

Sven R. Kantelhardt und Christoph von Breitenbuch

Technische Lösungen für alte Probleme: Parallelen in Neurochirurgie und Agrarwissenschaften

Auf den ersten Blick haben Neurochirurgie und Agrarwissenschaften wenig miteinander zu tun. Doch beim näheren Hinsehen ergeben sich Parallelen: Insbesondere die hohe Heterogenität von Geweben und Standortfaktoren bereiten seit jeher Probleme. Neue Technologien ermöglichen es nun Lösungen zu finden. Insbesondere die Verwendung von Navigationsverfahren, aber auch moderne Sensorsysteme erlauben notwendige Arbeitsschritte individuell bzw. standortspezifisch anzupassen. Dieser Artikel stellt parallele Entwicklungen in Neurochirurgie und Landwirtschaft vor und ist als Anregung gedacht, jenseits des eigenen Faches nach Lösungsansätzen für ähnliche Probleme zu suchen.

Schlüsselwörter

Navigation, Neurochirurgie, Präzisionslandwirtschaft

Keywords

navigation, neurosurgery, precision agriculture

Abstract

Kantelhardt, Sven R. and von Breitenbuch, Christoph

Technical solutions for old problems: Parallels in neurosurgery and agricultural science

Landtechnik 66 (2011), no. 6, pp. 436–442, 4 figures, 32 references

At first glance neurosurgery and agriculture have not much in common. When looking closer however, some parallels appear: The high heterogeneity of tissues as well as local factors present severe difficulties for neurosurgeons and farmers alike. New technologies, such as navigation and specific sensor systems can nowadays help to precisely adjust treatment and processing of soil and crops to specific local needs. This article summaries some striking parallels in the development of neurosurgical and agricultural techniques and is meant as stimulus to look for solutions beyond the margins of the own discipline.

■ Der Versuch Neurochirurgie und Agrarwissenschaften zu vergleichen mag zunächst ungewöhnlich erscheinen. Doch bei näherer Betrachtung ergeben sich viele Parallelen – ähnliche Probleme werden durch den Einsatz gleichartiger Technologien angegangen. Für die Agrarwissenschaften hat das bereits der Pionier Albrecht Thaer vorhergesagt: „Der Effect der Arbeit wird erstaunlich vermehrt durch zwei mächtige Hebel: Theilung der Arbeit und Maschinen“ [1]. Doch auch in anderen anwendungsorientierten Wissenschaften, wie der Neurochirurgie, ergeben sich ähnliche Probleme und Lösungsansätze. Daher wagen die Autoren einen „Blick über den Tellerrand“, um Anregungen für das jeweils eigene Fache zu suchen.

Historisches

Sowohl bei der Neurochirurgie, als auch bei der Landwirtschaft handelt es sich um sehr alte Kulturtechniken. Während dies in Bezug auf die Landwirtschaft niemanden überrascht, geriet die Neurochirurgie zwischendurch in Vergessenheit.

Dennoch konnten die ältesten Nachweise von neurochirurgischen Eingriffen in Europa (Schädel von Vasilevka II, Ukraine) mittels C-14-Methode auf die Zeit um 7300–6220 v. Chr. datiert werden [2]. Auch in Deutschland finden sich entsprechende Nachweise: Der trepanierte Schädel in **Abbildung 1 A** stammt aus der frühen Bronzezeit um etwa 2000 v. Chr., aus der Nähe von Merseburg. Über den Sinn und Zweck dieser vorgeschichtlichen Eingriffe weiß man heute wenig. Heilungsspuren am Schädel zeigen, dass viele Eingriffe längere Zeit überlebt wurden. An einem weiteren Schädel Fund, der mittels C-14 -Methode ebenfalls in die Zeit um 1940 v. Chr. datiert wurde, aus Bolkendorf, etwa 60 km nordöstlich von Berlin, konnten Piek und Kollegen zeigen, dass die Trepanation vermutlich der Behandlung einer Schädelfraktur diente [3].

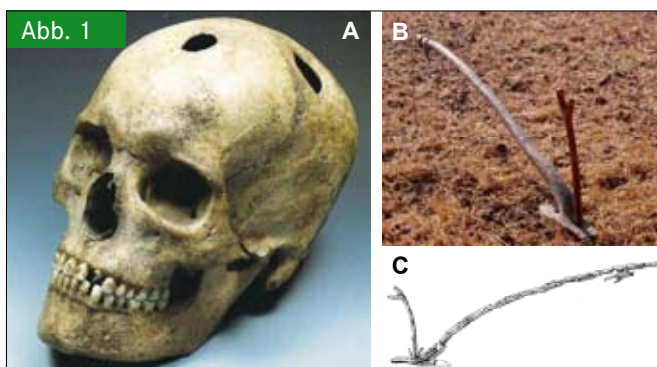


Abb. 1
 A: Trepanierter Schädel aus der frühen Bronzezeit (etwa 2000 v. Chr.). Quelle: Postkarte des Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt
 B, C: Rekonstruierter Hakenpflug (B) bzw. Zeichnung (C) aus der frühen Bronzezeit. Quelle: Landesmuseum Hannover
 Fig. 1 A: Trepanned skull from the early bronze age (about 2000 AD). Source: Postcard of the State Office for Heritage Management and Archaeology Sachsen-Anhalt
 Fig. 1 B, C: Reconstruction of a single furrow-plough (B) resp. drawing (C) from the early bronze age. Source: Copyright Landesmuseum Hannover

Doch auch die „Agrarwissenschaften“ zeichneten sich bereits in der frühen Bronzezeit durch Innovationen aus. Der in **Abbildung 1 B** und **C** gezeigte Hakenpflug, datiert um 2000 v. Chr., ist das älteste gefundene Stück seiner Art. Das Konstrukt aus Eichenholz misst ganze drei Meter und weist eine 60 cm große Pflugschar aus. Der Einsatz eines solchen Pfluges stellte für die Landwirte der frühen Bronzezeit sicher eine immense Arbeitserleichterung dar.

Individualisierung und lokale Standortfaktoren

Schon den Erfindern des Walleschen Pfluges dürfte aufgefallen sein, dass verschiedene Abschnitte ihrer Felder unterschiedliche Erträge bringen und sich für den Anbau unterschiedlicher Pflanzen eignen. Wie Stafford anmerkte [4], ist diese Erkenntnis auch andernorts aus wahrhaft biblischer Zeit überliefert, wie das Gleichnis vom Sämann [5] zeigt. Heute wissen wir, dass lokale Standortfaktoren wie Bodenbeschaffenheit oder Feuchtigkeit diese deutlichen Unterschiede in Wachstum und Erträgen bewirken. Nun endlich stehen Agrarwissenschaftlern und Landwirten neue Technologien zur Verfügung, um sich diesem alten Problem zu stellen.

Am Anfang steht dabei sicherlich die Identifizierung dieser Standortfaktoren. Moderne Bildgebungsverfahren bieten schon vor dem Beginn der Bodenbearbeitung wertvolle Informationen. Früher waren die Ergebnisse z. B. der Reichsbodenschätzung von 1934 noch recht ungenau. Die Schätzung beruhte auf einem Beprobungsraster von 50 x 50 m und mit der Bodenbeschaffenheit wurde nur ein einziger Standortfaktor dargestellt. Heute gibt es weitere Technologien die zusätzliche Informationen liefern. Luft- oder Satellitenbilder ermöglichen jedes Feld individuell zu einer bestimmten Vegetationsphase abzubilden (**Abbildung 2 A**). Hiermit können Informationen, die über die rein morphologisch/topographische Abbildung hinausgehen,

gewonnen werden. Aufnahmen die während Dürremonaten entstanden, verraten z. B. etwas über die Wasserversorgung des Bodens. Aus Falschfarbenaufnahmen können beispielsweise Rückschlüsse auf die Biomasseentwicklung von Pflanzen gezogen werden (**Abbildung 2 B**) [6] oder orts aufgelöst die farbcodierte Ertragsmenge (**Abbildung 2 C**) und die Bodenleitfähigkeit (**Abbildung 2 D**) abgebildet werden.

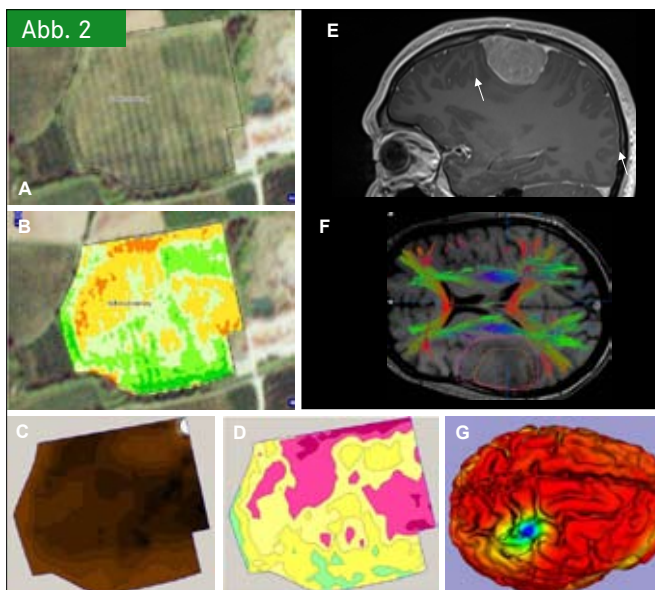
Auch Neurochirurgen sehen sich mit dem Problem regionaler Unterschiede konfrontiert: Die Struktur und die Aufgabenverteilung innerhalb des menschlichen Gehirns ist sehr heterogen. Dem Bronzezeit-Chirurgen mag bereits aufgefallen sein, dass Operationen und Verletzungen in bestimmten Regionen zu ähnlichen Ausfallmustern führen, aber erst mithilfe der heutigen Technik ist es möglich, im individuellen Fall die exakte Lokalisation von Funktionseinheiten im Hirngewebe zu erkennen und die Risiken eines Eingriffs vorherzusagen.

Moderne Bildgebungsverfahren erlauben es Neurochirurgen bereits vor dem Eingriff zahlreiche Informationen über die Krankheit bzw. die genaue Lage eines Problems zu ermitteln. Computer- oder Magnet-Resonanz-Tomographen ermöglichen die betreffende Hirnregion hoch aufgelöst darzustellen, ohne den Ort des Geschehens operativ freilegen zu müssen. Besonders wichtig ist dabei, dass die tatsächlichen Verhältnisse bei jedem Patienten individuell abgebildet werden können (**Abbildung 2 E**), da die individuellen Gegebenheiten auf der Hirnoberfläche beträchtlich von der klassischen Anatomie abweichen können. Grund dafür ist zum einen eine gewisse Variabilität – die auch gesunde Organe aufweisen. Daneben können verschiedene Erkrankungen, z. B. langsam wachsende Hirntumore Gewebe verdrängen oder sogar ein „umsiedeln“ von Funktionen in eine andere Hirnregion bewirken [7]. In der letzten Zeit haben neue Verfahren, wie die Darstellung der Faserbahnen (**Abbildung 2 F**) [8], die funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie, die digitale Substraktionsangiographie [9] oder die Positronen-Emissions-Tomographie [10] geholfen, nicht nur rein morphologische Bilder zu erstellen, sondern darüber hinaus auch Informationen über Durchblutung, den Verlauf von Nervenfasern, Funktionen oder den Stoffwechsel von einzelnen Hirnregionen zu liefern.

Stereotaktische/navigierte Tumorbiospien – navigationsgestützte Entnahme von Bodenproben

Nicht immer reichen präoperative bzw. vor Beginn der Bodenbearbeitung aufgenommene Bilder aus, um einen guten (Behandlungs-)Plan zu erstellen.

Art und Aggressivität eines Hirntumors lassen sich beispielsweise so gut wie nie ohne eine Probenentnahme und mikroskopische Aufarbeitung des Gewebes durch einen Pathologen vollkommen sicher und exakt diagnostizieren. Um sicherzustellen, dass die Probe exakt am richtigen Ort entnommen wird, verwendet man in der Neurochirurgie Navigationsverfahren. Die höchste Präzision liefern sogenannte rahmengestützte stereotaktische Biopsien. Dabei wird an dem Kopf des Patienten ein Ring fixiert, der als Referenzpunkt eines Koordinatensystems dient. Im Anschluss wird ein Bild – üblicherweise ein CT



A: Satellitenbild von Schwackenberg im südlichen Niedersachsen
 B: Die Falschfarbenaufnahme zeigt die Chlorophyllkonzentration als Maß für die Bewuchsdichte

C und D zeigen dieselbe Region, C stellt die ortsaufgelöste farbcodierte Ertragsmenge und D die Bodenleitfähigkeit dar, die vor allem von der Feuchtigkeit und der Zusammensetzung des Bodens abhängt
 E: Kernspinaufnahme des Schädels (T1 Wichtung mit Gadolinium Kontrastmittel in sagittaler Schnittführung). Direkt unter der Schädeldecke zeigt sich ein Tumor (Meningeom, durch Pfeil gekennzeichnet).
 F: Darstellung der Faserbahnen (fiber tracking/DWI MRT in transversaler Schnittführung). Die roten/orangen Umrisse (Pfeil) zeigen einen Tumor, der die hier dargestellten Faserbahnen aber nicht wesentlich verlagert

G zeigt eine funktionelle Oberflächenkarte des Hirns in 3-D. Die blauen Regionen sind für Bewegungen der Muskeln im Daumenballen verantwortlich. Die Daten wurden durch elektrische Stimulation der Hirnoberfläche und Ableitung der elektrischen (Antwort-) Potenziale im betreffenden Muskel erhoben

Fig. 2 A: Satellite image of Schwackenberg in southern Lower Saxony
 Fig. 2 B: False color image showing chlorophyll-concentration indicating crop density

Fig. 2 C, D: C and D are images of the same region. C is color-coded for crop yield, while D shows the electrical conductivity of the soil indicating soil water and composition

Fig. 2 E: MRI image of the skull (sagittal plain, T1 weighted with Gadolinium contrast). Directly below the skull a tumor can be seen (meningioma, arrow)

Fig. 2 F: Fiber tracking (axial plain, DWI weighted MRI). The red/orange outlines show a tumor, however the surrounding fiber tracts (green, blue and red) are not much translocated

Fig. 2 G: Functional surface map of the brain in 3-D. The blue regions are motor areas for the movement of the contralateral thumb. Data was collected by electric stimulation of the cerebral cortex and simultaneous recording of motor potentials in the corresponding muscles

– vom Kopf des Patienten mit dem daran befestigten Ring angefertigt. Nun kann man die Lage eines Tumors oder eines anderen Prozesses, den es zu punktieren gilt, in dem Koordinatensystem einordnen und so den optimalen Weg dahin errechnen. Die Genauigkeit dieser Methode liegt bei $< 0,05$ cm [11].

Analog dazu besteht auch in der Landwirtschaft die Möglichkeit zur weiteren Spezifizierung der Standortfaktoren Bodenproben zu entnehmen, wenn die durch Luft- oder Satelliten-

bilder gewonnenen Informationen nicht ausreichen. Auch hier wird der Entnahmeort navigationsgestützt aufgesucht und dokumentiert. Seit den 1990ern steht auch für die Landwirtschaft ein Navigationssystem mit hoher Ortsauflösung zur Verfügung: das GPS [12]. Das System ist in der Lage die Position eines Empfängergerätes auf der Erdoberfläche zu errechnen, wenn es mit mindestens 3 Satelliten auf geostationären Umlaufbahnen Kontakt hat. Eine jeweils neue Registrierung des Systems vor dem Einsatz ist nicht notwendig, da sich die Position der Satelliten relativ zur Erdoberfläche nicht ändert (geostationäre Umlaufbahn). Alternative Systeme sind das russische GLONASS [13], welches jedoch wegen Wartungsproblemen als unsicher gilt, und das europäische GNSS (Galileo) [14]. Beide Systeme haben jedoch derzeit im Vergleich zum GPS in der Landwirtschaft nur eine geringe Bedeutung. In den 1990ern war das GPS-System noch fehleranfällig, insbesondere bei sich bewegenden Empfängern, oder wenn einzelne Satelliten durch Bäume, Häuser usw. abgedeckt wurden [12]. Die Positionierungs-Genauigkeit lag damals bei etwa 5–10 m. Moderne GPS-Geräte hingegen liefern laut Anbieter zumindest Präzisionen im Submeter-Bereich [4].

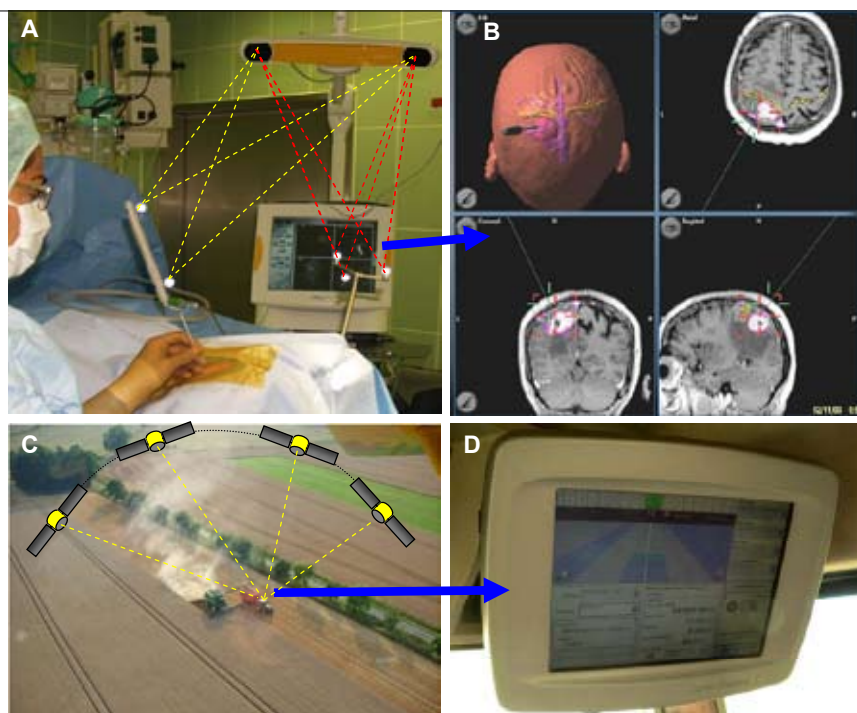
Durch Verwendung von Navigationssystemen bei der Entnahme von Bodenproben ist es dem Landwirt möglich, die „individuelle“ Beschaffenheit eines Feldes exakt zu kartographieren und die bekannten Daten z. B. von der Reichsbodenschätzung von 1934 zu überprüfen bzw. zu präzisieren.

Anwendung von Navigationsverfahren für Operationen und Bodenbearbeitung

Doch die Bedeutung der Navigation ist nicht allein auf die Entnahme von Proben beschränkt: Neben der oben beschriebenen rahmengestützten Stereotaxie gibt es für die Neurochirurgie inzwischen auch Systeme zur rahmenlosen Stereotaxie. Diese erlauben nicht nur Proben exakt an bestimmten Orten zu entnehmen, sondern bieten auch während komplizierten Operationen Orientierung. Die heute am weitesten verbreitete Technik beruht auf einer Infrarot-Stereokamera, die Bewegungen bzw. Umlagerungen des Patienten während der Operation anhand von Infrarot-Reflektoren, die am Patienten fixiert werden, verfolgt. Zu Beginn der Operation wird die genaue Position des Kopfes relativ zu den Infrarot-Reflektoren vom Navigationsrechner erfasst und mit den vorher angefertigten CT- oder MRT-Bildern abgeglichen (Referenzierung). Die resultierende Genauigkeit liegt bei $< 0,5$ cm (**Abbildung 3 A**) [15].

Das Navigationssystem kann so dem Chirurgen während des gesamten Eingriffs die exakte Position seiner Instrumente anzeigen [16, 17]. Dies erleichtert intraoperativ die Orientierung und erhöht die Genauigkeit etwa bei der Resektion eines Tumors. Normalerweise plant der Neurochirurg die Navigation für einen Eingriff vor Durchführung der Operation an einem Rechner. Er zeichnet auf dem Navigationscomputer beispielsweise den Zugangsweg, den zu entfernenden Tumor oder zu erhaltende Strukturen wie Blutgefäße oder besonders wichtige Hirnregionen ein und folgt später diesem Plan (**Abbildung 3 B**).

Abb. 3



A: Referenzierung eines modernen Navigationssystems zur rahmenlosen Stereotaxie im Operationssaal. Die 3-D Infrarot Kamera ist in der Lage Infrarotmarker auf Instrumenten zu erkennen. Die gelb gestrichelten Linien zeigen die Sichtachsen der Kamera zu den Markern auf dem Instrument. Ein Computer kann daraus die Position der Instrumentenspitze relativ zu einem Referenzierungspunkt (die Sichtachsen der Kamera auf den Referenzierungspunkt, der am Kopf des Patienten befestigt wird, sind als rote Linien eingezeichnet) errechnen

B: Bildschirm des Navigationsrechners. Der Rechner stellt verschiedene Schnittebenen des Operationsgebietes und eine 3-D Rekonstruktion zur Verfügung, sodass der Operateur zu jedem Zeitpunkt der Operation sehen kann, an welchem Ort sich gerade seine Instrumente auf den vor der Operation angefertigten MRT- oder CT-Bildern befinden. Die farbigen Strukturen, welche auf dem MRT in diesem Beispiel zu sehen sind, wurden von dem Chirurgen vor der Operation eingezeichnet. Der rote Umriss bezeichnet den Tumor. Die Zentralregion, welche für die Bewegung des Körpers zuständig ist und unbedingt geschont werden sollte, ist gelb umrandet, während große Blutgefäße in lila eingezeichnet sind.

C: Ein Navigationsrechner auf der Zugmaschine kommuniziert mit mehreren GPS-Satelliten (gestrichelte Linien). Eine spezielle Referenzierung ist nicht erforderlich, da die Satelliten ihre Position relativ zur Erdoberfläche beibehalten (Geostationäre Umlaufbahnen).

D: Bedienelement auf der Zugmaschine

Fig. 3A: Referencing of a modern frame-less stereotactic system in the operating room. Instruments and reference markers are tracked by a 3-D infrared camera. The yellow lines show the visual axis between camera and instrument, while the red lines show the visual axis to the reference point of the system

Fig. 3B: A computer calculates the relative position of the instrument to the reference point. By matching of the patient position to a preoperatively acquired MRI-scan the system can show the exact position of the instruments tip on the MRI-images

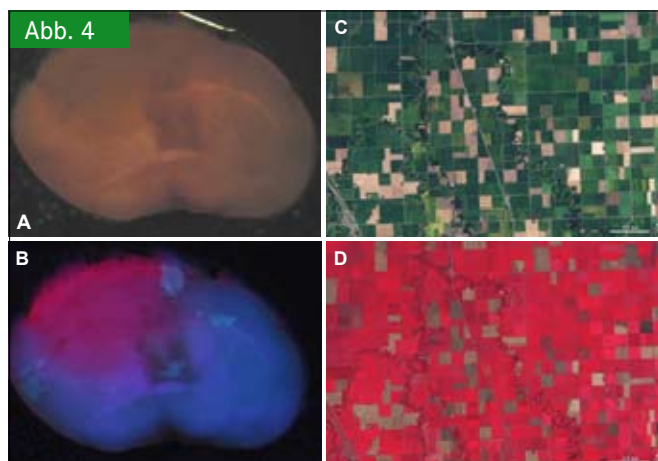
Fig. 3C: Likewise a navigation-computer on the tractor communicates with several GPS-satellites (yellow lines). No reference markers are required, as the satellites are on geostationary orbits and do not change their position relatively to the earth's surface.

Fig. 3D: navigational computer on board of the tractor

Analog dazu werden auch in der Landwirtschaft Navigationssysteme nicht nur zur Vorbereitung und Planung, sondern auch bei der eigentlichen Bodenbearbeitung genutzt. Zugmaschinen können inzwischen automatisch anhand der GPS-Daten gesteuert werden (**Abbildung 3 C, D**). Ein Abgleich der GPS-Navigationsdaten mit Daten der Satelliten-Bildauswertung oder der Bodenproben erlaubt es wiederum einen Plan für die optimale Verteilung von Dünger, Wasser oder Saatgut zu erstellen. Moderne Saat- und Streumaschinen erlauben dann eine GPS-gesteuerte Regulierung der jeweils optimalen Abgabemenge an Dünger oder Pflanzenschutzmitteln [18]. Um eine solche Präzisionslandwirtschaft zu betreiben muss der Landwirt allerdings, genau wie der Neurochirurg, vor der eigentlichen Bodenbearbeitung am Rechner die verfügbaren Daten sichten, auswerten und einen entsprechenden Arbeitsplan entwickeln.

Sensorsysteme zur spektralen Analyse von Hirngewebe oder der Vegetation

Eine Alternative zur Entnahme von Proben und deren Aufarbeitung – die naturgemäß längere Zeit in Anspruch nimmt –, ist die Verwendung verschiedener Sensorsysteme. Dadurch können direkt vor Ort weitere Daten, etwa zur Identifizierung von Tumorgewebe, geliefert werden. Bereits seit den 50er Jahren werden zu diesem Zweck, also noch deutlich vor Einführung der Neuronavigation, Operationsmikroskope eingesetzt [19]. Eine weitere Verbesserung der intraoperativen Identifizierbarkeit von Hirntumorgewebe brachten Fluoreszenz-Untersuchungen. Hier ist insbesondere die 5-Aminolävulinsäure zu nennen. Sie wird in einer Lösung vor der Operation vom Patienten getrunken und dann im Tumorgewebe, nicht aber im benachbarten Hirn in das fluoreszierende Protoporphyrin IX umgewandelt [20, 21]. Wenn



A: Coronarer Schnitt durch ein Maushirn unter normaler Beleuchtung mit Weißlicht. In der links dargestellten Hemisphäre ist ein Hirntumor gewachsen. Im Weißlicht ist er nur schlecht anhand der Verformung zu erkennen

B zeigt dieselbe Schicht unter UV-Anregung. Vor der Entnahme wurde der Maus 5-Aminolävulinäure verabreicht, die im Tumorgewebe zu Protoporphyrin IX verstoffwechselt wurde. Dieses fluoresziert nun unter entsprechender UV-Anregung rot. Dadurch setzt sich der Tumor klar erkennbar gegen das bläulich schimmernde nicht infiltrierte Hirngewebe ab

C: Satellitenaufnahme eines Landstrichs im nordwestlichen Minnesota am Buffalo River: Vegetationszonen = grün, abgeernteten Feldern = braun. Quelle: NASA Earth Observatory, Jesse Allen (beruhend auf Landsat Daten, zur Verfügung gestellt durch United States Geological Survey)

D: Die Infrarot-Falschfarbenaufnahme (Landsat 5 TM) zeigt eine Fülle weiterer Informationen: Rottöne zeigen gesunde Pflanzen, gelbliche Verfärbungen Krankheiten der Pflanzen, schwarz deutet auf Überschwemmungen hin usw. Quelle: NASA Earth Observatory, Jesse Allen (beruhend auf Landsat Daten, zur Verfügung gestellt durch United States Geological Survey)

Fig. 4A: Coronal section of a mouse brain with experimental glioma in the left hemisphere. Under white-light illumination it is difficult to discriminate the exact outline of the tumor

Fig. 4B: B shows the same section under UV-light excitation. Before harvesting of the tumor bearing mouse-brain the animal has been treated with 5-aminolaevolinic acid which is metabolized within the tumor to fluorescent protoporphyrine IX. Now the brightly red fluorescent tumor can easily be differentiated from the surrounding brain tissue.

Fig. 4C: Satellite image of an area in northwest Minnesota at the Buffalo River: Green fields show growing crops, brown areas are already harvested fields. Source: NASA Earth Observatory, Jesse Allen (Landsat data, contributed by the United States Geological Survey)

Fig. 4D: An infrared image (Landsat 5 TM) reveals further information: Red indicates crop health, yellow shows infested crop, black indicates flooding, etc. Source: NASA Earth Observatory, Jesse Allen (Landsat data, contributed by the United States Geological Survey)

nun während der Operation das Hirngewebe mit UV-Licht angeregt wird, fluoresziert der Tumor rot, wohingegen das umgebende nicht befallene Gewebe nur schwach bläulich leuchtet (**Abbildung 4 A, B**). Andere Verfahren, die auf der spektralen Analyse von Gewebe und seiner Fluoreszenz beruhen, sind derzeit Gegenstand intensiver neurochirurgischer Forschung [22–24].

Auch hier gibt es Parallelen zu agrarwissenschaftlichen Ansätzen. Neben verschiedenen Versuchen den Ernährungs- und Gesundheitszustand von Feldpflanzen über die spektra-

le Analyse von Satellitenbildern zu bestimmen (**Abbildung 4 C, D**) [6], führten beispielsweise Stafford und Bolam 1998 [25] einen Prototyp eines radiometrischen Sensorsystems, welches auf einer Zugmaschine installiert wird, vor. Inzwischen gibt es von Hydro-Precise auch ein kommerziell erhältliches System auf dem Markt [4].

Elektrophysiologisches Monitoring und Messung der Leitfähigkeit des Bodens

Die sicherste Methode funktionelle Zentren auf der Hirnoberfläche und Leitungsbahnen im Hirngewebe zu identifizieren, ist allerdings die direkte Testung mittels elektrischer Stimulation. Nach Eröffnen des Schädels zu Beginn einer Hirnoperation, können bestimmte Hirnregionen gezielt elektrisch gereizt werden. Die Aktivität im Effektororgan, z.B. dem von der betreffenden Hirnregion gesteuerten Muskel, wird parallel dazu elektrisch, durch aufgeklebte Elektroden oder Nadeln in den entsprechenden Muskeln, gemessen. Löst der elektrische Reiz auf der Hirnoberfläche dann eine Aktivität im betreffenden Muskel aus, ist die gereizte Hirnregion für die Bewegung des betreffenden Muskels zuständig [26, 27]. Diese Testung kann in allen benachbarten Regionen des zu entfernenden Tumors wiederholt werden (**Abbildung 2 G**).

Analog dazu werden auch in der Landwirtschaft Messungen der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens eingesetzt (**Abbildung 2 C**). Mehrere wissenschaftliche Studien bestätigten, dass dieses Verfahren als Indikator insbesondere für die Feuchtigkeit und den Bodentyp geeignet ist [28, 29]. Auch hier ist eine direkte Messung mittels Kontaktelektroden, die in den Boden eingeführt werden oder eine indirekte Messung mittels kontaktfreier Elektroden dicht über dem Boden, möglich. Für beide Varianten der Messung sind inzwischen entsprechende Instrumente kommerziell erhältlich.

Therapiekontrolle – automatisierte Erfassung der Ernteerträge

In der Neurochirurgie hat die Kontrolle des Operationserfolges einen großen Stellenwert. Nicht nur junge Chirurgen müssen ihre Behandlungsergebnisse immer wieder kritisch überprüfen, um eventuell in Zukunft zu noch besseren Ergebnissen zu gelangen. Auch die frühzeitige Identifizierung von Problemen, die im Anschluss an eine Operation auftreten könnten (Infektionen, unvollständige Entfernung eines Tumors usw.) müssen rechtzeitig erkannt und ggf. behandelt werden. Auch hierzu liefert die Anwendung moderner Techniken wie CT oder MRT einen entscheidenden Beitrag.

Ebenso erlauben moderne Erntemaschinen über den Einsatz der GPS-Navigation, eine ortsspezifische Erfassung der Ertragsmengen (**Abbildung 2 D**). Auch hier kann die Auswertung des Ergebnisses für zukünftige Verbesserungen genutzt werden, da der Ertrag den wichtigsten Sensor für die einwirkenden Umweltfaktoren darstellt [30]. Dadurch können Parameter wie Dünge- und Saatmengen oder auch die Wahl der Anbaupflanze hinterfragt und für die Zukunft optimiert werden.

Schlussfolgerungen

Ein großes Problem bei der Individualisierung der Behandlung von Patienten und Flächen ist der damit einhergehende Geräte- und Zeitaufwand [4]. Das zu erwartende Ergebnis bzw. dessen Verbesserung gegenüber dem Ergebnis ohne Einsatz dieser Technologien muss sich in Bezug auf die damit verbundenen Belastungen für den Patienten bzw. die ökologischen Auswirkungen auf die Umwelt, rechtfertigen lassen. Und natürlich spielt auch die ökonomische Seite, besonders in der Landwirtschaft, aber auch im Gesundheitssystem eine immer größere Rolle. Die Entwicklung der letzten 20 Jahre lässt aber wenig Zweifel daran, dass sich Navigationssysteme und entsprechende individualisierten Therapien bzw. eine „individualisierte“ Präzisionslandwirtschaft letztendlich durchsetzen.

Ein weiteres, eher noch größeres Problem stellt die wachsende Datenmenge dar, welche der Landwirt bzw. der Neurochirurg bearbeiten muss. Ein zunehmender Anteil der Arbeitszeit wird auf die Datensichtung, Aufbereitung und Planung verwendet werden müssen. Hier sind intelligente Systeme zur Auswahl und geeigneten Darstellung und Integration des aus den verschiedenen Quellen stammenden Materials notwendig, um die Komplexität der Aufgaben auf einem praktikablen Niveau zu halten. Möglich wäre eine Aufteilung der Arbeit, also ein Outsourcen der Datenanalyse an entsprechende Spezialisten. Damit würde neben dem Einsatz von Maschinen auch die konsequente Umsetzung des zweiten Teils von Albrecht Thaers bereits eingangs zitierter These, die Arbeitsteilung, forciert.

Unabhängig davon, ob es zu solch einer Entwicklung kommt oder nicht, wird die Genauigkeit von Navigations- und Sensorsystemen sowohl in der Neurochirurgie als auch in der Landwirtschaft noch weiter zunehmen. Sinnvolle Grenzen dieser Entwicklung stellen die jeweils kleinsten Einheiten dar, die von Interesse sind. Für den Neurochirurgen ist dies eine einzelne Zelle. Tumore und andere krankhafte Strukturen kommen nicht in kleineren Einheiten vor. In der Landwirtschaft ist vermutlich mit der Erfassung einer einzelnen Pflanze die maximal nötige Ortsauflösung erreicht. Eine solche Auflösung ist aber vermutlich nicht allein mit Navigationssystemen zu verwirklichen, sondern wird nur durch Integration weiterer Informationen wie z. B. der optischen/spektralen Bildanalyse, ermöglicht werden [31, 32].

Literatur

- [1] Thaers wissenschaftliche Lehre, Agronomie – Dreifelderwirtschaft, Humustheorie und Bodenbearbeitung, http://www.albrecht-daniel-thaer.org/Thaer_historisch/5_Lehre/5_4_Agronomie.htm, Zugriff am 13.04.2011
- [2] Lillie, M.C. (1998): Cranial surgery dates back to Mesolithik. *Nature* 391: 854
- [3] Piek, J.; Lidke, G.; Terberger, T. (2011): The Neolithic Skull from Bölkendorf – Evidence for Stone Age Neurosurgery? *Central European Neurosurgery* 72, pp. 42–42
- [4] Stafford, J.V. (2000): Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. *J. Agric. Engng Res.* 76, pp. 267–275
- [5] Die Bibel, Matthäus, 13, V8
- [6] López-Granados, F.; Gómez-Casero, M.T.; Peña-Barragán, J.M. et al. (2010): Classifying Irrigated Crops as Affected by Phenological Stage Using Discriminant Analysis and Neural Networks. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 135, pp. 465–473
- [7] Kuntelhardt, S.R.; Fadini, T.; Finke, M. et al. (2010): Robot-assisted image-guided transcranial magnetic stimulation for somatotopic mapping of the motor cortex: a clinical pilot study. *Acta Neurochir (Wien)* 152(2), pp. 333–343
- [8] Nimsky, C.; Ganslandt, O.; Fahlbusch, R. (2004): Functional neuronavigation and intraoperative MRI. *Adv Tech Stand Neurosurg.* 29, pp. 229–63
- [9] Sakowitz, O.W.; Raabe, A.; Vucak, D. et al. (2006): Contemporary management of aneurysmal subarachnoid hemorrhage in Germany: results of a survey among 100 neurosurgical departments. *Neurosurgery.* 58(1), pp. 137–45
- [10] Jacobs, A.H.; Kracht, L.W.; Gossmann, A. (2005): Imaging in neurooncology. *NeuroRx.* 2(2), pp. 333–47
- [11] Bullard, D.E. (1985) Role of stereotaxic biopsy in the management of patients with intracranial lesions. *Neurol Clin.* 3(4), pp. 817–30
- [12] Stafford, J.V.; Ambler, B. (1994): In-field location using GPS for spatially variable field operations. *Computers and Electronics in Agriculture* 11, pp. 23–36
- [13] Langley, R.B. (1997): GLONASS: review and update. *GPS World* 8(7), pp. 46–51
- [14] Spiller, J.J.; Tapsell, A.; Peckham, R. (1998): Planning of future satellite navigation systems. In: *Proceedings of the Space-based Navigation Industry '98 Conference*, London. Royal Institute of Navigation
- [15] Gumprecht, H.K.; Widenka, D.C.; Lumenta, C.B. (1999): BrainLab Vector-Vision Neuronavigation System: technology and clinical experiences in 131 cases. *Neurosurgery.* 44(1), pp. 97–104
- [16] Kuntelhardt, S.R.; Greke, C.; Keric, N. et al. (2011): Image-guidance for Transcranial Doppler Ultrasonography. *Neurosurgery*, im Druck
- [17] Spetzger, U.; Laborde, G.; Gilsbach, J.M. (1995): Frameless neuronavigation in modern neurosurgery. *Minim Invasive Neurosurg.* 38(4), pp. 163–166
- [18] Miller, P.C.H.; Safford, J.V. (1993): Spatially selective application of herbicide to cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 9(3), pp. 217–229
- [19] Liu, C.Y.; Spicer, M.; Apuzzo, M.L. (2003): The genesis of neurosurgery and the evolution of the neurosurgical operative environment: part II—concepts for future development, 2003 and beyond. *Neurosurgery* 52, pp. 20–33
- [20] Hebeda, K.M.; Saarnak, A.E. Olivo, M. et al. (1998): 5-Aminolevulinic acid induced endogenous porphyrin fluorescence in 9L and C6 brain tumours and in the normal rat brain. *Acta Neurochir;* 140(5), pp. 503–512
- [21] Stummer, W.; Pichlmeier, U.; Meinel, T. et al. (2006): Fluorescence-guided surgery with 5-aminolevulinic acid for resection of malignant glioma: a randomised controlled multicentre phase III trial. *Lancet Oncol.* 7(5), pp. 392–401
- [22] Leppert, J.; Krajewski, J.; Kuntelhardt, S.R. et al. (2006): Multiphoton excitation of autofluorescence for microscopy of glioma tissue. *Neurosurgery* 58(4), pp. 759–767
- [23] Kuntelhardt, S.R.; Leppert, J.; Krajewski, J. et al. (2007): Imaging of brain and brain tumor specimens by time-resolved multiphoton excitation microscopy ex vivo. *Neuro Oncol.* 9(2), pp. 103–112
- [24] Steiner, G.; Küchler, S.; Hermann, A. et al. (2008): Rapid and label-free classification of human glioma cells by infrared spectroscopic imaging. *Cytometry A.* 73A(12), pp. 1158–1164
- [25] Stafford, J.V.; Bolam, H.C. (1998): Near-ground and aerial radiometry imaging for assessing spatial variability in crop condition. In: *Proceedings of 4th International Conference on Precision Agriculture*, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 291–302
- [26] Rusyniak, W.G.; Ireland, P.D.; Radley, M.G. et al. (1992): Ultrasonographic and electrophysiological adjuncts to surgery within the brain stem: technical note. *Neurosurgery* 31(4), pp. 798–800
- [27] Duffau, H.; Capelle, L.; Denvil, D. et al. (2003): Usefulness of intraoperative electrical subcortical mapping during surgery for low-grade gliomas located within eloquent brain regions: functional results in a consecutive series of 103 patients. *J Neurosurg.* 98(4), pp. 764–778
- [28] Lund, E.D.; Christy, C.D.; Drummond, P.E. (1999): Practical applications of soil electrical conductivity mapping. In: *Precision '99; Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Vol 2, Sheffield Academic Press, Großbritannien, pp. 771–780
- [29] Suddeth, K.A.; Kitchen, N.R.; Hughes, D.F. et al. (1995): Electromagnetic induction sensing as an indicator of productivity on claypan soils. In: *Site-Specific Management for Agricultural Systems*, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 671–681
- [30] Legg B.J.; Stafford J.V. (1998): Precision agriculture-new technologies. In: *Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference-Pests&Diseases*, British Crop Protection Council, pp. 1143–1150
- [31] Kuntelhardt, S.R.; Caarls, W.; deVries A.H.B. et al. (2010): Specific Visualization of Glioma Cells in Living Low-grade Tumor Tissue. *Plos one* 5(6): e11323
- [32] Southall, B.; Marchant, J.A.; Hague, T. et al. (1998): Model based tracking for navigation and segmentation. In: *Proceedings 5th European Conference on Computer Vision*, Freiburg, Deutschland

Autoren

PD Dr. med. Sven R. Kantelhardt ist als Oberarzt in der Neurochirurgischen Klinik und Poliklinik der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz tätig. Sein wissenschaftlicher Schwerpunkt ist die Entwicklung und intraoperative Anwendung von modernen Sensorsystemen und Navigationsverfahren in der Neurochirurgie, Neurochirurgische Klinik, Universitätsmedizin Mainz, Langenbeckstr. 1, 55131 Mainz, E-Mail: sven.kantelhardt@unimedizin-mainz.de

Dipl.-Ing. (FH) Christoph von Breitenbuch ist Geschäftsführer der Agrar-Betriebsgemeinschaft Leine-Solling GbR sowie der Agrar-Dienste Leine-Solling GmbH & Co. KG, Hauptstr. 1, 37176 Pahrensen, E-Mail: Agrar-BG@Leine-Solling.com

Danksagung

Wir danken Frau Nicola Kleinecke vom Niedersächsisches Landesmuseum Hannover, sowie Frau Dr. Ulrike Binding vom Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt für das Bildmaterial und die freundliche Unterstützung.