

# Herausforderungen der Neurochirurgie

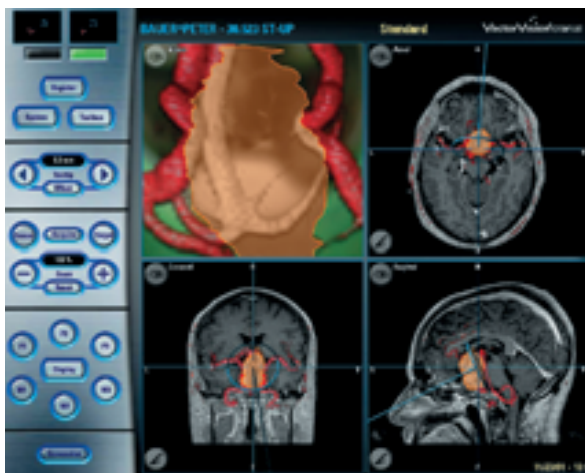
Moderne Neuronavigation und intraoperative Bildgebung in Frankfurt



1 Moderne Neuronavigationseinheit bestehend aus Infrarotkamera, Neuronavigationsbildschirm und entsprechender Software.

(A) Die digitalisierte Kopfposition des Patienten wird in das Neuronavigationssystem referenziert; jeder Punkt im Gehirn kann mittels der Neuronavigationssoftware millimetergenau aufgesucht werden.

(B) Neuronavigationsgesteuerter mikrochirurgischer Zugang bei einem großen Tumor der Hirnanhangsdrüse (Hypophyse). Der Tumor selbst, die unmittelbar benachbarten Hirngefäße sowie der operative Zugang werden dargestellt und dem Operateur in das Gesichtsfeld des Mikroskops eingeblendet.



wichtiger funktioneller und vaskulärer Strukturen, also ohne Funktionsverlust für den Patienten, im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes zu entfernen.

## Entwicklung der Medizingerätetechnik

Diese Besonderheiten haben die Entwicklung minimal invasiver Operationstechniken motiviert: In den 1960er Jahren wurde das Mikroskop in den neurochirurgischen Operationssaal eingeführt; es folgten immer feinere mikroneurochirurgische Operationstechniken.

Heute sind die eingesetzten Operationsmikroskope multifunktionale Instrumente, die eine Vielzahl von Daten zur Neuronavigation im Okular überlagert darstellen können – was die Morbidität und Mortalität neurochirurgischer Operationen enorm gesenkt hat.

Parallel dazu haben sich in der bildgebenden Diagnostik in den späten 1970er Jahren die Computertomografie und in den 1980er Jahren die Magnetresonanztomografie etabliert. Sie bilden heute die Grundlage für den nicht-invasiven Nachweis von krankhaften Veränderungen im Gehirn. Dank moderner Computersysteme wurden in den späten 1980er und frühen 1990er Jahren die älteren rahmenbasierten stereotaktischen Systeme weiterentwickelt hin zu den rahmenlosen Navigationssystemen, die dem Neurochirurgen an den Kon-

solen moderner Bildgebungseinheiten die Operationsplanung und -durchführung erleichtern. Neben der dreidimensionalen Darstellung der individuellen Patientendaten ist eine Markierung der Zielregion, etwa eines Tumors, und wichtiger umgebender Strukturen wie zum Beispiel der Blutgefäße möglich. Diese Strukturen werden in das Operationsmikroskop eingespielt und erleichtern die Orientierung während einer Operation. 1

## Moderne tomografische Methoden

Mit der Computertomografie (CT) und der Magnetresonanztomografie (MRT) verfügen wir heute über Abbildungstechnologien, die eine dreidimensionale Darstellung der individuellen anatomischen Strukturen ermöglichen. Die dabei gewonnenen Bildinformationen stellen die Grundlage für die Diagnostik, die Operationsplanung und Folgeuntersuchungen zur Verlaufsbeurteilung dar. In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Neuroradiologie (Leiter Prof. Dr. Friedhelm Zanella) und dem Brain Imaging Center Frankfurt (Sprecher: Prof. Dr. Helmuth Steinmetz) [siehe auch Interview mit Steinmetz, Seite 80], in dem zwei hochmoderne Magnetresonanztomografen für Untersuchungen mit hoher Magnetfeldstärke bis zu 3 Tesla zur Verfügung stehen, erreichen wir an der Klinik für Neurochirurgie des Universitätsklinikums

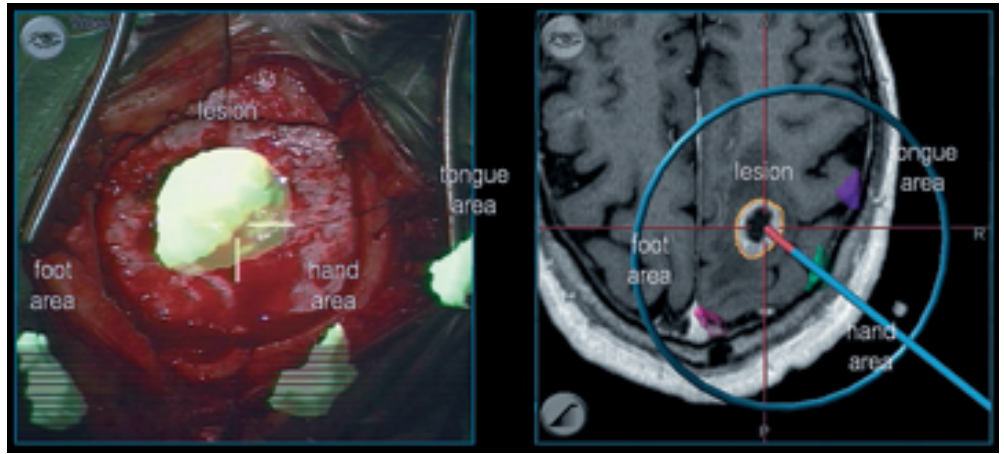
Neurochirurgische Eingriffe am Gehirn, unserem komplexesten Organ, unterscheiden sich erheblich von chirurgischen Eingriffen anderer Disziplinen: Als einziges Organ ist es vollständig von einer knöchernen Hülle umgeben. Der operative Zugang macht exakt platzierte Schädelöffnungen notwendig; trotzdem kann aber der direkte Zugangsweg zu einem tief gelegenen Tumor durch wichtige kortikale Areale oder Bahnenverbindungen versperrt sein. Eine Unterversorgung mit Sauerstoff wird vom Hirngewebe schlechter vertragen als von anderen Geweben des Körpers, weshalb Hirngefäße besonders geschont werden müssen. Zugleich besteht ein berechtigter Anspruch des Patienten an den Neurochirurgen, beispielsweise einen Tumor möglichst komplett unter Erhaltung

Frankfurt somit die bestmögliche Darstellung, um die anatomischen und pathologischen Verhältnisse bei jedem einzelnen Patienten präzise beurteilen zu können.

Auch die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT) [siehe »Ausgewählte Methoden der Hirnforschung im Überblick«, Seite 78] ist von großem Nutzen: Aufgabenspezifisch aktivierte Gehirnareale können bestimmt werden, weil mit der Aktivierung der Nervenzellen auch die lokale Durchblutung ansteigt und damit der relative Anteil von deoxygeniertem Sauerstoff sinkt. Dies registriert die fMRT, so dass aus der Analyse der Daten direkte Rückschlüsse auf die Aktivität eines Hirnareals bei der Ausführung einer Aufgabe möglich sind. In die tägliche Routine unserer Klinik integriert ist die Darstellung von motorisch aktiven Arealen der Hirnrinde bei Tumoren und Läsionen, die nahe an die für die Bewegung zuständigen (eloquenten) Hirnareale heranreichen. Diese Daten werden in die Operationsplanung integriert und stehen dem Operateur auch während der Operation zur Verfügung. **2**

Die Information über die kortikalen Generatoren motorischer Aktivität allein ist als Abbildung des motorischen Systems allerdings nicht ausreichend. Ebenso wichtig ist es, die Lage der Faserbahnverbindungen zu kennen, die die Informationen von der Gehirnrinde über die Stammganglien zum Rückenmark leiten und von dort zu den Erfolgsorganen, den Muskeln. Das bildgebende Prinzip beim Diffusion-Tensor-Imaging (DTI), einem »Ableger« der MRT, beruht darauf, dass die Bewegung von Wassermolekülen in mehreren Raumrichtungen gemessen werden kann. In Richtung einer Faserbahn ist diese Molekularbewegung besser möglich als senkrecht dazu. Diese bessere Beweglichkeit wird in einem Vektor ausgedrückt, dessen Richtung den Verlauf einer Faserbahn anzeigt. Auch diese Informationen werden bei Patienten mit Tumoren in der Nähe der großen Bahnensysteme präoperativ erhoben und stehen während der Operation dem Neurochirurgen zur Verfügung. **3**

Weitere spezielle MRT-Verfahren messen die chemische Zusammensetzung eines Gehirnbereiches (CSI: Chemical Shift Imaging) oder die



**2** Neuronavigationsgesteuerter mikrochirurgischer Zugang zu einer tief liegenden Hirnmetastase in unmittelbarer Nachbarschaft wichtiger Steuerungszentren für Bewegung und Sprache. Mittels präoperativer funktioneller Magnetresonanztomografie wurden die Bewegungszentren für Hand, Fuß und Zunge identifiziert, digital segmentiert und in die Neuronavigationssoftware integriert (rechts). Die so gewonnenen Daten werden dann inklusive der Tumorkontur in das Sichtfeld des Operationsmikroskopes eingeblendet (links), wodurch der Neurochirurg zu jedem Zeitpunkt der Operation über die genaue Lage des Tumors sowie benachbarter und unbedingt zu schonender Bewegungszentren informiert ist.

spektrale Verteilung dieser Substanzen in einem bestimmten Volumen (SVS: Single Voxel Spectroscopy). Die vergleichende Messung in einem Tumor und in der gesunden Gehirnschubstanz erlaubt Aussagen über die Art des Tumors:

Bei einer stereotaktischen Punktion zur histologischen Diagnose-sicherung sollte der Teil des Tumors getroffen werden, der den höher malignen Anteil hat; dieser bestimmt auch maßgeblich die Prognose und die weitere Therapie. Die Integration gewonnener Verteilungsdaten von Indikatormetaboliten hilft, die stereotaktische Probenentnahme an der Stelle durchzuführen, an der die höchste Konzentration – der »Hot Spot« – des Indikatormetaboliten vorliegt.

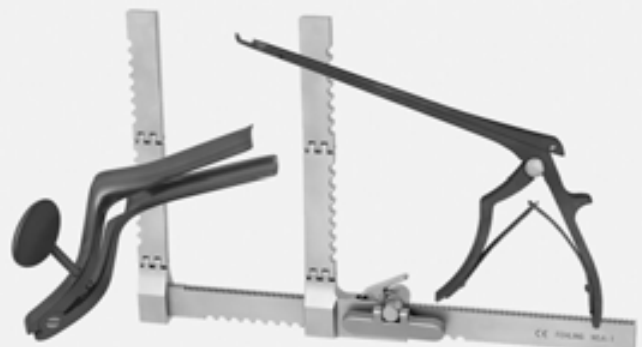
Eine Hirnoperation ist ein dynamischer Prozess, in dem kontinuierlich Entscheidungen getroffen werden müssen. Die Herausforderung in der Neurochirurgie besteht heute darin, für diese Entscheidungen alle relevanten Informationen samt der von den Neuroradiologen bereitgestellten differenzierten

Bilddaten auch während einer Operation zur Verfügung zu haben. Hoch entwickelte Bildfusionsalgorithmen erlauben die Integration verschiedener Bilddatenmodalitäten. Dies ist zum Beispiel wichtig

Anzeige

## OFFENE MRI-OP? NEURONAVIGATION?

wir haben was für Sie



TITANINSTRUMENTE FÜR  
KOPF- UND WIRBELSÄULENCHIRURGIE

**FEHLING**  
INSTRUMENTS GMBH

Hanauer Landstr. 7 · D-63791 Karlstein · www.fehling-instruments.de  
tel: +49 (0) 61 88 - 95 74.0 · fax: +49 (0) 61 88 - 95 74.44 · info@fehling-instruments.de

für den Einsatz der rahmenlosen stereotaktischen Verfahren, bei denen die Bilddaten erst mit der Kopfposition des Patienten in Übereinstimmung gebracht werden müssen. Dafür wurden früher Marker auf dem Kopf des Patienten befestigt, die in den anatomischen 3D-Datensätzen mit erfasst werden mussten. Für die Referenzierung wurden die Bilddatensätze der Marker durch eine Punkt-zu-Punkt-Transformation mit jenen der Lage des Kopfes im Operationsaal in Übereinstimmung gebracht. Da die Klebmarker nach einiger Zeit verrutschen konnten, musste die Messung des Bilddatensatzes möglichst am Tag der Operation oder am Vortag stattfinden. Um diesen Nachteil auszugleichen, setzten wir an der Klinik für Neurochirurgie im Jahre 2003 erstmals weltweit einen Laser-Oberflächen-Scanner für die intraoperative Registrierung des Patienten ein. Damit war die Anfertigung eines Bilddatensatzes mit aufgeklebten externen

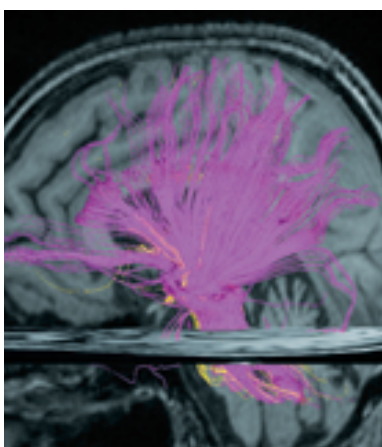
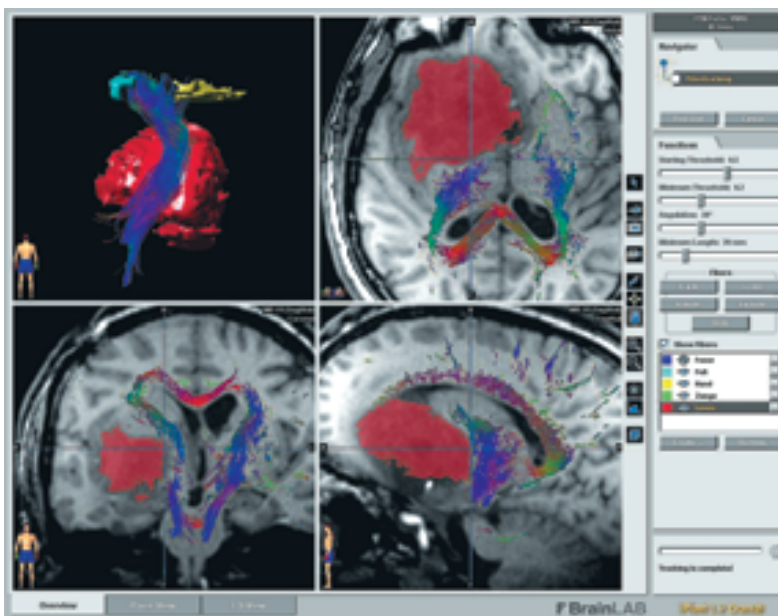
Landmarken in enger zeitlicher Nähe zur Operation nicht mehr notwendig. Stattdessen wird der 3D-Datensatz während des stationären Aufenthaltes zur Operationsvorbereitung oder prästationär angefertigt. Zum Zeitpunkt der Operation ist der Navigationsdatensatz für den Patienten vorbereitet – dies bedeutet für unsere Patienten eine noch größere Flexibilität.

Viele Studien belegen den Nutzen dieser Neuronavigation für eine schonende und genaue Entfernung von Hirnläsionen. Doch ein Problem bei der Verwendung präoperativ gewonnener Bilddatensätze bleibt bestehen: Während einer Operation ändern sich räumliche Verhältnisse im Gehirn. Es kommt zu Verschiebungen der Hirnsubstanz (Brain Shift) durch Entfernung des Tumors und/oder Abfluss von Hirnwasser (Liquor) nach Eröffnung der harten Hirnhaut (Dura mater). Ab einem gewissen Punkt im Operationsablauf ist die Genau-

igkeit des Navigationssystems unzuverlässig. Die Hirnverschiebung ist nicht exakt vorhersagbar und ist während der unterschiedlichen Phasen einer Operation verschieden stark ausgeprägt. Um die Genauigkeit der Navigation auch während der Operation zu gewährleisten, ist eine Bestimmung der aktuellen Situation notwendig.

Das »Vermuten« wird aus dem Operationssaal verbannt: Intraoperativ kann zu bestimmten Zeitpunkten eine Bildgebung durchgeführt werden. Damit kann auch – nach vermeintlich kompletter Tumorresektion – intraoperativ geprüft werden, ob ein Resttumor vorliegt; der verbliebene Tumoranteil kann navigiert aufgesucht und entfernt werden. Der MRT-Blick unter die dem OP-Mikroskop sichtbare Oberfläche vermeidet Komplikationen. Eine abschließende Resektionskontrolle kann das Erreichen des Operationszieles bestätigen und direkt intraoperativ aufgetretene Komplikationen ausschließen. Falls doch eine Komplikation aufgetreten ist, etwa eine Blutung, kann sofort in der gleichen Narkose gehandelt werden. Indikationen für den Einsatz der intraoperativen Bildgebung sehen wir vor allem bei der Behandlung niedergradiger hirneigener Tumore, bei Tumoren der Hirnanhangsdrüse (Hypophyse) und Tumoren, bei denen eine komplette

**3** Lage und Verlauf von Faserverbindungen können mittels Diffusions-Tensor-Imaging (DTI) dargestellt werden (unten). Der Datensatz wurde im 3-Tesla-Magnetresonanztomografen am Brain Imaging Center gewonnen. Beispiel der Integration von DTI-generierten Faserverbindungen in die Neuronavigation (oben). Es zeigt sich eine deutliche Verlagerung der Pyramidenbahn durch einen ausgedehnten Tumor der Stammganglien. Die so gewonnenen Daten gehen unmittelbar in die Operationsplanung ein.



igkeit des Navigationssystems unzuverlässig. Die Hirnverschiebung ist nicht exakt vorhersagbar und ist während der unterschiedlichen Phasen einer Operation verschieden stark ausgeprägt. Um die Genauigkeit der Navigation auch während der Operation zu gewährleisten, ist eine Bestimmung der aktuellen Situation notwendig.

#### Intraoperative MRT-Systeme in Frankfurt

Von den verschiedenen Strategien der intraoperativen Bilddatenerhe-

bung (Ultraschall, CT, MRT) haben wir uns an der Neurochirurgischen Klinik des Universitätsklinikums Frankfurt für die intraoperative Magnetresonanztomografie entschieden: Diese Technologie ermöglicht als einzige eine reproduzierbare dreidimensionale Bilddatenerhebung in drei Ebenen ohne Strahlenbelastung. Zudem lässt die Magnetresonanztomografie auf eine Verbesserung der Bildqualität in naher Zukunft hoffen, da verschiedene MRT-Komponenten derzeit eine Weiterentwicklung erfahren. Seit 1996 sind unterschiedliche intraoperative MRT-Systeme entwickelt worden, die sich – abhängig von ihrer magnetischen Feldstärke – in Hochfeld-, Mittelfeld- und Niederfeldsysteme unterscheiden lassen. In unserer Klinik setzen wir einen Niederfeld-Magnetresonanztomografen mit einer Magnetfeldstärke von 0,15 Tesla ein, das einzige Gerät dieser Art in Deutschland. Es ist während der Operation unter dem OP-Tisch verborgen und wird bei Bedarf zur sequenziellen Bildgebung in das Operationsgebiet gefahren; ein Patiententransport ist nicht notwendig. Wegen der geringen Feldstärke kann die Vielzahl spezieller neurochirurgischer Instrumente ohne Beeinträchtigung des Arbeitsablaufes eingesetzt werden.



4 Mikrochirurgische Hirnoperation unter Verwendung des intraoperativen Magnetresonanztomografen (links). Der Kopf des Patienten ist direkt im MRT gelagert. Zu jedem Zeitpunkt der Operation können MRT-Untersuchungen des Kopfes durchgeführt werden, um so das Ausmaß der bereits erfolgten Tumorexzision zu überprüfen und zu dokumentieren.

Intraoperative Bildgebung mittels 0,15-Tesla-MRT bei einem Patienten mit großem hirneigenem Tumor (rechts). Die intraoperative Bildgebung ermöglichte die schrittweise Entfernung dieses Tumors und belegte am Ende der Operation die vollständige Tumorexzision sowie das Ausbleiben von Operationskomplikationen.

Entfernung geplant ist. Bisher wurden in unserer Frankfurter Klinik mehr als 50 Patienten mit dieser Technik operiert.

Der Operationssaal als modernes modulares Instrument

Die Kombination minimal invasiver Operationstechniken mit dem Einsatz von Navigationssystemen und der modernen bildgebenden Metho-

den bieten unseren Patienten heute einen sehr hohen technischen Standard. Insbesondere bietet die intraoperative Magnetresonanztomografie enorme Vorteile für die Aktualisierung der Navigation und Resektionskontrolle während der Operation. Damit ist der Operationssaal nicht mehr nur der Ort, an dem eine Operation stattfindet, sondern er ist selbst zu einem modernen modularen Instrument geworden, das an

die jeweils durchzuführende Operation angepasst werden kann. Durch die Fülle relevanter diagnostischer Informationen, die für unsere Patienten erhoben werden, ist eine aufwändige Planung erforderlich; sie kann unter Umständen sogar länger dauern als der eigentliche Eingriff. Doch für den Patienten bedeutet dies eine Verbesserung des Operationsergebnisses und eine erhöhte Operationssicherheit. ♦

Die Autoren

**Prof. Dr. Volker Seifert**, 54, ist Direktor der Neurochirurgischen Klinik und geschäftsführender Direktor des Zentrums für Neurologie und Neurochirurgie mit den operativen Schwerpunkten der Mikrochirurgie von Gehirn, Rückenmark und Wirbelsäule. Unter seiner Leitung entwickelte sich die Neurochirurgische Klinik zu einem Zentrum der computerassistierten und bildgestützten operativen Therapie.

**Prof. Dr. Andreas Raabe**, 42, ist Leitender Oberarzt der Neurochirurgischen Klinik und hat sich auf die minimalinvasive mikrochirurgische Operation von Tumoren und Gefäßerkrankungen des zentralen Nervensystems sowie degenerativer Erkrankungen der Wirbelsäule spezialisiert. Sein Forschungsschwerpunkt besteht in der Entwicklung und Anwendung neuer prä- und intraoperativer Technologien zur Bildgebung, Neuronavigation, Nah-Infrarot-Angiografie und einer individualisierten Operationsplanung und -strategie.

**Dr. Elke Hattingen**, 40, ist Fachärztin für Radiologie und Assistenzärztin an der Abteilung für Neuroradiologie des Universitätsklinikums Frankfurt. Der Schwerpunkt ihrer klinischen und wissenschaftlichen Tätigkeit liegt in der MR-Spektroskopie, der funktionellen MR-Bildgebung sowie der dreidimensionalen Darstellung cortico-spinaler Bahnen in der Magnetresonanztomografie.

**Dr. René Krishnan**, 39, ist Facharzt und Assistenzarzt an der Neurochirurgischen Klinik der Universität Frankfurt. Sein wissenschaftliches Interesse liegt in den modernen bildgestützten Operationsverfahren, der fMRT integrierten Neuronavigation, intraoperativen Bildgebung und der Anwendung von automatisierten Systemen in der Neurochirurgie.

Anzeige



„Ich unterstütze  
**ÄRZTE OHNE GRENZEN**,  
 weil sie professionell  
 helfen und bei Macht-  
 missbrauch den  
 Mund aufmachen.“

*Senta Berger, Schauspielerin*

**ÄRZTE OHNE GRENZEN** hilft weltweit Opfern von Krieg und Gewalt und klagt an, wenn deren Rechte mit Füßen getreten werden.



ÄRZTE OHNE GRENZEN e.V.  
 Am Köllnischen Park 1 • 10179 Berlin  
[www.aerzte-ohne-grenzen.de](http://www.aerzte-ohne-grenzen.de)  
 Spendenkonto 97 0 97  
 Sparkasse Bonn • BLZ 380 500 00

Bitte schicken Sie mir unverbindlich

allgemeine Informationen über **ÄRZTE OHNE GRENZEN**

Informationen für einen Projekteinsatz

Informationen zur Fördermitgliedschaft

die Broschüre „Ein Vermächtnis für das Leben“

Name \_\_\_\_\_

Anschrift \_\_\_\_\_

E-mail \_\_\_\_\_

© Sigi Hengstenberg  
 11104104