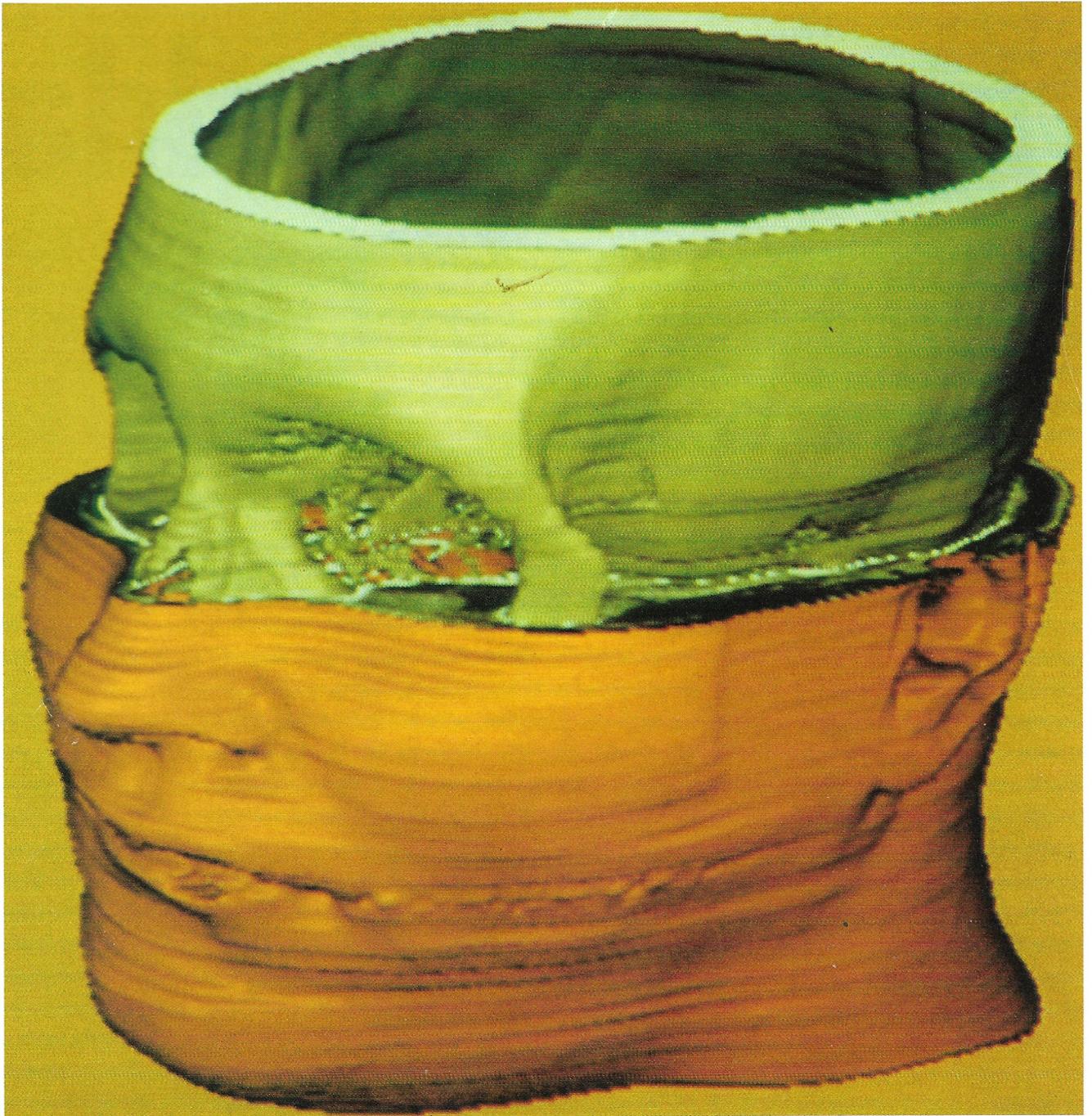


bild der Wissenschaft



Sonderdruck

**3D-Computergrafik
in der Medizin**

3D-Computergrafik in der Medizin

Diagnose glasklar

So könnte der Traum eines Arztes aussehen: Er hat ein Duplikat eines Patienten vor sich, an dem er jedes Organ in allen Einzelheiten untersuchen und sogar operieren kann. Selbst eine mißlungene Operation wäre wieder rückgängig zu machen. Dieser Traum könnte bald in Erfüllung gehen – mit Hilfe der Informatik. Die dreidimensionale Bildverarbeitung eröffnet ganz neue Perspektiven für die medizinische Diagnostik und Therapie.

Für Besucher unseres Bildverarbeitungslabors sieht es schon ein wenig aus wie Zauberei: Auf einem Bildschirm erscheint der Kopf eines Patienten, der auf Tastendruck sogar beginnt, sich zu drehen. Gar gespenstisch wird es, wenn eine Gesichtshälfte plötzlich verschwindet, der Kopf nur noch halb zu sehen ist, wie von einem Säbelhieb zerteilt. Auf der Schnittfläche erscheinen wie beim anatomischen Präparat Gewebe, Knochen und Gehirnmasse.

„Die Metastase muß weiter seitlich liegen. Ich fahre die Schnittfläche etwas

mehr nach links.“ Wie von Zauberhand vervollständigt sich der Kopf ein wenig, bis der Tumor als dunkler Schatten auftaucht. „Da ist sie. Der sagittale Schnitt ist ungünstig. Ihre Ausdehnung ist wohl im koronaren Schnitt besser zu sehen.“

Was der Blick in das Labor offenbart, sieht zunächst wie eine makabre Spielerei aus. Obwohl natürlich eine gewisse naturwissenschaftliche Experimentierfreude eine Rolle spielt, ist der Hintergrund durchaus ernst.

Es geht hier nämlich um die Entwicklung neuester Verfahren der medizinischen Diagnostik und Therapieplanung. Möglich wurde dieser dreidimensionale Blick ins Innere des Körpers durch neue Entwicklungen der Informatik, die die klassische bildgebende Diagnostik revolutioniert haben.

Seit Wilhelm Konrad Röntgens Entdeckung der Röntgenstrahlen im Jahre 1895 hat sich die medizinische bildgebende Diagnostik mehr als 60 Jahre lang allein auf die Röntgentechnik gestützt. Zwar war es möglich, die Qualität der Bilder unter Verminderung der Strahlenbelastung stetig zu verbessern, das Prinzip blieb jedoch stets das gleiche: Röntgenstrahlen werden durch den

Körper des Patienten geschickt und von den durchstrahlten Partien verschieden geschwächt. Das sich ergebende Schattenbild wird auf einem Film oder einem Leuchtschirm sichtbar gemacht.

Wenn der medizinische Laie ein Röntgenbild betrachtet, fällt es ihm oft schwer, den Befund des Radiologen nachzuvollziehen. Das liegt zum einen daran, daß sich im Schattenbild alle im Blickfeld liegenden Organe überlagern. Zum anderen liefert die Röntgentechnik in vielen Fällen nur einen schwachen Kontrast.

Der Radiologe muß deshalb die Schatten aufgrund seines anatomischen Wissens und seiner Erfahrung entschlüsseln und richtig deuten. Die sichere Interpretation von Röntgenbildern erfordert somit eine langjährige spezielle Ausbildung in Theorie und Praxis.

In den letzten Jahren wurden nun unter anderem aufgrund der Fortschritte der Informatik neue Verfahren entwickelt, die dieses Problem weitgehend aus dem Wege räumen konnten: Die Computer-Tomographie (CT) ermöglicht die Darstellung detaillierter Schnittbilder des menschlichen Körpers. Die Kernspintomographie (oder

Unser Titelbild:

Der obere Teil des Kopfes ist weg, wie von einem Säbelhieb zerteilt. Das Bild zeigt einen Schädel, teils in seiner Knochen- und teils in seiner Weichteilstruktur. Die dreidimensionale Computergrafik eröffnet bisher nicht gekannte Möglichkeiten.

Magnet - Resonanz - Tomographie, MRT) liefert darüber hinaus noch Bilder mit hohem Kontrast für Weichteile.

Bei beiden Verfahren werden die vom Objekt ausgehenden Signale zunächst in einer bildlich nicht interpretierbaren Form von einem Rechner erfaßt, gespeichert und anschließend durch im Prinzip einfache, aber rechnerisch aufwendige Verfahren in Schnittbilder (Tomogramme) umgewandelt.

Der Nutzen dieser neuen Verfahren für die medizinische Diagnostik ist inzwischen unbestritten. Dennoch hat die Schnittbildtechnik einen entscheidenden Nachteil: Die erzeugten zweidimensionalen (2D) Bilder geben immer nur einen beschränkten Ausschnitt der zu untersuchenden dreidimensionalen

(3D) Organe wieder. In den seltensten Fällen ist die für einen Befund notwendige Information aus einem einzelnen Schnittbild zu entnehmen.

Deswegen muß meist eine Serie von räumlich aufeinanderfolgenden Bildern aufgenommen werden, aus denen sich der Radiologe dann eine Vorstellung von der räumlichen Ausdehnung und Form des untersuchten Organs machen kann.

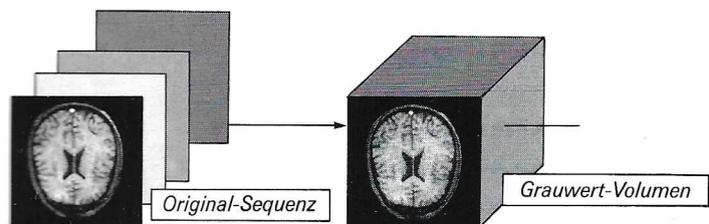
Nun gibt es aber prinzipiell keinen Grund dafür, menschliche Organe immer in ebenen Bildern darzustellen und dem Radiologen die schwierige Aufgabe der dreidimensionalen Rekonstruktion aufzubürden. Denn die Umwandlung von Schnittbildfolgen in eine dreidimensionale Darstellung ist ein geome-

trisches Problem, das sich mit einem Rechner – allerdings recht großer Leistung – lösen läßt.

So liegt es nahe zu versuchen, die menschlichen Organe so darzustellen, wie man sie von eigener Anschauung oder plastischen Abbildungen im Anatomiebuch kennt. Von solchen Bildern kann man erwarten, daß sie den Radiologen bei der Diagnostik entlasten und dem therapeutisch tätigen Arzt, wie dem Chirurgen oder Strahlentherapeuten, die Arbeit entscheidend vereinfachen.

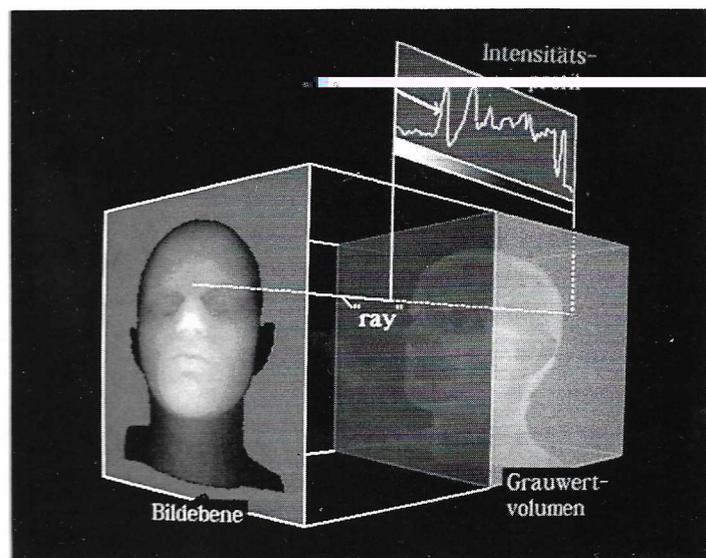
Und: Wäre es nicht auch ein Vorteil, wenn dem Patienten im wahrsten Sinne des Wortes sein Krankheitsbild verständlich würde? In der Tat hat diese Motivation eine Reihe von Forschungs-

So erzeugt das Computerprogramm die 3D-Ansichten

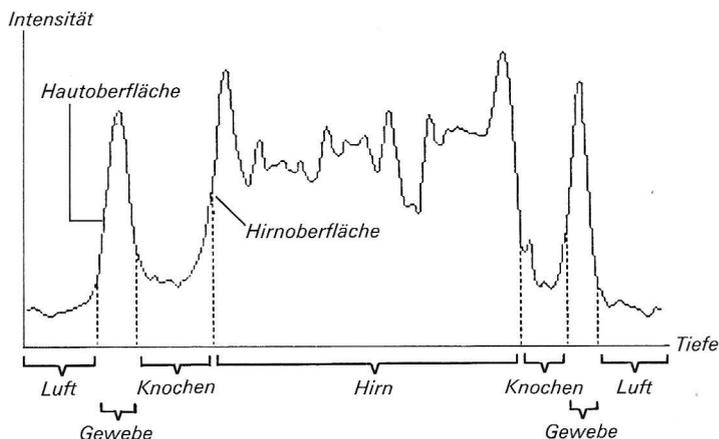


Der Bereich, in dem das abzubildende Organ liegt, wird durch eine Folge von Tomogrammen dargestellt. Aus der Bildfolge wird ein Bildvolumen erzeugt, indem fehlende Schichten durch Interpolation ergänzt werden. Das Bildvolumen besteht je nach Organ und Abbildungsverfahren aus 16 bis 64 Millionen einzelnen Volumenelementen (Voxel).

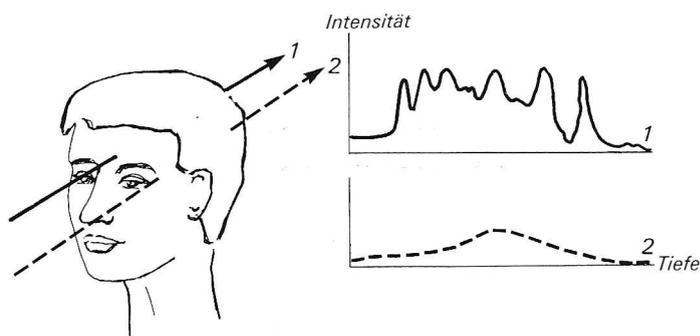
Aus der gewählten Blickrichtung durchkämmt das Programm entlang eines Abtaststrahles das Volumen, das im gezeigten Fall aus Daten der Kernspin-Tomographie besteht. Es „sieht“ dabei ein Intensitätsprofil. Aus diesem wird der auf der Bildebene darzustellende Aspekt berechnet (Raycasting-Methode).

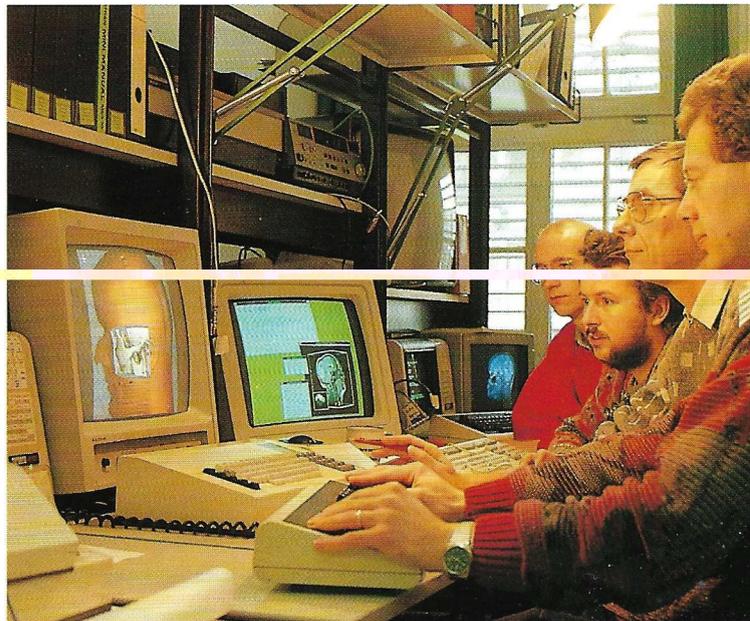
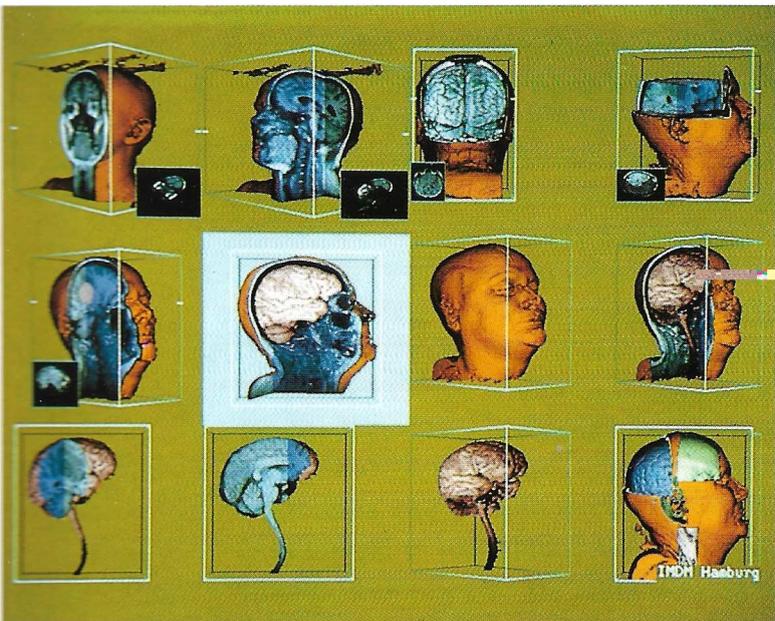
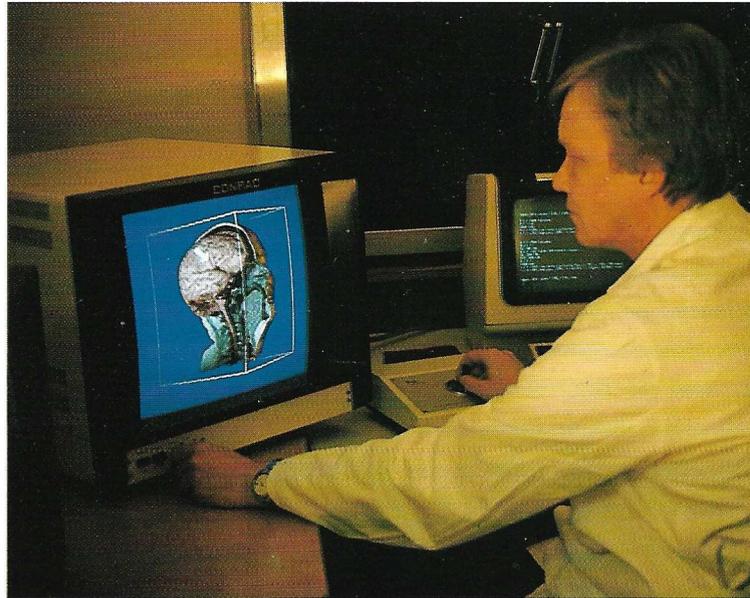
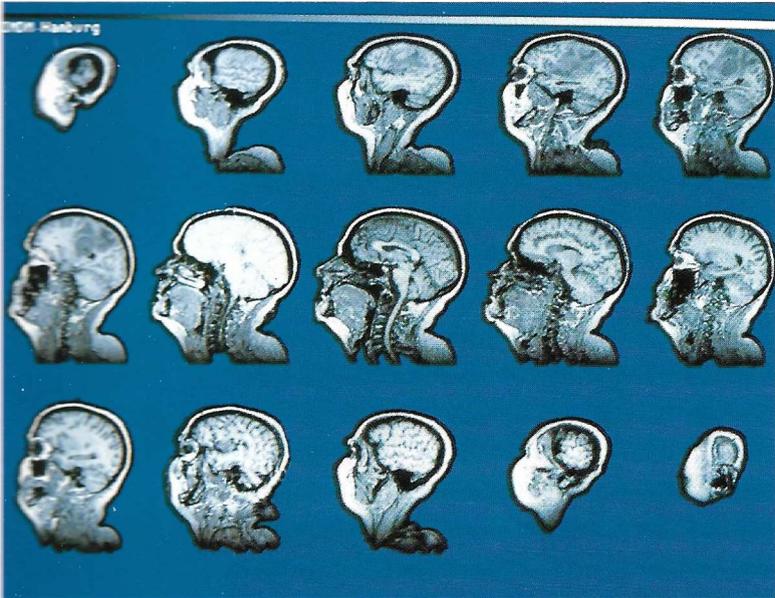
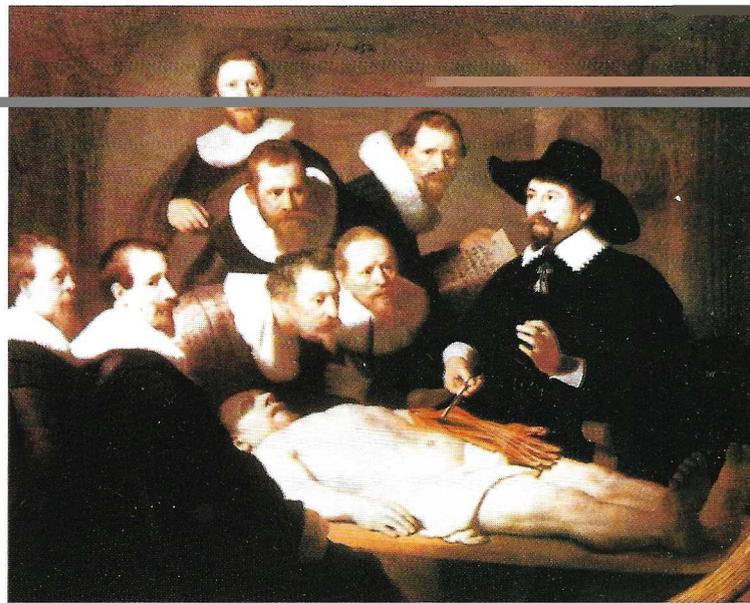
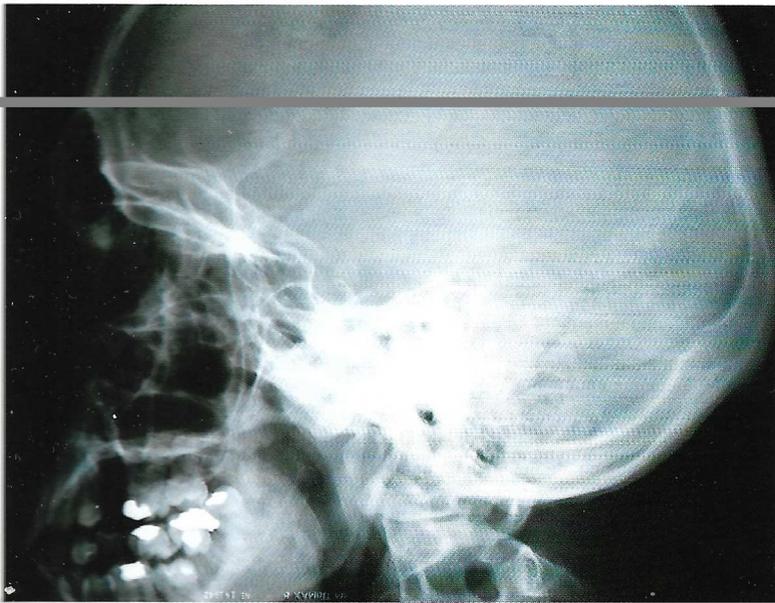


Dies geschieht durch Analyse des Kurvenverlaufs, in dem die verschiedenen Bestandteile wie Knochen oder Hirnsubstanz ein charakteristisches Muster ergeben. So stellen sich Haut- oder Hirnoberfläche als steile Anstiege der Kurve dar. Je nach Wunsch des Betrachters können Oberflächen, Schnitte oder durchsichtige Projektionen aus dem Profil berechnet werden.



Um Oberflächen naturgetreu darstellen zu können, muß an jedem Punkt ihr Neigungswinkel bestimmt werden. Vereinfacht geschieht dies so: Der Anstieg des Intensitätsprofils an der Oberfläche ist um so steiler, je mehr diese senkrecht zur Beobachtungsrichtung liegt. Aus dieser Gesetzmäßigkeit läßt sich der Winkel abschätzen. Nimmt man nun eine Beleuchtungsrichtung und gewisse Oberflächeneigenschaften (zum Beispiel stumpf, glänzend) an, so kann das Programm die Reflexion des Lichtes simulieren und somit ein natürliches Bild erscheinen lassen.





Die Bilder links zeigen die Entwicklungsstufen der bildgebenden Verfahren. Klassische Röntgentechnik: Die obere Abbildung ist ein klassisches Röntgenbild eines Kopfes. Weichteile wie das Hirn sind nicht zu erkennen. Mit viel Erfahrung kann sich der Radiologe ein Bild von der knöchernen Struktur des Kopfes machen. Tomographie: Mit Hilfe moderner Computer-Technik lassen sich Schnittbilder erzeugen. Diese sind überlagerungsfrei, die 3D-Struktur kann jedoch nur aus der Betrachtung mehrerer Bilder erschlossen werden. Die mittlere Bildsequenz durch einen Schädel wurde von einem Kernspin-Tomographen erzeugt. 3D-Bildverarbeitung: Mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung kann dieselbe Bildsequenz in 3D-Darstellungen umgewandelt werden, die der echten Anatomie sehr nahe kommen und deshalb von vornherein verständlich sind (unten). Bilder rechts, oben: Anatomie vor 350 Jahren; Rembrandts „Anatomie des Dr. Tulp“. Mitte: Die Anatomie der Zukunft. Anatom Prof. Schulze will die Ergebnisse von VOXEL-MAN für seine Anatomie-Vorlesung verwenden. Unten: Nicht immer leistet das Programm, was der Informatiker sich vorgestellt hat. Michael Bomans, Martin Riemer, der Autor und Ulf Tiede beim Programmtest.

projekten ins Leben gerufen, unter anderem auch am Institut des Autors, deren Ergebnisse zum Teil schon zu praktischen Anwendungen geführt haben.

Computer-graphische Darstellungen von Objekten sind natürlich prinzipiell nichts Neues. So gibt es zum Beispiel Verfahren, Automobilkarosserien oder Flugzeuge am Bildschirm zu konstruieren, zu drehen oder zu verändern (Computer Aided Design, CAD). Auf diesen Verfahren beruhen auch die ersten medizinischen Anwendungen.

Beim CAD handelt es sich allerdings immer um Objekte, bei denen allein die Oberflächen interessant sind. Diese liegen zudem im allgemeinen in einer mathematisch exakt beschriebenen Form vor.

Medizinische Objekte lassen sich dagegen in der Regel nicht mathematisch exakt fassen. Das auf dem Bildschirm darzustellende Objekt liegt hier als eine Sequenz von Tomogrammen vor, die man als ein Volumen aus verschiedenen Dichtewerten betrachten kann. Die Dichteunterschiede in diesem „Bildvolumen“ müssen dem Betrachter veranschaulicht werden.

Aus unserem Alltag kennen wir keine ähnlichen Objekte. Am ehesten wäre ein solches „Bildvolumen“ noch mit einem gläsernen Objekt mit ortsabhängiger Lichtdurchlässigkeit zu vergleichen. In einem solchen Objekt Dichteunterschiede zu lokalisieren, ist für das menschliche Auge sehr schwierig.

Leichter fällt es, wenn man das Objekt auf Oberflächen reduziert. Was sind aber bei tomographischen Daten Oberflächen? Nur bei Haut und Knochen sind die Dichteunterschiede zur Umgebung so groß, daß man sie ohne weiteres zur Definition einer Oberfläche heranziehen kann.

Ganz zu schweigen von pathologischen Strukturen, die ja selbst der Radiologe nur nach langem Training, und auch dann oft nur vage, vom gesunden Gewebe abgrenzen kann. Für die Darstellung des Inhalts radiologischer Bildvolumina mußten deshalb neue Verfahren entwickelt werden.

Zunächst ausgehend von den Ansätzen der klassischen Computergraphik, wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen Verfahren für die medizinische Anwendung entwickelt. An meinem Institut am Universitäts-Krankenhaus Eppendorf in Hamburg wurde in den ver-

gangenen Jahren das Strahlabtastverfahren (Ray casting) vorangetrieben und in Form des Programms VOXEL-MAN erprobt.

Das Programm ermöglicht die dreidimensionale Darstellung von medizinischen Objekten und deren Untersuchung durch Drehen, Schneiden, Sezieren und Durchleuchten. Auch die Bildbeispiele in diesem Artikel wurden mit dem VOXEL-MAN-Programm erzeugt.

Als Laie ist man von den Bildern sofort begeistert, die Kollegen aus der klinischen Medizin fragen aber natürlich zuerst nach deren Nutzen. Oft wird gesagt, diese Bilder sähen ja sehr schön aus („sexy“ sagen die amerikanischen Kollegen), aber habe der Patient wirklich etwas davon?

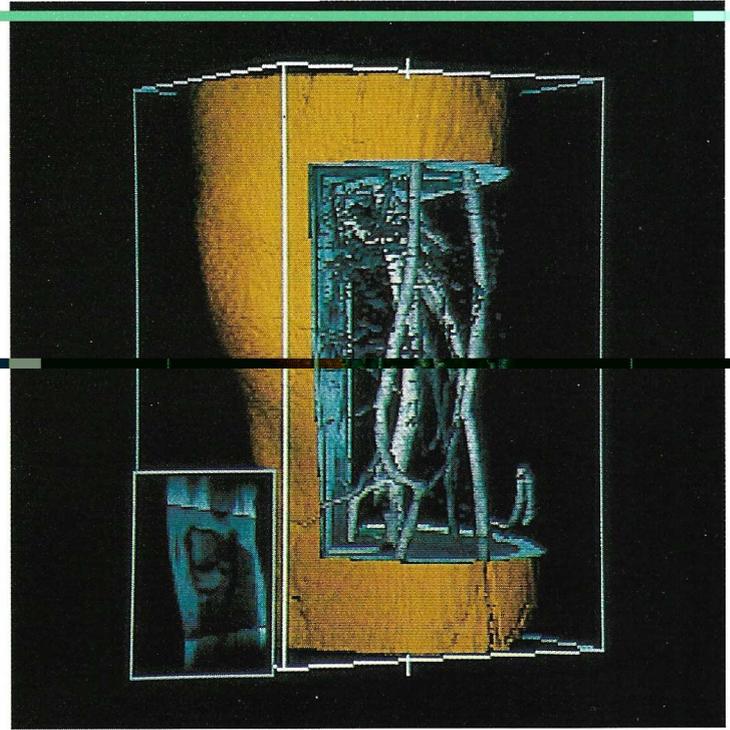
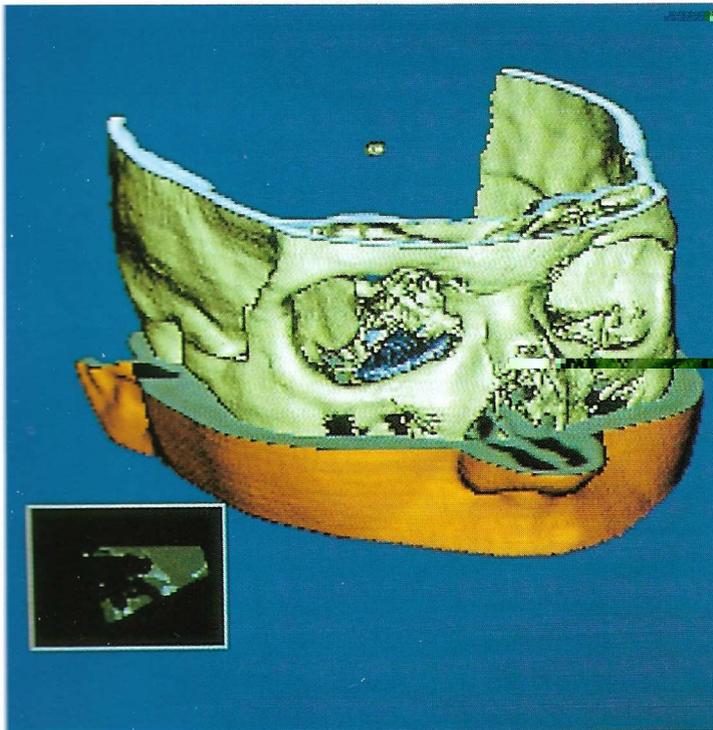
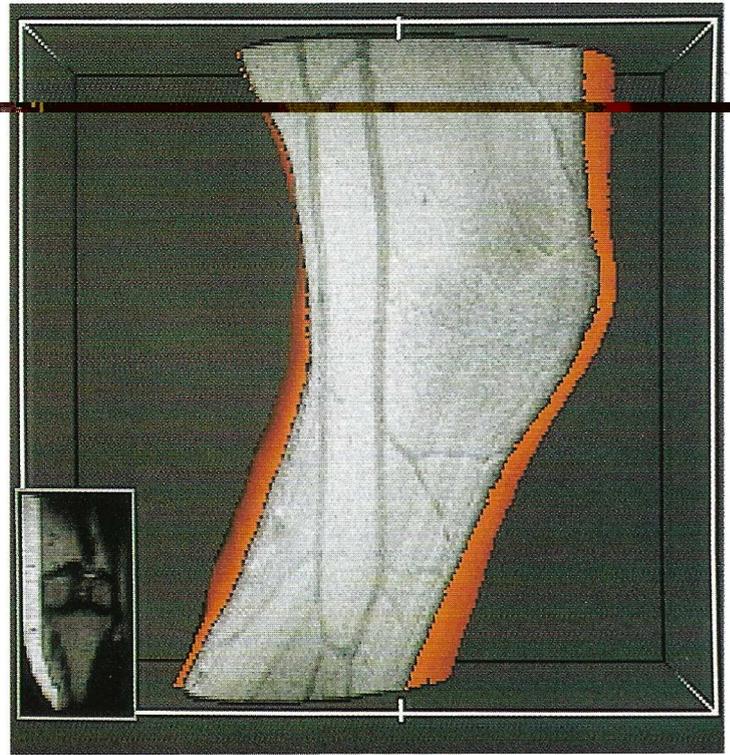
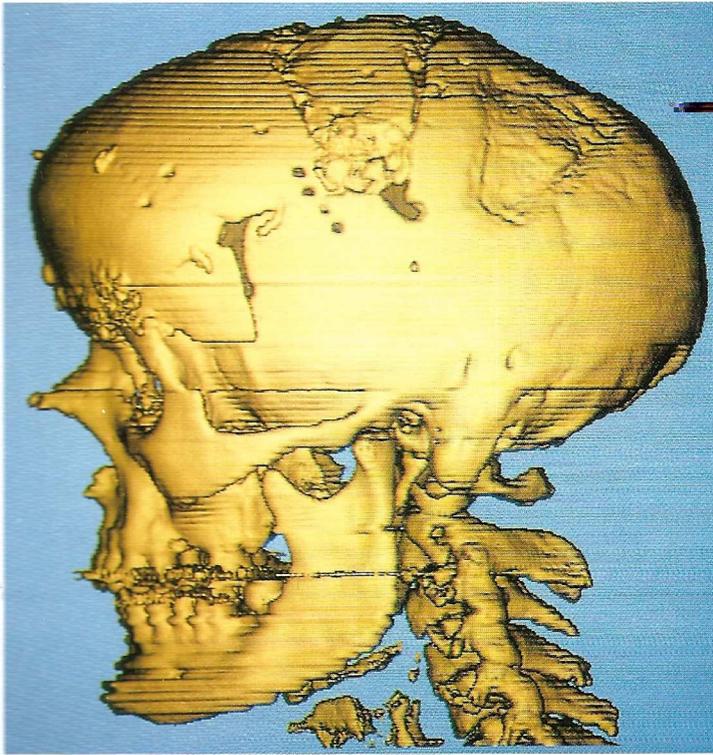
Dem kann man entgegen, daß es ja zunächst einmal um die Erforschung grundlegender Gesetzmäßigkeiten und Methoden der medizinischen Informatik geht, um Erkenntnisgewinn also, der seinen Wert unabhängig von einer unmittelbaren praktischen Anwendung hat. Gerade die Geschichte der medizinischen Abbildungsverfahren zeigt, daß die wesentlichen Fortschritte nicht durch Forderungen aus der Praxis, sondern durch Kreativität erzielt wurden – oft gegen die Skepsis der potentiellen Anwender.

Häufig ergeben sich Anwendungen erst lange nach der Entdeckung eines naturwissenschaftlichen Prinzips. Hätte Heinrich Hertz wohl den Repräsentanten einer Fernsehanstalt über den Nutzen elektromagnetischer Wellen für das Farbfernsehen befragen können?

Glücklicherweise ist aber eine Reihe von praktischen Anwendungen absehbar und manchmal schon realisiert. Als nächstliegendes Anwendungsgebiet kommt die Radiologie in Frage.

Hier hat es die neue Technik zunächst schwer, das ausgeprägte räumliche Vorstellungsvermögen des Radiologen zu übertreffen. Trotzdem zeichnen sich Anwendungsmöglichkeiten der 3D-Technik ab, die die Arbeit des Radiologen zumindest erleichtern können.

Bei der Kernspintomographie zum Beispiel können Schnittbilder entlang beliebiger Ebenen erzeugt werden. Der Radiologe ändert Lage und Richtung der Schnitte so lange, bis er überzeugt ist, daß er den Befund in der optimalen Darstellung erfaßt hat. Dieser Prozeß



Links oben: Dieser Patient hatte einen Turmschädel. Die Gesichts-Chirurgen trugen Teile des Schädeldaches ab und setzten sie in neuer Form zusammen. Deutlich sind noch die operationsbedingten Knochennähte sowie Bohrlöcher zu sehen. Heute ist der Schädel soweit regeneriert, daß der Patient beim Fußballspiel den Kopfball durchaus nicht zu scheuen braucht. Links unten: Diesem Patienten mußte eine

Keramikscheibe (blau) in die Augenhöhle implantiert werden. Die 3D-Darstellung zeigt, daß sie auch Jahre nach der Operation noch an der richtigen Stelle liegt. Die Kernspin-Tomographie erlaubt erstmalig die Darstellung von Blutgefäßen. Da Gefäße praktisch nie in einer Ebene verlaufen, sind sie auf einem einzelnen tomographischen Schnittbild nicht vollständig zu sehen. Das Bild oben rechts zeigt

ein Knie, bei dem die Oberflächen von Haut und Knochen bis zu einer Tiefe von 1 cm transparent dargestellt sind – also wie bei einem klassischen Röntgenbild, mit dem Unterschied, daß die Tiefe wählbar ist. Im unteren Bild sieht man die tief liegenden Blutgefäße als Oberflächendarstellung. Eine Reihe von Anwendungen des Verfahrens sind absehbar und zum Teil schon realisiert, etwa in der Radiologie.

kann längere Zeit in Anspruch nehmen und insbesondere für den Patienten lästig sein.

Trotzdem kann es vorkommen, daß die Sequenz von Ergebnisbildern nicht die gewünschte Information enthält. Besonders bei Schnitten, die nicht parallel zu den Körperachsen verlaufen, ist die Orientierung auch für den erfahrenen Radiologen schwierig.

Bei neueren Verfahren der Kernspin-Tomographie jedoch können sehr viele parallele Schnittbilder von der Körperregion, in der sich das zu untersuchende Organ befindet, in kurzer Zeit (zirka 15 Minuten) aufgenommen werden. Nachdem der Patient den Computer-Tomographen verlassen hat, kann das gesamte erfaßte und vom Rechner gespeicherte Bildvolumen unabhängig vom Computer-Tomographen und vom Patienten untersucht werden.

Dazu wird eine äußere Ansicht des erfaßten Körperteils erzeugt, an der sich der Radiologe bei der Führung der Schnitte, die er in beliebigen Richtungen anbringen kann, orientiert. In dem resultierenden Bild ist zwar der Befund, zum Beispiel ein Tumor, nicht sichtbar, aber dessen räumliche Lage ist durch verschiedene Schnitte leicht zu ermitteln.

Für die Darstellung von Gefäßen ist auch diese Schnittbild-Technik ungeeignet, weil man die Gefäße – wie auch immer die Schnittebenen gewählt werden – nur in kleinen Ausschnitten sieht. 3D-Darstellungen können dagegen den Gefäßverlauf in einem einzigen Bild erfassen.

Die effektivsten Anwendungen hat die 3D-Technik dort, wo aufgrund von Bildern therapeutische Maßnahmen getroffen werden – zum Beispiel bei der Operationsplanung in der Knochenchirurgie. Hier muß der Operateur oft komplizierte Mißbildungen oder Brüche vor der Operation beurteilen, die Operation selbst planen und hinterher das Operationsergebnis beurteilen.

Für den Chirurgen ist es ein entscheidender Fortschritt, daß er durch die 3D-Verfahren vor und nach dem Eingriff Knochenstrukturen so sehen kann, wie es ihm bisher nur während des Eingriffs möglich war. Darüber hinaus lassen sich die Ergebnisse unterschiedlicher Vorgehensweisen im Rechner simulieren.

Diese Anwendungen konzentrieren sich auf die Darstellung von Haut und

Knochen, weil sich deren Oberflächen wegen ihres hohen Kontrasts relativ leicht aus Computer-Tomogrammen gewinnen lassen. Meist werden jedoch Weichteile operiert. Auch diese lassen sich von der Kernspin-Tomographie am besten darstellen.

Die Identifizierung von Oberflächen solcher Weichteile ist prinzipiell schwierig. In einzelnen Fällen, wie zum Beispiel bei der Hirnoberfläche, gelingt es jedoch recht gut. Hier wird die Anwendung bei der neurochirurgischen Operationsplanung nicht mehr lange auf sich warten lassen.

Wenn den Laien auch sicherlich mehr der praktische Nutzen bei der Heilung von Krankheiten interessiert, so sind die beschriebenen Verfahren doch auch für die medizinische Grundlagenforschung von Bedeutung. Ein Beispiel aus der mikroskopischen Anatomie mag das verdeutlichen:

Im Gegensatz zu den makroskopischen Objekten, deren räumliche Struktur man aus der Anschauung kennt, konnte die Organisation mikroskopischer Objekte, zum Beispiel von Zell- und Gewebsverbänden, bisher nur über Schnittbildsequenzen analysiert werden.

3D-Methoden ermöglichen nun zum ersten Mal einen Einblick in die tatsächliche Ausgestaltung räumlicher Strukturen. So konnte mit Hilfe der 3D-Darstellung von mikroskopischen Bildern erstmalig die räumliche Anordnung von Keimzellen in menschlichen Samenkanälchen entschlüsselt werden.

Eine sich abzeichnende Anwendung, an die man bei der Entwicklung des Verfahrens gar nicht gedacht hatte, ist der Einsatz des Bildmaterials für die Aus- und Weiterbildung von Studenten und Ärzten.

Konnte man Anatomie bisher nur durch Sektion, anhand von Präparaten oder Bildern aus dem Anatomie-Atlas lernen, wird es in Zukunft möglich sein, bildliche Duplikate von lebenden Menschen am Bildschirm zu untersuchen. Da die Anzahl der möglichen Kopien praktisch unbegrenzt ist, wäre es durchaus vorstellbar, daß viele Medizinstudenten im Präparierkurs gleichzeitig, aber jeder für sich, das gleiche Objekt präparieren können.

Bei aller Euphorie darf man natürlich nicht vergessen, daß es bis zu einer breiten Anwendung noch einige Probleme

zu lösen gibt. Auf den ersten Blick könnte man denken, das Hauptproblem sei die riesige Computer-Kapazität, die man zur Erzeugung der Bilder braucht. Um nämlich die am Bildschirm dargestellten Objekte ohne wesentliche Verzögerung drehen oder schneiden zu können, bräuchte man einen Rechner mit einer Kapazität von etwa 100 MIPS (Millionen Instruktionen pro Sekunde). Eine solche Kapazität haben bisher nur die größten verfügbaren Rechner.

Beim Programm VOXEL-MAN, das auf einem mittelgroßen Rechner läuft, muß man sich etwa eine Minute gedulden, bis die gewünschte Ansicht eines Objektes auf dem Bildschirm erscheint. Der schnelle Fortschritt der Rechner-technologie und auch die Anwendung von Spezialrechnern läßt jedoch erwarten, daß in naher Zukunft schnelle Systeme zu einem erschwinglichen Preis entwickelt werden können.

Mehr Kopfzerbrechen macht den Entwicklern der neuen Techniken dagegen das Problem, wie man die Bedienung eines Systems zur 3D-Darstellung so gestaltet, daß auch ein Computerlaie mit ihm problemlos umgehen kann. Wenn wir ein reales Objekt untersuchen wollen, können wir es in die Hand nehmen, es drehen, mit dem Skalpell sezieren oder die Beleuchtung ändern. Für ein nur auf dem Bildschirm vorhandenes Abbild stehen uns diese Möglichkeiten nicht zur Verfügung.

Beim Programm VOXEL-MAN kann der Benutzer mehr als 30 verschiedene Parameter – und diese noch in unzähligen Kombinationen – angeben, etwa Drehwinkel, Beleuchtungswinkel und Schnittführung. All dies dem Computer in einer Form mitzuteilen, die dem Hantieren mit realen Objekten nahekommt, ist nicht einfach. Nicht umsonst beschäftigt sich ja ein ganzes Fachgebiet der Informatik mit der Mensch-Rechner-Kommunikation.

Bei den gegenwärtigen Systemen ist es immer noch so, daß sich der Mensch mehr nach den Eigenschaften des Computers richten muß als umgekehrt. Hinzu kommt eine gewisse Berührungangst gegenüber Computern, die man bei der gegenwärtigen Ärztegeneration vielfach vorfindet. Die heranwachsende Generation, die schon in der Schule und auch während des Studiums mit Rechnern zu tun hat, wird mit der neuen Technik sicher unbefangener umgehen.

Medizin

So kann in Zukunft das wahr werden, was bislang nur als Utopie in den Köpfen der Forscher herumspukte: Anstatt einzelne Bilder mit vorgegebenen Aspekten des Patienten anzufertigen, wird der Radiologe in Zukunft ein rechnergespeichertes Duplikat des Patienten erzeugen.

Es wird sogar möglich sein, die Informationen von verschiedenen bildgebenden Verfahren – der Computer-Tomographie, der Kernspin-Tomographie oder der Positronenemissions-Tomographie –, die verschiedenartige Informationen über den Patienten liefern, gemeinsam auszuwerten. Der Arzt

kann das Duplikat dann untersuchen wie ein Anatom, der zusätzlich noch Röntgenaugen hat.

Auch die Verbesserung von Forschungs- und Ausbildungsmöglichkeiten wird letzten Endes den Patienten nutzen. Sicherlich werden sich durch die Einführung der neuen Techniken auch die Berufsbilder in den genannten medizinischen Disziplinen ändern.

Die hier beschriebenen Verfahren sind auch ein gutes Beispiel dafür, daß unsere Welt durch Methoden der Informatik nicht unbedingt komplizierter werden muß. Wir kennen alle das oft zitierte Beispiel von der Stromrech-



Karl Heinz Höhne hat in Würzburg und Genf Physik studiert. 1978 wurde er auf den Lehrstuhl für Informatik in der Medizin der Universität Hamburg berufen, wo er derzeit auch Direktor des Instituts für Mathematik und Datenverarbeitung am Universitäts-Krankenhaus Eppendorf ist.

nung, die – seit vom Computer erstellt – nicht mehr verständlich ist. Die Bilder dieses Artikels sind dagegen für Ärzte, besonders aber für Laien, viel besser zu begreifen als alle Darstellungen aus der Vor-Computer-Zeit. Ω

Sonderdruck aus:

bild der wissenschaft 7-1988

© Deutsche Verlags-Anstalt GmbH
Neckarstraße 121, D-7000 Stuttgart 1
Telefon: (0711) 2631-0

Gründungsherausgeber:
Professor Dr. rer. nat. habil. Heinz Haber
Chefredakteur:
Wolfram Huncke (verantwortlich)

Redaktion: Thiagar Devendran
Bildredaktion: Rolf Weinert
Grafiken: Uschi Wipfler
Grafische Gestaltung:
Franz Josef Bergheim, Heike Reuwand
Produktion: Bernd Penkwitt