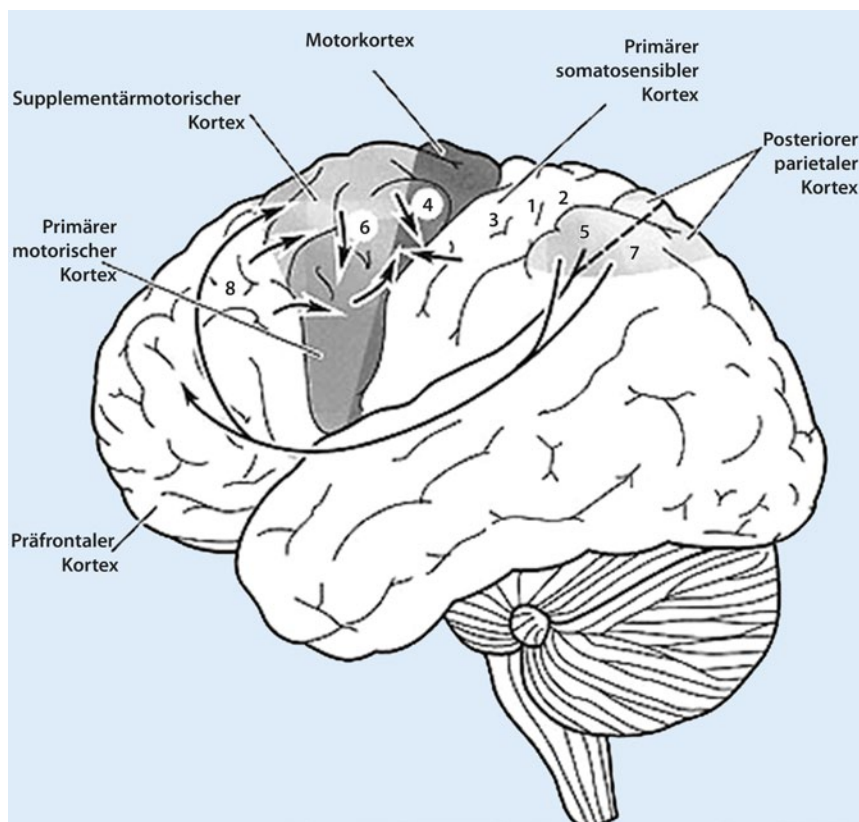


Abb. 1 ▲ Kortikales sensomotorisches Netzwerk mit entsprechenden Brodmann-Arealen. (Nach [23, 31])

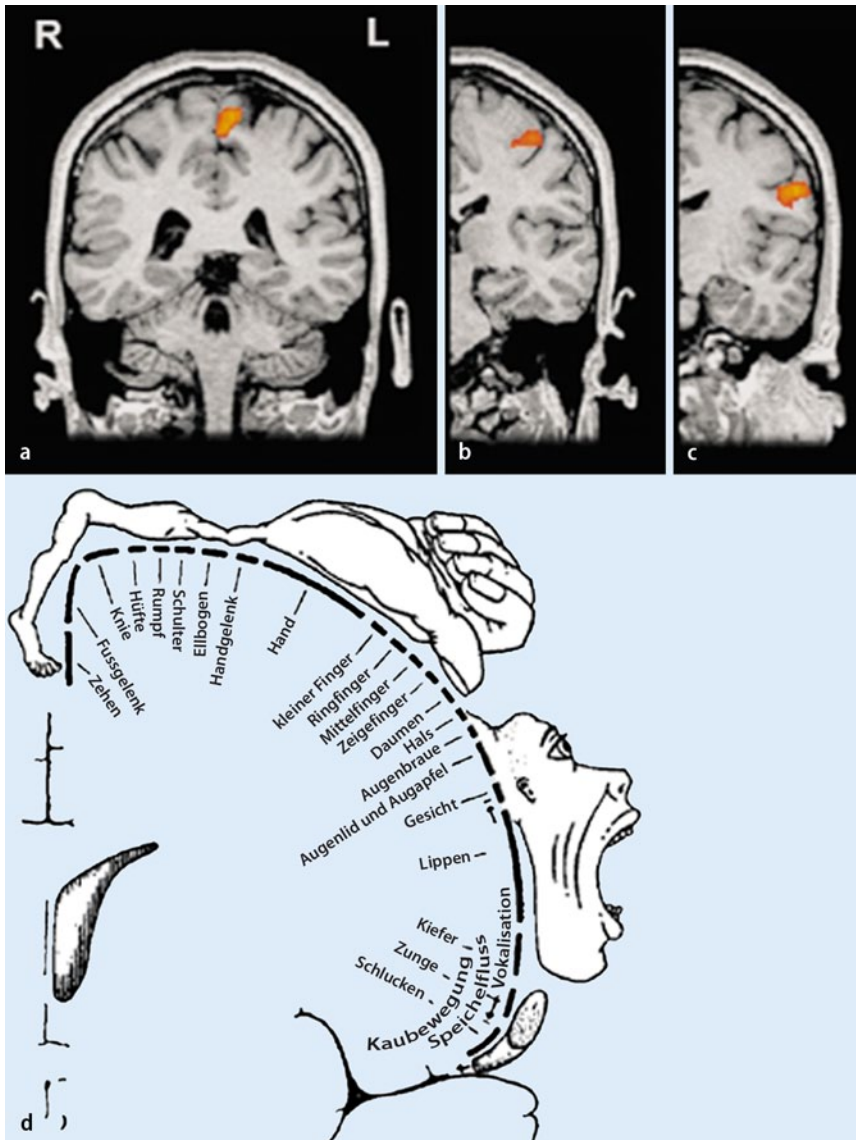


Abb. 2 ▲ **a** Somatotopes motorisches Mapping während aktiver Bewegung der Zehen, **b** Finger und **c** Zunge. **d** Motorischer Homunkulus. (**a–c** nach [23], **d** aus [32])

und erreichen über descendierende Bahnsysteme schließlich die Vorderhörner des Rückenmarks, wo sie auf das 2. Motoneuron umschalten. Hierbei unterliegen die motorischen Impulse komplexen Regelkreisen unter Beteiligung sekundärer Rindenfelder und subkortikaler motorischer Zentren in Stammganglien, Thalamus, Hirnstamm sowie des Kleinhirns. Über die segmentalen Vorderwurzeln des Rückenmarks und die Nervenplexus (zervikal und lumbosakral) erreichen die motorischen Impulse schließlich die motorische Endplatte der Skelett- und mimischen Muskulatur [1, 30].

Efferente motorische Bahnen im Rückenmark:

- **Tractus corticospinalis** (Pyramidenbahn): Der überwiegende Anteil efferenter motorischer Leitungsbahnen verläuft in der Pyramidenbahn, kreuzt in der Decussatio pyramidum/Medulla oblongata auf die Gegenseite (ca. 90%) und zieht als Tractus corticospinalis lateralis durch den Seitenstrang des Rückenmarks zu den α -Vorderhornzellen und γ -Motorzellen (siehe z. B. [11], . Abb. 18-6, p 453).
- **Tractus corticonuclearis** (*corticobulbaris*) und *corticomesencephalicus*.

Ein Teil der Pyramidenbahnfasern zieht zu den motorischen Hirnnervenkernen im Hirnstamm. Einige Efferenzen entspringen im frontalen Augenfeld (Areal 8) und erreichen die motorischen Augenervenkernkerne.

Zerebellum und tiefe graue Hirnnervenkernkerne:

- An der Steuerung der Motorik sind auch Fasern zwischen Kortex und Kleinhirn sowie vom Kortex zu den Basalganglien, zur Substantia nigra, zum Thalamus, zur Formatio reticularis und zum Tektum des Mesencephalon beteiligt [1].

Sensomotorische kortikale Areale

Organisation. Der somatosensible Kortex (Abb. 1) wird in primäre Rindenfelder (S1), sekundäre Rindenfelder (S2) und Assoziationsareale unterteilt. In S1 erfolgt die Wahrnehmung somatosensibler Reize von der Körperoberfläche und der Tiefensensibilität. In S2 wird die Information von S1 weiterverarbeitet, jedoch gelangen auch Zuflüsse direkt vom Thalamus nach S2, sodass somatosensible Impulse sowohl seriell als auch parallel verarbeitet werden können.

Der primäre Kortex (M1) ist der Ursprungsort aller Willkürbewegungen. Die sekundären Areale bestehen aus M2 (prämotorischer Kortex, PMA), dem supplementärmotorischen Kortex (SMA) und dem zingulären Kortex (CMA [30]).

Anatomisch sind Rindenfelder erster und höherer Ordnung oftmals benachbart. Zu Assoziationsfeldern werden auch lange Projektionsfasern rekrutiert. Zwischen den funktionellen Rindenfeldern bestehen meist reziproke intra- und interhemisphärische Verbindungen. Im sensorischen Assoziationskortex werden die im primären somatosensiblen Kortex wahrgenommenen Stimuli weiterverarbeitet [1].

Funktionelle Organisation, Topographie und Somatotopie.

Im somatosensiblen Kortex (S1) des Gyrus postcentralis liegen die zytoarchitektonisch definierten Brodmann-Areale (BA) 1, 2, und 3. Das Areal 3 wird in die Areale 3a und 3b unterteilt. In S1 enden überwiegend thalamische Afferenzen der kontralateralen Körperhälf-

te. S1 ist somatotop gegliedert, d. h., der menschliche Körper ist dort entsprechend der Rezeptordichte in der Peripherie in Form eines auf dem Kopf stehenden Homunkulus abgebildet. Vertexnah im Hemisphärenspalt an der Mantelkante ist die untere Extremität repräsentiert. Nach kaudal folgen entlang der Oberfläche der Konvexität die primär somatosensiblen Repräsentationen von Rumpf, Arm/Hand, Gesicht, Pharynx und Larynx. Gesicht und Hand nehmen im Verhältnis die größten kortikalen Repräsentationsflächen in S1 ein [1, 30].

Kaudal und ventral von S1, im unteren Parietallappen oberhalb der Inselzisterne, liegt der sekundäre somatosensible Kortex (S2), der thalamisches Input beider Körperhälften erhält. S2 weist ebenfalls eine gröbere Somatotopie auf [1, 30].

Der somatosensible Assoziationskortex (BA 5 und 7) liegt hinter S1 im Lobulus parietalis superior [1, 23, 30].

Der primäre motorische Kortex (M1, BA 4) im Gyrus praecentralis verläuft als letzte Hirnwindung des Frontallappens vor dem Zentralsulcus parallel zur postzentralen Windung von der Mantelkante bis zur lateralen Hemisphärenoberfläche und ist analog zu S1 somatotop organisiert (▣ **Abb. 2d**). Entsprechend der Komplexität der ausführbaren Bewegungen bzw. der Anzahl angesteuerter Muskeln nehmen die Hand mit den Fingern und das Gesicht die größten kortikalen Repräsentationsflächen in M1 ein, während der Rumpf nur wenig kortikale Projektionsfläche benötigt. Das motorische Handareal ist auch anatomisch eindeutig identifizierbar anhand einer nach hinten gerichteten Verdickung des Gyrus praecentralis, dem so genannten „Handknopf“. In der Tiefe des Zentralsulcus grenzt das hintere motorische Areal 4p [9] direkt an das somatosensible Areal 3b, welche hier auch direkt in Verbindung stehen.

Ventral des präzentralen Gyrus auf der lateralen Konvexität des dorsalen Frontallappens befindet sich der prämotorische Kortex (PMA), der in Richtung Mantelkante an den supplementärmotorischen Kortex (SMA) grenzt. Der SMA befindet sich überwiegend im hinteren Anteil des Gyrus frontalis superior rostral des Sulcus praecentralis und endet vom Hemisphärenspalt aus betrachtet oberhalb des Sul-

Radiologe 2013 · 53:584–591 DOI 10.1007/s00117-013-2483-8
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

M. Garcia · C. Stippich

Funktionelle Neuroanatomie: Sensomotorisches System

Zusammenfassung

Der sensomotorische Informationsfluss im Zentralnervensystem (ZNS) kann in 3 Schritte gegliedert werden: Wahrnehmung, Verarbeitung und Reaktion. Umweltreize werden über Rezeptoren in das ZNS geleitet. Die im somatosensiblen Kortex ankommenden Reize werden über eine komplexe Interaktion zwischen sensorischem und motorischem Kortex verarbeitet. Die motorische Reaktion auf den Umweltreiz wird dann vom Motor-kortex über Pyramidenbahn, Rückenmarksbahnen und motorische Nerven an den entsprechenden Muskel weitergeleitet.

Mit der funktionellen MRT (fMRT) ist es möglich, somatosensible und motorische Aktivierung in den verschiedenen beteiligten Hirngebieten zu untersuchen. Klinisch wird diese Information genutzt, um die räumliche Lagebeziehung zwischen Hirntumo-

ren und funktionell bedeutsamen Hirngebieten zu bestimmen und so ein individuell optimiertes therapeutisches Vorgehen zu ermöglichen, mit dem Ziel einer möglichst radikalen Tumorentfernung unter Erhalt motorischer und somatosensibler Funktionen. Weiter ist es möglich, pathologische Veränderungen in der Hirnaktivierung zu erfassen. In dieser Arbeit werden die funktionellen somatosensorischen und motorischen Systeme beschrieben und ein Einblick in das Potenzial der fMRT gegeben.

Schlüsselwörter

Zentralnervensystem · Motorisches System · Funktionelle MRT (fMRT) · Diffusionstensorbildgebung · Klinischer Einsatz

Functional neuroanatomy: sensorimotor system

Abstract

The sensorimotor flow of information can be divided in three steps: perception, processing and reaction. Environmental impulses are conducted through receptors to the central nervous system (CNS). The impulses arriving in the somatosensory cortex are processed through complex interactions between sensory and motor areas. The motor action in response to the environmental changes is transferred from the motor cortex via the pyramidal tract, spinal tracts and motor neurons to the respective muscles. With functional magnetic resonance imaging (fMRI) it is possible to assess somatosensory and motor activation in the different cortical areas involved. Clinically, this information is used to assess the local relationship between

brain tumors and functionally important areas. This is important to ensure an optimal individual therapeutic approach with the aim of an as radical as possible tumor resection with preservation of the motor and somatosensory functions. Furthermore, fMRI enables the evaluation of pathological changes of cerebral activation. This review describes the functional somatosensory and motor systems and gives an insight into the potential of fMRI.

Keywords

Central nervous system · Motor system · Functional magnetic resonance imaging (fMRI) · Diffusion tensor imaging · Clinical applications

cus cinguli. Auch bei PMA und SMA liegt eine grobe Somatotopie vor. Der SMA lässt sich in ein rostral gelegenes präsupplementärmotorisches Areal (prä-SMA) und in ein dorsal gelegenes „eigentliches“ supplementärmotorisches Areal (SMA proper) gliedern. PMA und SMA repräsentieren das Areal 6 nach Brodmann. Im Sulcus cinguli sind kaudal des prä-SMA das rostrale zingulär-motorische Areal (rCM) und kaudal des SMA proper das hintere zingulär-motorische Areal (cCM)

lokalisiert, die gemeinsam den zingulären motorischen Kortex bilden [1, 23, 30].

Sensomotorisches kortikales Netzwerk und Funktion.

Die primäre somatosensible Rinde ist für die Wahrnehmung von Temperatur- und Schmerzreizen sowie der Oberflächen- und Tiefensensibilität zuständig, überwiegend der kontralateralen Körperhälfte. Über den Balken bestehen zusätzlich reziproke interhemisphärische Verbindungen zu den entsprechenden Arealen der ipsilateralen Hirn-

hälfte (bei Stimulation der ipsilateralen Hemisphäre). Intrahemisphärisch sind S1 und M1 direkt verbunden, weiter bestehen Verbindungen zwischen S1 und SMA und von hier wiederum zu M1. Einige Faserbahnen ziehen zum präfrontalen Kortex.

Wenige somatosensible Afferenzen enden direkt im Gyrus praecentralis, so wie wenige motorische Efferenzen vom Gyrus postcentralis entspringen: Diese partielle Überlappung zwischen somatosensiblen Afferenzen und motorischen Efferenzen erklärt, wie somatosensible Reize direkt motorisch umgesetzt werden können [1].

Der somatosensible Assoziationskortex (BA 5 und 7) ist über Assoziationsfasern mit den primären Rindengebieten (BA 1, 2 und 3) sowie mit PMA und SMA verbunden [1, 8]. Er wird durch sensorische Reize und bei der Vorbereitung von Bewegungen aktiviert und erhält Zuflüsse aus dem visuellen, akustischen und vestibulären System. Über diese Regelkreise vermag der somatosensible Assoziationskortex kognitive Aufgaben der räumlichen Repräsentation [1, 30] und die räumliche Koordination von Bewegungsabläufen zu beeinflussen.

Im motorischen kortikalen Netzwerk stehen SMA, PMA und M1 reziprok miteinander in Verbindung, vorwiegend intrahemisphärisch, z. T. aber auch interhemisphärisch. Areal 4 (M1) steuert die primären motorischen efferenten Impulse der Willkürmotorik, die v. a. via Pyramidenbahn weitergeleitet werden und für schnelle und differenzierte Bewegungen der kontralateralen Körperhälfte verantwortlich sind. An der Planung und Initiierung einzelner Bewegungen sind zahlreiche Hirnareale beteiligt. Areal 4 erhält diverse Afferenzen von S1, SMA, PMA, Areal 8 (frontales Augenfeld) und direkt vom Thalamus [1, 30].

Für die Kontrolle größerer Bewegungen mehrerer Muskeln ist v. a. Areal 6 zuständig. Das Konstrukt für die Planung und Initiierung einer Bewegung findet im SMA statt, das den proximalen Anteil der peripheren Zielorgane beider Körperhälften beeinflusst [1, 30]. Das PMA beeinflusst v. a. die Motorik der proximalen Muskeln beider Körperhälften sowie die Generierung komplexerer Bewegungsabläufe [1, 30]. In der linken Hirnhälfte liegen unter dem lateralen Anteil des PMA

im Gyrus frontalis inferior die BA 44 und 45 (Broca-Sprachzentrum), die u. a. motorische Abläufe beim Sprechen steuern [1, 30].

Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

Methodik

Die konventionelle MRT ermöglicht es, Gehirn, Rückenmark und periphere Nerven strukturell sehr genau abzubilden und krankhafte Veränderungen detailliert zu erfassen. Neben der strukturellen Darstellung können mit Hilfe spezieller MR-Messverfahren aber auch weitere Eigenschaften untersucht werden. So können Stoffwechselprozesse mit der MR-Spektroskopie (MRS) untersucht werden, die Durchblutung mit verschiedenen MR-Perfusionstechniken (PWI) oder Faserbahnen und deren Verbindungen mit der Diffusionstensorbildgebung (DTI). Spezifische Funktionen des menschlichen Gehirns wie Sehen, Hören, Fühlen, Motorik, Sprache, Gedächtnis und weitere können mit der funktionellen MRT (fMRT) nicht-invasiv und ohne zusätzliche Belastung für die untersuchten Personen gemessen und bildlich dargestellt werden. Hierzu sind gezielte Reizapplikationen notwendig (Stimulationsstudien [19]), aber auch die Messung spontaner Hirnaktivierung ist möglich („resting-state fMRI“ [14]). Die Hirnfunktionen werden indirekt durch funktionsabhängige Veränderungen der lokalen Hämodynamik mit

der sog. Blood-oxygenation-level-dependent (BOLD)-Technik erfasst, bei der das Blut selbst als Kontrastmittel dient. Die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von oxygeniertem Hämoglobin (Oxy-Hb) und deoxygeniertem Hämoglobin (Deoxy-Hb) generieren den Bildkontrast: Im Gegensatz zum diamagnetischen Oxy-Hb ist Deoxy-Hb paramagnetisch und induziert lokale Feldinhomogenitäten, die zu einem Signalabfall auf susceptibilitätsgewichteten MR-Sequenzen (T2*) führen. Die neuronale Aktivität führt über zeitliche hämodynamische Veränderungen im stimulierten Areal letztlich zu einem Perfusionsanstieg mit einem Überangebot an sauerstoffreichem Blut in Kapillaren und Venen, verbunden mit einem Abfall von Deoxy-Hb und lokaler Feldinhomogenität, was zu einer Zunahme des BOLD-Signals führt [19, 23].

Während des somatotopen motorischen Mappings wird die untersuchte Person aufgefordert, bestimmte Bewegungen auszuführen, z. B. mit der Zunge, den Fingern oder den Zehen. Für die Darstellung somatosensibler Areale werden meist Berührungs- oder elektrische Reize manuell oder automatisch von außen appliziert.

Die in der fMRT messbaren BOLD-Signale auf einzelne Stimuli sind sehr gering und können deshalb nicht verlässlich detektiert werden. Daher ist es nötig, die Stimulation mehrfach zu wiederholen und schließlich eine gemittelte hämodynamische Antwort durch geeignete statistische Verfahren zu berechnen. Die sich hieraus ergebenden spezifischen funktio-

Hier steht eine Anzeige.

 Springer

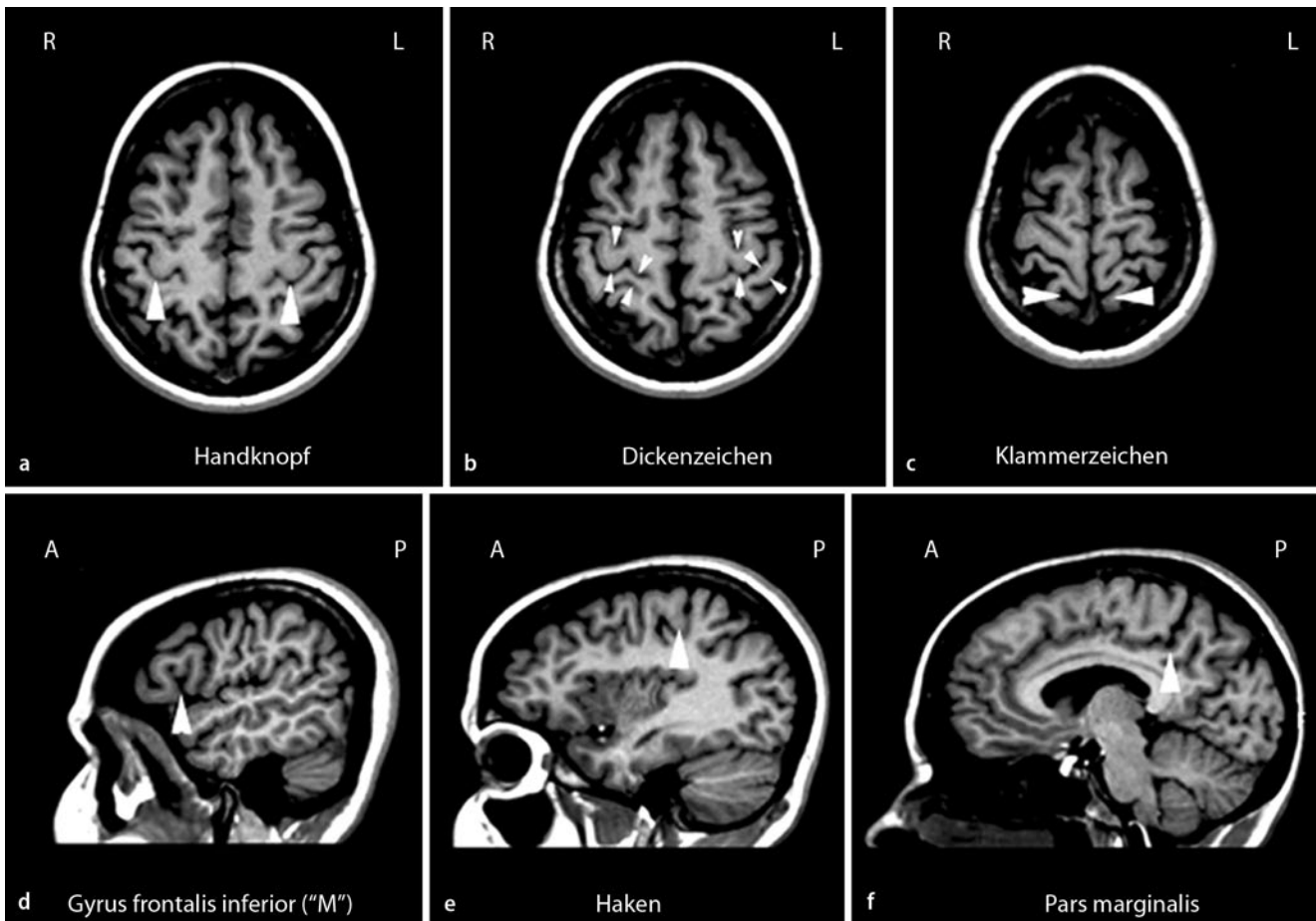


Abb. 3 ▲ Bildmorphologische Landmarken. Auf transversaler Ebene: Handknopf (a), Dickenzeichen (b), Klammerzeichen (c). Auf sagittaler Ebene: Gyrus frontalis inferior (d), präzentraler Haken (e), Pars marginalis (f). Die Pfeilspitzen markieren die Leitstrukturen. (Nach [23])

nellen MR-Messungen werden als Paradigmen bezeichnet. Für den klinischen Einsatz eignen sich besonders Paradigmen im sog. „block design“, in dem sich verschiedenen Phasen aus repetitiver Stimulation und Ruhe oder aus verschiedenen Stimulationsbedingungen alternierend wiederholen. Das „event-related design“ bietet zwar ein besseres zeitliches Auflösungsvermögen, ist jedoch komplizierter in der Durchführung und daher für den klinischen Einsatz weniger geeignet [6]. Für klinische Anwendungen wird zusätzlich zu den funktionellen Messungen ein hochaufgelöster anatomischer 3-D-Datensatz erhoben, auf den die funktionellen Bilder später überlagert werden, sodass die einzelnen funktionellen Aktivierungen bestimmten anatomischen Strukturen genau zugeordnet werden können. Das motorische Handareal ist das einzige definierte funktionel-

le Areal des menschlichen Kortex mit eindeutig erkennbarem strukturellem Korrelat, nämlich dem „Handknopf“ [29]. Alle anderen Hirnfunktionen können nicht anhand struktureller Landmarken zuverlässig lokalisiert werden.

Für die in diesem Beitrag behandelten motorischen und somatosensiblen Systeme ist die Identifikation der „Zentralregion“ bedeutsam, also des Gyrus praecentralis als Sitz des primären motorischen Kortex, des Gyrus postcentralis mit dem primären somatosensiblen Kortex und weiter die Darstellung der Pyramidenbahn.

Strukturelle Landmarken in der MRT

Voraussetzung für eine akkurate Interpretation funktioneller Areale ist die fundierte Kenntnis sog. anatomischer Landmar-

ken der Hirnoberfläche (■ **Abb. 3**; [18, 23]).

Strukturelle Landmarken auf transversalen Schnittbildern:

- **Handknopf:** entspricht einer in den Sulcus centralis sich vorwölbenden nach dorsal gerichteten Konvexität im Gyrus praecentralis, die ein-, zwei- oder dreibogig sein kann;
- **Dickenzeichen:** der Gyrus praecentralis ist „dicker“ als der Gyrus postcentralis;
- **Klammerzeichen:** entspricht einer imaginären Klammer über dem Hemisphärenspalt, gebildet durch die partes marginales beider Sulci cinguli an der Mantelkante.

Strukturelle Landmarken auf sagittalen Schnittbildern:

- **M-Zeichen:** der Gyrus frontalis inferior besteht aus den 3 Teilen Pars or-

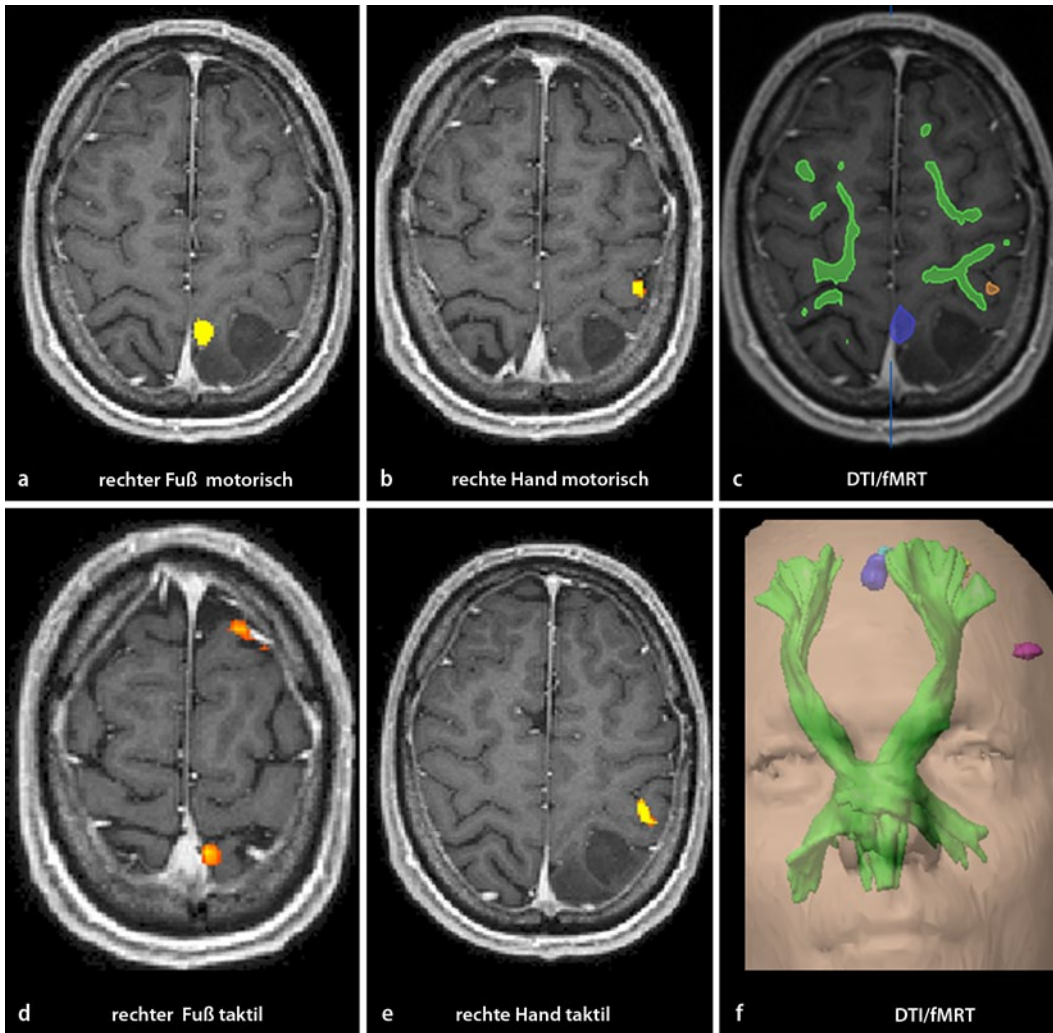


Abb. 4 ◀ fMRT und DTI bei einem Oligoastrozytom WHO°II links parietal. Somatotopes Mapping der motorischen und somatosensiblen Fuß- (**a, d**) und Handrepräsentationen (**b, e**). 3-D-Datensatz zur funktionellen Neuronavigation mit Darstellung der motorischen Repräsentationen von Fuß (*blau*), Hand (*rot*) und Zunge (*pink*) in Relation zum Tumor, DTI-Traktographie der Pyramidenbahn (*grün*; **c, f**). Erhaltene anatomische Landmarken. fMRT funktionelle Magnetresonanztomographie, DTI Diffusionstensorbildgebung

bitalis, triangularis und opercularis, die gemeinsam eine charakteristische „M-Form“ bilden; der untere Anteil des Sulcus praecentralis beginnt hinter der Pars opercularis und ascendiert vor dem Gyrus praecentralis;

- präzentraler Haken: ein charakteristischer, nach hinten gerichteter Haken des Gyrus praecentralis als anatomisches Korrelat des „Handknopfs“ in sagittaler Ebene;
- Pars-marginalis-Zeichen: Folgt man dem ascendierenden Teil des Sulcus cinguli dorsokraniel bis zur Mantelkante, erreicht man die Pars marginalis, davor liegt der Gyrus postcentralis.

Klinischer Einsatz

Eine besondere Bedeutung besitzt die fMRT in der prächirurgischen Visualisie-

rung der motorischen und sensorischen Funktionsareale sowie zur Darstellung der Sprach- und Gedächtnisfunktion bei Patienten mit Hirntumoren [23]. Das Ziel prächirurgischer motorischer und somatosensibler fMRT-Untersuchungen [23, 28] ist es, die verschiedenen kortikalen Repräsentationen des menschlichen Körpers in Relation zum Hirntumor abzubilden. Hierdurch kann das Risiko für mögliche Lähmungen oder Sensibilitätsausfälle durch Beschädigung des prä- bzw. postzentralen Gyrus während der Operation besser abgeschätzt werden. Funktionelle Landmarken können in Operationscomputer eingespielt werden und stehen dem Chirurgen während des Eingriffs als zusätzliche Orientierungspunkte zur Verfügung, um eine möglichst radikale aber funktionserhaltende Tumorchirurgie zu unterstützen. Die ergänzende Visualisierung der Pyramidenbahn mit der Diffu-

sionstensorbildgebung und Traktographie ist hier sehr hilfreich (▣ **Abb. 4c, f**; [2, 23]). Weiter ermöglicht die fMRT, tumorbedingte – sog. neuroplastische – Veränderungen in der Hirnfunktion zu erfassen [12, 24, 25, 26].

Prächirurgisches somatotopes Mapping

Das Mapping des Motorkortex mit der fMRT kann durch repetitive Bewegungen der Finger (Fingeropposition), der Hand (Faustschluss), Zehen (Zehenextension/-flexion) und/oder der Zunge (Auf- und Abbewegungen) erfolgen, mit denen die Lage der entsprechenden funktionellen Areale und der verschiedenen Körperrepräsentationen zur Läsion beurteilt werden kann (▣ **Abb. 2a, b, c**, ▣ **Abb. 4a, b**, ▣ **Abb. 5**; [18, 22]). Infolge der Faserkreuzung müssen die Bewegungen der Extremitäten in der zur Läsion kontralateral ge-

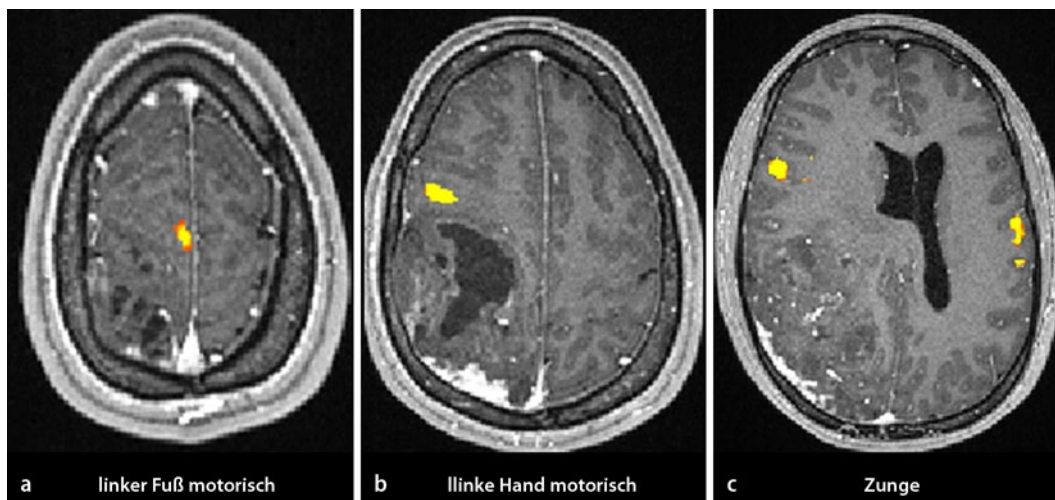


Abb. 5 ◀ fMRT bei höhergradigem Gliom rechts parietal. Somatotopes Mapping der motorischen Repräsentationen von Fuß (a), Hand (b) und Zunge (c). Anatomische Landmarken nicht sicher identifizierbar. fMRT funktionelle Magnetresonanztomographie

legen Körperhälfte ausgeführt werden. Auch SMA und PMA lassen sich durch Willkürbewegungen funktionell abbilden. Analog zum motorischen lässt sich auch der somatosensible Homunkulus funktionell darstellen (▣ Abb. 4d, e). Meist wird die somatosensible fMRT ergänzend zur motorischen durchgeführt, z. B. bei Patienten mit tumorassoziierten kontralateralen Paresen, sedierten oder nicht kooperativen Patienten und für Verlaufsuntersuchungen, die einer standardisierten Stimulation bedürfen (meist wissenschaftliche Anwendungen). Hierbei wird die zum Tumor kontralaterale Seite stimuliert [15]. Eine aktive Mitarbeit der Patienten ist nicht erforderlich.

Bei Patienten mit großen Tumoren kann durch Tumorinfiltration, Kompression und Verdrängung die Identifizierung der genannten anatomischen Landmarken erschwert bis unmöglich sein (▣ Abb. 5). Die fMRT erlaubt, die funktionellen Areale in Relation zum Tumor verlässlich zu lokalisieren und die Position des prä- bzw. postzentralen Gyrus sicher zu bestimmen. Das Standarduntersuchungsprotokoll für ein somatotopes motorisches Mapping beinhaltet repetitive Bewegungen der zum Tumor gegenseitigen (kontralateralen) Extremitäten und des Kopfs. Entsprechende BOLD-Aktivierungen sind im Gyrus praecentralis lokalisiert und beziehen meist den angrenzenden Sulcus centralis und oft auch den Gyrus postcentralis mit ein. Die Zentralfurche kann so eindeutig lokalisiert werden.

Schwer betroffene Patienten mit tumorbedingten Lähmungen der Gegen-

seite können diese Bewegungsaufgaben manchmal nicht richtig ausführen. Für diese Patienten sind spezielle Untersuchungsprotokolle mit komplexen Bewegungsaufgaben der tumorseitigen Hand [16] oder die passive somatosensible Stimulation [4, 15] hilfreich. Diese Untersuchungen können zusätzlich durchgeführt werden, sind aber nicht Teil des diagnostischen Standard-fMRT-Protokolls:

- ▣ Durch komplexe Fingeropposition der zum Tumor ipsilateralen, nicht gelähmten Hand werden nicht nur der kontra-, sondern auch der zum Tumor ipsilaterale prämotorische und motorische Kortex aktiviert, die als operative Landmarken dienen können [22].
- ▣ Eine passive taktile Stimulation der gelähmten Körperseite kann ergänzend den postzentralen Gyrus lokalisieren [3, 20].
- ▣ Imaginierte Bewegungen aktivieren den primären Motorkortex ebenfalls somatotop, allerdings deutlich schwächer als ausgeführte Bewegungen. Für die prächirurgische Diagnostik sind imaginierte Bewegungen daher nicht zuverlässig verwendbar [17].

Kortikale Plastizität/ Reorganisation

Unter kortikaler Plastizität und Reorganisation wird die Veränderung von Hirnaktivierung unter pathologischen Bedingungen verstanden, wobei angenommen wird, dass diese Veränderungen kompensatorischen Charakter haben [23]. So gibt

es Hinweise, dass die zur Läsion kontralaterale Hirnhälfte Funktionen der zur Läsion ipsilateralen Hirnhälfte z. T. übernehmen kann [5, 10, 13].

Bei Rechtshändern mit frontotemporalen Tumoren links (Sprachregion, dominante Hemisphäre) wurde eine verstärkte Sprachlateralisierung zur nichtdominanten Hemisphäre gezeigt [12, 21]. Erst kürzlich wurde nachgewiesen, dass Hirntumoren auch die Lateralisation der Aktivierung im primären Motorkortex zur Gegenseite bedingen können. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen typischen Veränderungen der motorischen Hirnaktivierung und Paresegrad wurde allerdings bislang nicht nachgewiesen [25]. Des Weiteren nimmt man an, dass eine Schädigung von M1 eine erhöhte motorische Aktivität von SMA zur Folge hat [10]. Solche Funktionsveränderungen werden derzeit bei verschiedenen Erkrankungen des Gehirns untersucht und können mittels fMRT sichtbar gemacht werden. So wird angenommen, dass nach Schlaganfällen die neuronale Plastizität nicht nur funktionelle Veränderungen anzeigt, sondern möglicherweise auch zur klinischen Erholung beiträgt [10, 24, 27].

Ausblick: Multimodales Imaging

Die Diffusionstensorbildgebung (DTI) visualisiert den Faserverlauf in der weißen Substanz. In der Nachverarbeitung werden Fasern in verschiedenen Raumrichtungen mit jeweils unterschiedlicher Farbe kodiert. Unterbrechungen oder eine Verlagerung von Nervenfaserbündeln

können mit der DTI dargestellt werden. Die DTI wird deshalb oft in Kombination mit der fMRT in der präoperativen Diagnostik eingesetzt, sodass neben der Lokalisation funktioneller Areale auch der Verlauf wichtiger Fasern, z. B. der Pyramidenbahn oder des Fasciculus arcuatus, in Bezug auf die Lage der Läsion dargestellt werden kann [7, 23].

Die präoperativ angefertigten fMRT- und DTI-Aufnahmen werden meist mit strukturellen 3-D-Datensätzen fusioniert und können zur funktionellen Neuronavigation verwendet werden [23].

Fazit für die Praxis

- Im Gegensatz zur konventionellen MRT kann die fMRT funktionelle Areale des Kortex bildlich darstellen.
- Bezüglich der motorischen und somatosensiblen Systeme steht die Darstellung der somatotop organisierten primären Rindenzonen in den Gyri praecentralis und postcentralis im Vordergrund.
- Die präoperative fMRT-Diagnostik ist die am besten etablierte und validierte klinische Anwendung der fMRT. Sie dient der Abschätzung funktioneller Ausfälle durch die Operation, der Festlegung eines optimierten therapeutischen Konzepts mit dem Ziel einer möglichst radikalen Tumorbehandlung unter weitgehendem Erhalt wichtiger Hirnfunktionen, der Reduktion invasiver diagnostischer Prozeduren (Wada-Test) und der Planung intraoperativer Elektrokortikographien und Wachkraniotomien.
- Darüber hinaus ermöglichen funktionelle Untersuchungen die Charakterisierung pathologisch veränderter Hirnaktivierungen. Inwiefern diese Information prognostischen Wert hat, ist Gegenstand aktueller Forschung.

Korrespondenzadresse



Dr. M. Garcia

Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie, Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin, Universitätsspital Basel, Petersgraben 4, 4031 Basel, Schweiz
meritxell.garcia@usb.ch

Interessenkonflikt. Die korrespondierende Autorin gibt für sich und ihre Koautoren an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

1. Bähr M, Frotscher M (2003) Duu's neurologisch-topische Diagnostik, 8. Aufl. Thieme, Stuttgart
2. Bick AS, Mayer A, Levin N (2012) From research to clinical practice: implementation of functional magnetic imaging and white matter tractography in the clinical environment. *J Neuro Sci* 312:158–165
3. Blatow M, Nennig E, Durst A et al (2007) fMRI reflects functional connectivity of human somatosensory cortex. *NeuroImage* 37:927–936
4. Blatow M, Reinhardt J, Riffel K et al (2011) Clinical functional MRI of sensorimotor cortex using passive motor and sensory stimulation at 3 Tesla. *J Magn Reson Imaging* 34:429–437
5. Bogomolny DL, Petrovich NM, Hou BL et al (2004) Functional MRI in the brain tumor patient. *Top Magn Reson Imaging* 15:325–335
6. Chee MW, Venkatraman V, Westphal C, Siong SC (2003) Comparison of block and event-related fMRI designs in evaluating the word-frequency effect. *Hum Brain Mapp* 18:186–193
7. Dimou S, Battisti RA, Hermens DF, Lagopoulos J (2012) A systematic review of functional magnetic resonance imaging and diffusion tensor imaging modalities used in presurgical planning of brain tumour resection. *Neurosurg Rev* 36(2):205–214
8. Fanghänel J, Pera F, Andeuber F, Nirsch R (2002) Waldeyer – Anatomie des Menschen, 17. Aufl. de Gruyter, Berlin
9. Geyer S, Ledberg A, Schleicher A et al (1996) Two different areas within the primary motor cortex of man. *Nature* 382:805–807
10. Holodny AI, Shevzov-Zebrun N, Brennan N, Peck KK (2011) Motor and sensory mapping. *Neurosurg Clin North Am* 22:207–218
11. Nolte J (2002) The human brain, 6th edn. Mosby, St. Louis
12. Partovi S, Jacobi B, Rapps N et al (2012) Clinical standardized fMRI reveals altered language lateralization in patients with brain tumor. *AJNR Am J Neuroradiol* 33:2151–2157
13. Peck KK, Holodny AI (2007) fMRI clinical applications. In: Reiser MF, Semmler W, Hricak H (eds) *Magnetic resonance tomography*. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 1308–1331
14. Ritter P, Moosmann M, Villringer A (2009) Rolandic alpha and beta EEG rhythms' strengths are inversely related to fMRI-BOLD signal in primary somatosensory and motor cortex. *Hum Brain Mapp* 30:1168–1187

15. Stippich C, Hofmann R, Kapfer D et al (1999) Somatotopic mapping of the human primary somatosensory cortex by fully automated tactile stimulation using functional magnetic resonance imaging. *Neurosci Lett* 277:25–28
16. Stippich C, Kapfer D, Hempel E et al (2000) Robust localization of the contralateral precentral gyrus in hemiparetic patients using the unimpaired ipsilateral hand: a clinical functional magnetic resonance imaging protocol. *Neurosci Lett* 285:155–159
17. Stippich C, Ochmann H, Sartor K (2002) Somatotopic mapping of the human primary sensorimotor cortex during motor imagery and motor execution by functional magnetic resonance imaging (fMRI). *Neurosci Lett* 331:50–54
18. Stippich C, Kress B, Ochmann H et al (2003) Preoperative functional magnetic resonance tomography (fMRI) in patients with rolandic brain tumors: indication, investigation strategy, possibilities and limitations of clinical applications. *Rofo* 175:1042–1050
19. Stippich C (2005) Funktionelle Magnetresonanztomographie: Grundlagen und klinische Anwendung. *Radiologie up2date* 4:317–332
20. Stippich C, Romanowski A, Nennig E et al (2005) Time-efficient localization of the human secondary somatosensory cortex by functional magnetic resonance imaging. *Neurosci Lett* 381:264–268
21. Stippich C, Rapps N, Dreyhaupt J et al (2007) Localizing and lateralizing language in patients with brain tumors: feasibility of routine preoperative functional MR imaging in 81 consecutive patients. *Radiology* 243:828–836
22. Stippich C, Blatow M, Durst A et al (2007) Global activation of primary motor cortex during voluntary movements in man. *Neuroimage* 34:1227–1237
23. Stippich C (2007) *Clinical functional MRI*, 1st edn. Springer, Berlin Heidelberg New York
24. Thulborn KR, Carpenter PA, Just MA (1999) Plasticity of language-related brain function during recovery from stroke. *Stroke* 30:749–754
25. Tozakidou M, Wenz H, Reinhardt J et al (2013) Primary motor cortex activation and lateralization in patients with tumors of the central nervous system. *Neuroimage (Amst)* 2:221–228
26. Tuntiyatorn L, Wuttiplakorn L, Laohawiriyakamol K (2011) Plasticity of the motor cortex in patients with brain tumors and arteriovenous malformations: a functional MR study. *J Med Assoc Thai* 94:1134–1140
27. Weiller C, Isensee C, Rijntjes M et al (1995) Recovery from Wernicke's aphasia: a positron emission tomographic study. *Ann Neurol* 37:723–732
28. Wengenroth M, Blatow M, Guenther J et al (2011) Diagnostic benefits of presurgical fMRI in patients with brain tumours in the primary sensorimotor cortex. *Eur Radiol* 21:1517–1525
29. Yousry TA, Schmid UD, Alkadhi H et al (1997) Localization of the motor hand area to a knob on the precentral gyrus. A new landmark. *Brain* 120:141–157
30. Zilles K, Rehkämper G (1998) *Funktionelle Neuroanatomie*, 3. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg New York
31. Lewine JD (1995) Introduction to functional neuroimaging: functional neuroanatomy. In: Orrison WW Jr, Lewine JD, Sanders JA, Hartshorne MF (eds) *Functional brain imaging*. Mosby-Year Book, St. Louis, p 83
32. Penfield W, Rasmussen T (1937) *The cerebral cortex of man*. Macmillan, New York