

VOXEL-MAN: Virtuelle Körper für die Medizin

Karl Heinz Höhne

Der erste Computer im UKE

Man kann es sich heute gar nicht mehr vorstellen: 1969 gab es im UKE noch keinen einzigen Computer. Leistungsfähige Rechner konnten sich damals nur Großforschungs-Institutionen wie zum Beispiel das Deutsche Elektronensynchrotron DESY in Bahrenfeld leisten. Dort war ich zu dieser Zeit ein frisch in Physik promovierter wissenschaftlicher Mitarbeiter und war über meinen weiteren Berufsweg unschlüssig. Mich interessierte schon damals weniger die reine Physik, sondern mehr das experimentelle Instrumentarium, bei dem mich die neuen Möglichkeiten des Computers besonders faszinierten. Da traf es sich, dass der damalige Leiter des Klinisch-Chemischen Labors der II. Medizinischen Klinik Prof. Dr. Klaus-Dieter Voigt und der Leiter des DESY-Rechenzentrums Dr. Hans Otto Wüster die Idee hatten, die Möglichkeiten des Computer-Einsatzes für die Medizin auszuloten. Ich wurde gefragt, ob ich eine Arbeitsgruppe hierfür aufbauen wolle. Medizin hatte mich bis dahin eigentlich weniger interessiert, aber ich brauchte nicht lange zu überlegen, um das Angebot als eine Herausforderung zu akzeptieren, die auf irgendeine Art Zukunft haben müsse.

Erste Projekte der Datenverarbeitung in Zusammenarbeit mit DESY

Messwerterfassung von Analysenautomaten (SMA-1, SMA-6, Coulter Counter) und deren Qualitätskontrolle im damaligen Cito-Labor der II. Medizinischen Klinik wurden als erstes Anwendungsgebiet identifiziert. Bei der damals großzügigen Finanzierung der Großforschungszentren war die Beschaffung eines Mini-Computers Digital Equipment PDP-8i (Abb. 1) zum Preis von 150 000 DM kein Problem. Seine Hauptspeicherkapazität von 8 Kiloworten zu 12 bit war für heutige Verhältnisse lächerlich klein. Für damalige Verhältnisse ungewöhnlich, wurde er für die Datenspeicherung durch eine Datenleitung zur Datenspeicherung mit den Großrechnern des Rechenzentrums von DESY verbunden. Das auf dieser Basis entwickelte System mit dem Namen LABMAT war eines der ersten seiner Art und wurde bis zur Übernahme der Labordatenverarbeitung durch das später gegründete UKE-Rechenzentrum bis ca. 1974 im Routinebetrieb des Cito Labors benutzt.

In meiner Physikerzeit hatte ich mich schon mit der Computerauswertung von Teilchenspurbildern befasst. Eine Begegnung mit Dr. Dragutin Novak, Anfang der 1970er Jahre Arzt in der Abteilung Nuklearmedizin führte zu der Idee, die von einer Gamma-Kamera gelieferten, bis dahin qualitativ beurteilten Strahlungsbilder quantitativ auszuwerten. Die Beschaffung eines Computers war auch für dieses Projekt kein Problem. Da es aber damals noch gar keine digitalen Bildausgabegeräte gab, musste unter anderem erst eine Hardware zur Steuerung eines Röhrenmonitor entwickelt werden (heute würde man das eine Graphikkarte nennen). Die auf dieser Basis entwickelte Software erlaubte es erstmals in beliebigen Regionen der Gamma-Kamera-Bilder den zeitlichen Verlauf der Radioaktivität zu bestimmen und so Rückschlüsse auf Stoffwechsel



Abb. 1: Erster Computer im UKE (Digital Equipment PDP-8i) im Keller der alten Chirurgischen Klinik

oder Durchblutung zu ziehen. Auch dieses System wurde mehrere Jahre in der Nuklearmedizinischen Abteilung der Radiologischen Klinik des UKE im Routinebetrieb benutzt.

Der Erfolg des Auswertungsverfahrens ermutigte die DESY-Arbeitsgruppe, die Auswertung angiographischer Bildfolgen in ähnlicher Art zur Quantifizierung des Blutflusses in Organen wie Niere, Herz, Augenhintergrund zu versuchen. Es gelang dafür zusammen mit der Radiologischen Klinik (Prof. Dr. Egon Bücheler) beim Bundesforschungsministerium ca. ein Million DM einzuwerben. Mit diesem Geld wurde mit großem Aufwand Spezialhardware zur Echtzeiterfassung der Bildfolgen und Software zu deren Auswertung entwickelt. Das entstandene System war vom Informatikstandpunkt gesehen ein Spitzenprodukt mit mehreren Hardware- und Software-Neuerungen. Nur: Das klinische Ziel diagnostisch relevante Information zu Durchblutungsvorgängen automatisch aus Röntgenbildern zu extrahieren wurde verfehlt. Wir Informatiker hatten uns einfach zu sehr in unser Instrumentarium verliebt. Es gelang zwar mit sogenannten Funktionsbildern Blutdynamik in statischen Bildern darzustellen, ihre diagnostische Relevanz blieb fragwürdig. Dieses Verfahren wurde allerdings später in der Funktionellen Magnetresonanztomographie erfolgreich. Auch hatten wir ein neuartiges Bilddatenbanksystem – mit Bildauswahl schon damals am Touch-Screen - entwickelt. Für eine praktische Nutzung war es aber noch zu früh, da die nötige Speicher- und Netz-Infrastruktur fehlte. Es blieb nur ein Trost: Wir hatten viel in Informatik und Medizin gelernt.

Vom Röntgenbild zum virtuellen Körper

Inmitten des Projektes war 1978 mein Wechsel von DESY in das neu gegründete Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin (IMDM) erfolgt. Da ich einerseits nach wie vor auf Ressourcen von DESY zugreifen konnte und andererseits die Personalausstattung meiner Abteilung nach heutigen Maßstäben generös war, konnte ich eine schlagkräftige Arbeitsgruppe aufbauen. Inzwischen hatte sich die Computer-Tomographie und etwas später die Magnetresonanztomographie etabliert. Die rapide Entwicklung dieser Verfahren erlaubte bald räumliche Schnittfolgen zu erstellen. Amerikanische Kollegen hatten Ende der 1970er Jahre zuerst die Möglichkeit erkannt, aus Schnittbildern der Computer-Tomographie drei-dimensionale Körpermodelle zu rekonstruieren. Die Vorstellung, in nicht zu ferner Zukunft die platten Bilder der Röntgen- und Tomographie-Technik durch virtuelle die reale Anatomie und Pathologie abbildende 3D-Modelle in Klinik und Ausbildung zu ersetzen, faszinierte mich. Die ersten Gehversuche machten wir 1983 allerdings erst mit der 3D-Rekonstruktion aus mikroskopischen Schnittfolgen des menschlichen Samenkanälchens. In Zusammenarbeit mit der Abteilung für Mikroskopische Anatomie (Prof. Dr. Adolf Friedrich Holstein und Dr. Wolfgang Schulze) wurden erstmals 3D-Ansichten erzeugt, mit denen bewiesen werden konnte, dass die Spermien gemäß Reifezustand spiralförmig angeordnet sind. Bald darauf gelangen im Jahr 1984 die ersten Rekonstruktionen von Knochenstrukturen aus Computer-Tomogrammen. Interessanterweise erfuhr Prof. Dr. Hans-Joachim Höltje von der damaligen

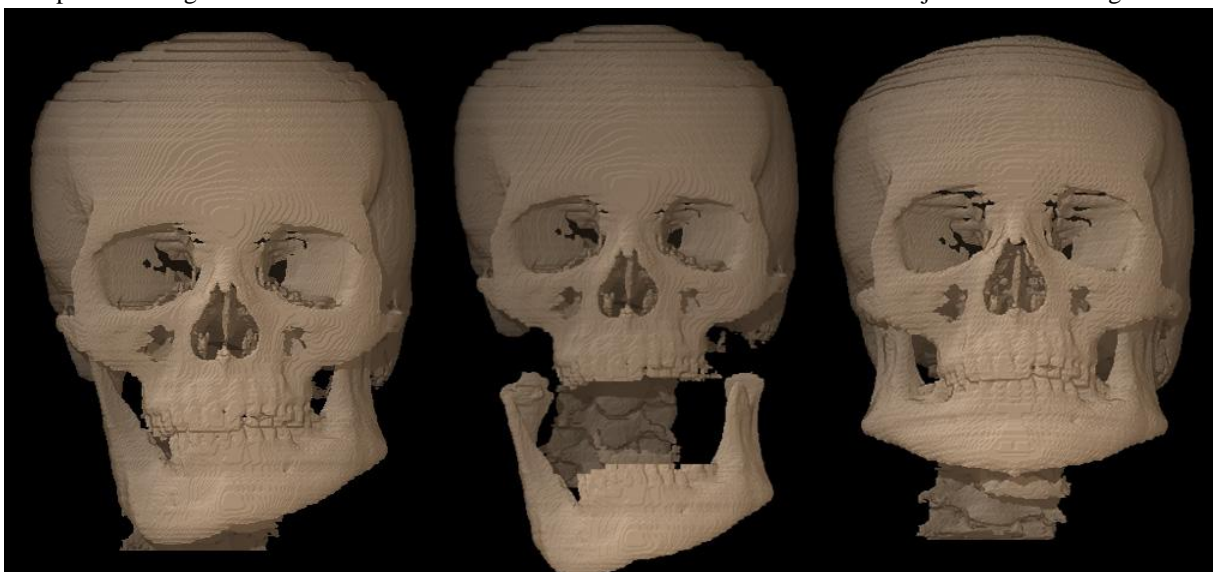


Abb. 2: Aus Computer-Tomogrammen erstelltes Modell eines Schädels. Es wurde zur Planung der Symmetrisierung eines fehlgebildeten Kiefers benutzt (1984)

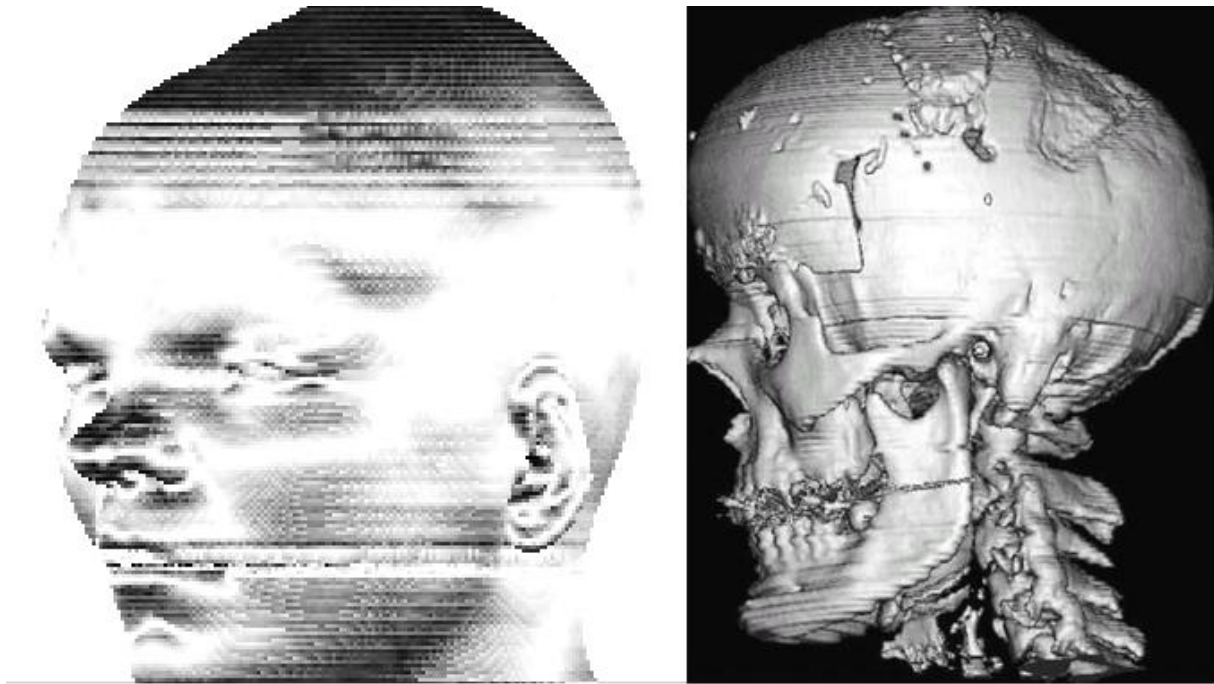


Abb. 3: Der Durchbruch zur realistischen Darstellung: Links: Von CT rekonstruierter Kopf einer Patientin. Der Gesichtsausdruck ist zu erkennen. Rechts : Postoperatives Modell eines Schädels nach Behebung einer Fehlbildung. Knochenteilchen-Anlagerung über der Augenregion, vier Bohrlöcher in Kalottenmitte und der Defekt nach Knochenentnahme aus dem Scheitelbein oben rechts entsprechen der Realität (1985).

ZMK-Klinik auf einem Kongress in Philadelphia von den neuen Möglichkeiten im UKE. Er begann sofort 3D-rekonstruktionen für die Planung von Operationen in der kraniofacialen Chirurgie zu verwenden (Abb. 2). Es ergab sich eine jahrelange erfolgreiche Zusammenarbeit. In diese Zeit fällt auch die Namensgebung VOXEL-MAN für das Projekt. Ein Voxel ist ganz einfach das drei-dimensionale Analogon zum Pixel, dem Bildelement, wie wir es von unseren Digitalkameras kennen. Die 3D-Modelle dieses Artikels sind im Computer – im Prinzip - nichts Anderes als eine Ansammlung von solchen Voxeln. 1984 sahen die 3D-Modelle noch nicht wirklich realistisch aus, eher erinnerten sie an grobe Styropor-Modelle, denen man ihr Zustandekommen aus kleinen Kuben, eben den Voxeln, noch ansah. Der entscheidende Fortschritt ereignete sich bei meinem Forschungsaufenthalt 1985 beim IBM Palo Alto Scientific Center im Silicon Valley. Dort hatte ich Zugriff auf Computer, deren Kapazität die in Hamburg verfügbare bei weitem übertraf. Dies erlaubte die Realisierung einer Idee zu einem neuartigen Darstellungsverfahren ("Grauwertgradienten-Schattierung"), das Bilder mit bisher nicht gekannter Realitätstreue hervorbrachte. Während damals die Berechnung eines Bildes immer noch Minuten dauerte, kann ein gewöhnlicher PC diese in Bruchteilen von Sekunden erzeugen. Das damals entwickelte Verfahren ist heute zum Standardverfahren für die 3D-Visualisierung von radiologischen Schnittbildern geworden (Abb. 3).

Mitte der 1980er Jahre war die Magnetresonanztomographie zum Standardverfahren für die Diagnostik des Gehirns geworden. So lag es nahe, die 3D-Verfahren für dieses anzuwenden. Das Hauptproblem bestand darin, das Computerprogramm dazu zu bringen, die Bildelemente, die zum Gehirn gehören vom Rest zu isolieren. Während es zunächst nur für Teile des Gehirns funktionierte, gelang es uns 1987 erstmals überhaupt, das Gehirn eines noch lebenden Menschen aus Magnetresonanztomogrammen realistisch zu rekonstruieren mit der Möglichkeit es am Bildschirm von allen Seiten zu betrachten und aufzuschneiden (Abb. 4). Dasselbe gelang 1988 ebenfalls als Weltpremiere für ein schlagendes Herz (Abb. 5). Die animierten Darstellungen der 3D-Modelle waren in diesen Jahren Glanzlichter auf dem Jahreskongress der Radiological Society of North America (RSNA), der als Weltkongress der Radiologie gilt. In dieser Zeit wurde unser Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin zum Anziehungspunkt für Besucher aus vielen Ländern.

Begeisterung und Motivation der Arbeitsgruppe waren damals auf einem Höhepunkt. Wir dachten, die Radiologen und Chirurgen müssten die neuen Verfahren mit Begeisterung aufnehmen. Es war dann doch etwas enttäuschend, aber schließlich auch verständlich für uns, dass die reine Diagnostik in den meisten Fällen durchaus mit den klassischen Schnittbildern zurechtkommt. Dies ist auch heute noch so. Allerdings hatten wir

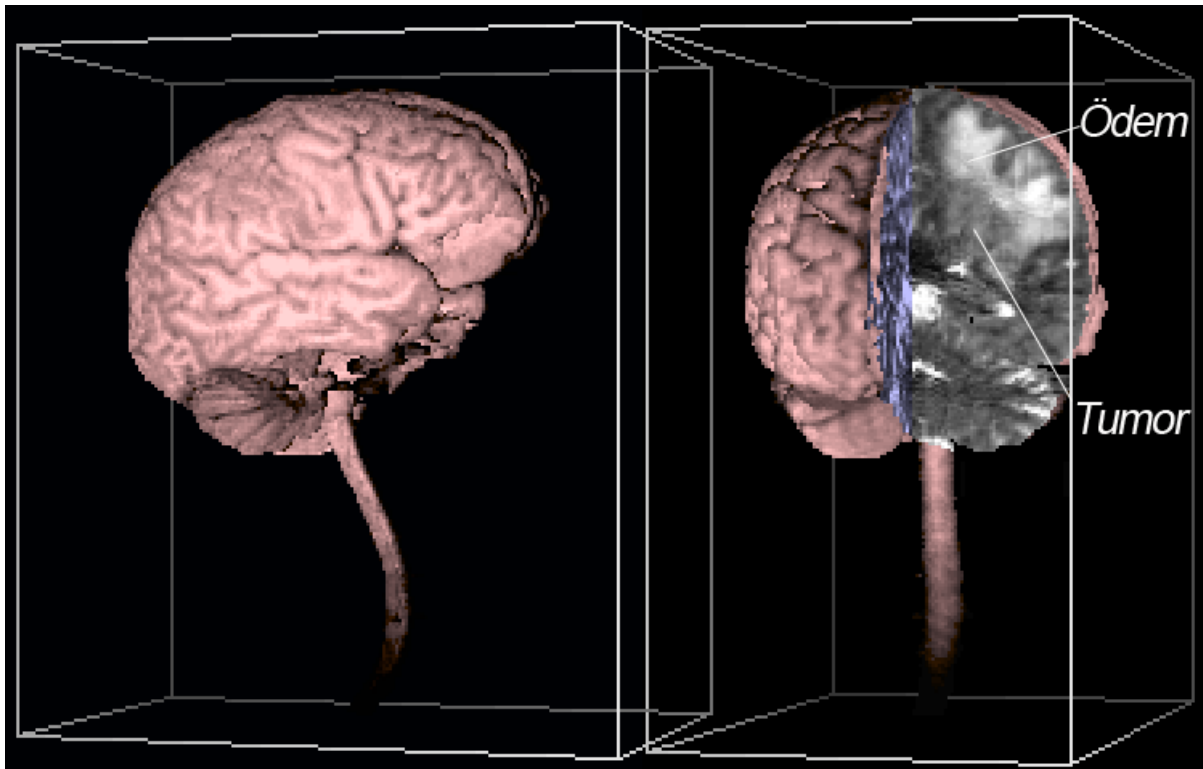


Abb. 4: Erstes 3D-Modell des Gehirns eines lebenden Menschen, erstellt aus Magnetresonanztomogrammen. Im aufgeschnittenen Bild ist ein Tumor umgeben von einem Ödem zu sehen (1987)

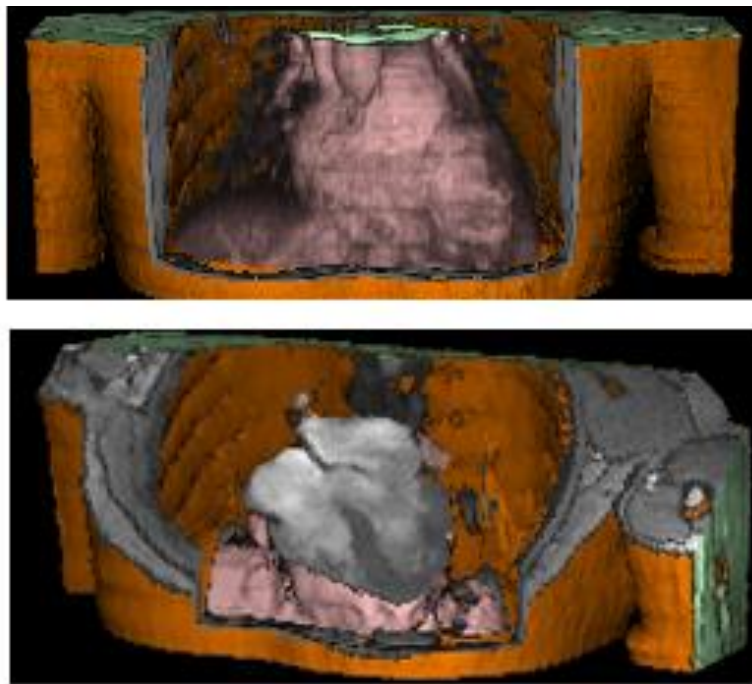


Abb. 5: Einzelbilder des ersten 3D-Modells des schlagenden Herzens eines Patienten, erstellt aus Magnetresonanztomogrammen. Oben: Transparente Darstellung. Unten: Zum Vierkammerblick aufgeschnitten (1988)

erwartet, dass die Möglichkeit, die Anatomie eines Patienten schon vor einer Operation als 3D-Modell zu sehen von den chirurgischen Disziplinen, besonders der Neurochirurgie schnell aufgegriffen würden. Aber über eine freundliche Bewunderung ging das Interesse zunächst nicht hinaus. Das hatte sicher damit zu tun, dass die Verfahren noch umständlich zu handhaben waren und die Zeit wohl einfach nicht reif war. Heute gehört die Möglichkeit aus radiologischen Schnittbildern 3D-Ansichten zu erzeugen zum Standard-Repertoire eines jeden Tomographie-Gerätes.

Die 3D-Modelle werden „intelligent“



Abb.6: Das VOXEL-MAN-Team 1992 (von links Ulf Tiede, Rainer Schubert, Andreas Pommert, Werner Lierse, Karl Heinz Höhne, Thomas Schiemann, Martin Riemer)

So war es wohl der bessere Weg die 3D-Modelle erst einmal für Lehre und Weiterbildung weiter zu entwickeln. Da sie ja aus radiologischen Bildern entstehen, ergab sich erstmals die Möglichkeit, Anatomie und Radiologie in gemeinsamem Kontext darzustellen. Diese Idee begeisterte 1990 den Neuroanatomen Prof. Dr. Werner Lierse, der bald mehr Zeit im IMDM statt in seinem eigenen Institut verbrachte (Abb. 6). Mit ihm zusammen entwickelten wir den weltweit ersten interaktiven Atlas des menschlichen Gehirns, der es erlaubte, zwischen Anatomie,

Radiologie und den zugehörigen Beschreibungen beliebig zu „navigieren“ (Abb. 7). Er wurde 1991 auf dem Amerikanischen Radiologenkongress

vorgeführt. Das American Journal of Neuroradiology kommentierte über ausprobierende Besucher¹: "They weren't just peering through the looking glass monitor....They were looking into the future." Diese erste Version, 1995 im Springer Verlag als CD in fünf Sprachen veröffentlicht, hatte viele neuartige Funktionen, jede für sich nützlich. Beim Navigieren konnte sich der Lernende allerdings sehr leicht, wie man so schön sagt, im Cyberspace verirren. Eine vereinfachte Folgeversion beseitigte das Problem. Sie wurde 2001 ebenfalls im Springer Verlag als DVD veröffentlicht.

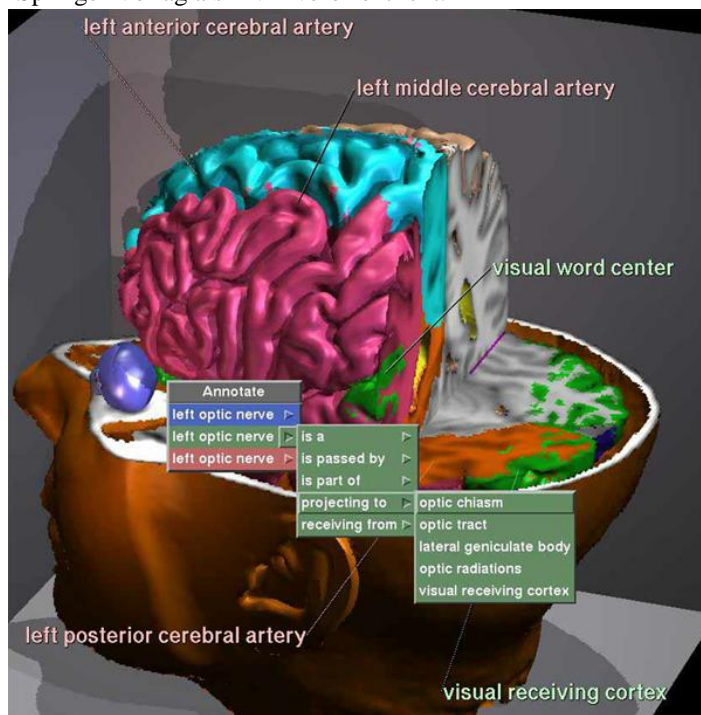


Abb.7 : Bildschirmszene aus dem VOXEL-MAN-3D-Atlas von Gehirn und Schädel. Der Benutzer hat das Hirn aufgeschnitten. Durch Zeigen auf den Sehnerv konnte er sich den Weg eines Reizes bis zur Sehrinde zeigen lassen. Durch Klicken auf verschiedenen Hirnregionen hat ihm das Programm die Versorgungsgebiete von Hirnarterien, bzw. Funktionsgebiete wie die Sehrinde farbig markiert (1991).

Inzwischen hatten wir die Darstellungsverfahren so weit verfeinert, dass man den entstandenen Bildern auch durchaus eine ästhetische Qualität zusprechen konnte. So stand 1994 VOXEL-MAN im Mittelpunkt der Ausstellung „Le corps virtuel“ im Centre Pompidou in Paris. Ich durfte den Einführungsvortrag zur Ausstellung halten und unser Exponat wurde von Le Monde² mit "fort spectaculaire" kommentiert. VOXEL-MAN-Bilder schafften es auf die Titelblätter von Laien- und Fachpresse, darunter 1995 auch Nature Medicine³.

Im Jahr 1995 veröffentlichte die U.S. National Library of Medicine den sogenannten Visible-Human-Datensatz. Dieser besteht aus 1871 photographischen Schnittbildern eines Leichnams, sowie den zugehörigen CT- und MRT-Bildern. Diese Daten waren ideal geeignet für die Erzeugung von 3D -Modellen mit dem VOXEL-MAN-Verfahren. Inzwischen waren auch Computer verfügbar, die mit der damit verbundenen riesigen

¹ Am. J. Neuroradiology 14, 3 (1993), 560.

² Le Monde, 7. April 1994.

³ Nat. Med. 1, 6 (1995).

Datenmenge fertig werden konnten. Das Hauptproblem war jedoch die sogenannte Segmentierung, d. h. das Herausschälen der verschiedenen Organe einschließlich der Blutgefäße und Nerven aus dem Datenvolumen. Die Segmentierung war und ist auch heute nur in geringem Maße automatisierbar. Diese aufwändige Arbeit, die man als anatomische Präparation am Bildschirm beschreiben kann, war nur durch die gemeinsame Arbeit der gesamten Schar von Mitarbeitern, Medizin-Doktoranden, Informatik-Diplomanden und studentischen Hilfskräften – mit Qualitätskontrolle durch Prof. Dr. Udo Schumacher - möglich. Ich erinnere mich gern an die engagierte interdisziplinäre Mannschaft, die das Institut in dieser Zeit von morgens bis spät abends bevölkerte und sich nach getaner Arbeit noch gesellig zusammenfand. Das Ergebnis war ein interaktiver 3D-Atlas der inneren Organe, bestehend aus 650 anatomischen Objekten, die am Bildschirm sowohl in ihrer optischen als auch radiologischen Erscheinungsform gezeigt und abgefragt werden können. Die Qualität der erzeugbaren Ansichten ist auch heute noch unübertroffen (Abb. 8).

Die Möglichkeit beliebige drei-dimensionale Ansichten der menschlichen Anatomie zu erzeugen, war für mich der Anlass auf die frühen anatomischen Zeichnungen von Leonardo da Vinci zurückzukommen. Es ist erstaunlich zu sehen, wie kongruent die Zeichnungen mit den im Computer aus der realen Anatomie entstandenen Ansichten sind (Abb. 8). Ich kann mir vorstellen, dass Leonardo bei seiner bekannten Freude an Technik, lebte er heute, ein Fan von VOXEL-MAN geworden wäre.

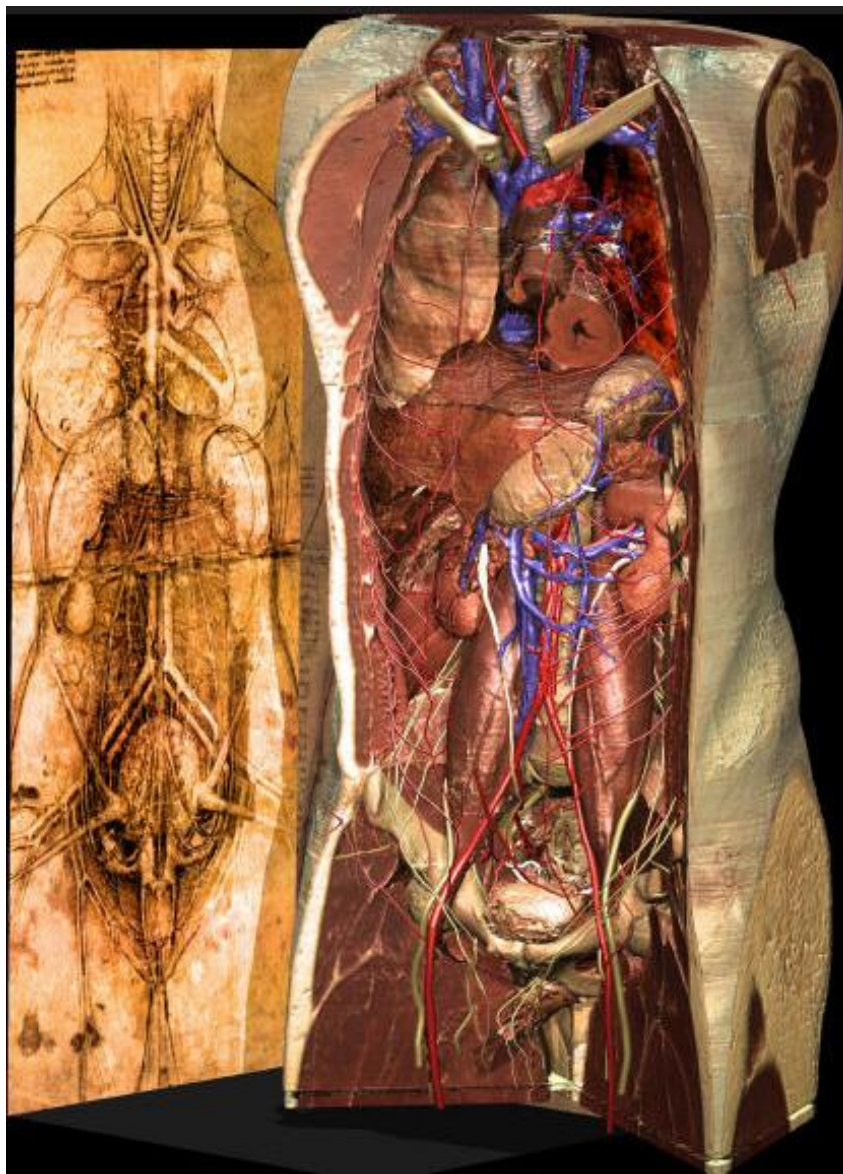


Abb.8: Beispiel aus dem VOXEL-MAN-3D-Atlas der inneren Organe im Vergleich zu einer entsprechenden Darstellung Leonardo da Vincis (1999)

Von der interaktiven Visualisierung zur haptischen Simulation von Eingriffen



Abb.9: Erste Produktversion des Simulators für die Mittelohrchirurgie (2005)

Nach wie vor blieb es aber das Ziel die 3D-Anatomie aus dem Computer für die chirurgischen Disziplinen nutzbar zu machen. Wenn es gelänge dem Chirurgen die 3D-Modelle mit seinen Instrumenten auch fühlbar zu machen, würde man ganze Operationen simulieren können. Mechanische Eingabegeräte, die mit einer Kraft auf die Hand des Benutzers einwirken können, kamen Ende der 1990er Jahre auf den Markt. Für eine realistische OP-Simulation musste einerseits das Problem gelöst werden, die Kraft zu simulieren, die der Chirurg beim Kontakt mit dem Gewebe spürt. Zum anderen musste die Veränderung des Organmodells durch das Instrument realistisch nachvollzogen werden. Nach mehrjährigen grundsätzlichen Untersuchungen zu beiden Problemen konnte 2003 der Prototyp eines Simulators für die Knochenchirurgie vorgestellt werden. In Zusammenarbeit mit Dr. Rudolf Leuwer von der HNO-Klinik wurde als erste Anwendung das Üben des Zugangs mit einer Fräse durch das Felsenbein zum Mittelohr erfolgreich demonstriert. Der HNO-Chirurgie-Simulator wurde 2005 von der inzwischen selbständigen VOXEL-MAN-Gruppe des

UKE zum Produkt weiter entwickelt (Abb. 9) und wird auch heute noch weltweit an Ausbildungsinstitutionen verkauft.

Ein schönes Nebenprodukt: Die „Virtuelle Mumie“



Abb.10: Kopf einer 2300 Jahre alten Mumie aus Computer-Tomogrammen rekonstruiert (erstmalig 1989, verbessert 1997). Sie lebt im Internet als „Virtuelle Mumie“ weiter.

Wenn auch nicht medizinisch relevant, darf die „Virtuelle Mumie“ nicht unerwähnt bleiben. Anlässlich eines Vortrags von Frau Dr. Renate Germer vom Altägyptischen Seminar der Universität Hamburg kam 1989 die Idee auf, eine Mumie aus computer-tomographischen Bildern zu rekonstruieren. Das Kestner-Museum in Hannover stellte die 2300 Jahre alte Mumie einer jungen Frau zur Verfügung, deren Kopf in der Radiologischen Klinik computer-tomographisch aufgenommen wurde. Das daraus rekonstruierte 3D-Modell konnte dann am Bildschirm seziiert werden. Ein Film dieses Vorgangs wurde erstmals 1991/92 im Rahmen der Ausstellung „Mumie + Computer“ im Kestner-Museum in Hannover gezeigt. 1997 wurden die Daten der Mumie für die Ausstellung „Das Geheimnis der Mumien - Ewiges Leben am Nil“ im Hamburger Museum für Kunst und Gewerbe unter dem Titel „Die Virtuelle Mumie“ neu aufbereitet, so dass die staunenden Ausstellungsbesucher den Kopf am Bildschirm untersuchen konnten. Die „Virtuelle

Mumie“ kam noch in weitere Museen, wurde dann ins Internet gestellt und war um die Jahrtausendwende für mehrere Jahre die meistbesuchte Webseite des UKE. Sogar der Zeitschrift Science⁴ war sie unter der Überschrift „Cool images“ eine Notiz mit einem Bild wert. Auch heute wird sie immer noch gut besucht. Hatten sich die alten Ägypter nicht für ein ewiges Leben mumifizieren lassen? Das jetzt wahr gewordene (fast) ewige Leben im Internet hatten Sie sich sicher nicht darunter vorgestellt.

Die Original-Ergebnisse des VOXEL-MAN-Projekts 1984-2003 sind im Medizinhistorischen Museum Hamburg in Form von interaktiven Präsentationen zu sehen.

Danksagungen

Mein herzlicher Dank gilt den Mitgliedern der DESY-Arbeitsgruppe für medizinische Bildverarbeitung, vor allem Prof. Dr. Michael Böhm, Dr. Wolf-Rainer Dix, Walter Ebenritter, Dr. Grigore Nicolae, Prof. Dr. Guido Pfeiffer und Dr. Bernd Sonne. Auf ihrer Arbeit fußten die Bildverarbeitungsprojekte des Instituts für Mathematik und Datenverarbeitung des UKE. Dank geht auch an Dipl. Inform. F.R.P. Boecker für seine Vorarbeiten zu medizinischen 3D-Modellen und seine Unterstützung aus seiner Position bei der Firma Digital Equipment. Besonders dankbar bin ich allen am VOXEL-MAN-Projekt beteiligten Mitarbeitern, Kooperationspartnern und Studierenden, besonders der Kerntruppe, Dr. Ulf Tiede, Prof. Dr. Rainer Schubert, Dr. Andreas Pommert, Prof. Dr. Thomas Schiemann und Dipl. Inform. Martin Riemer. Ohne sie hätte es VOXEL-MAN nicht gegeben. Prof. Dr. Erich R. Reinhardt danke ich für die langjährige fruchtbare Kooperation mit der Firma Siemens. Prof. Dr. Wolfgang Pirsig hat dankenswerterweise diesen Text kritisch durchgelesen.

Literatur

Eine Zusammenfassung mit Veröffentlichungsliste findet sich in:

Karl Heinz Höhne: Medical image computing at the Institute of Mathematics and Computer Science in Medicine, University Hospital Hamburg-Eppendorf. IEEE Transactions on Medical Imaging 21, 7 (2002), 713-723.

Einfach kommt man an eine Gesamtliste der Veröffentlichungen zu VOXEL-MAN über die Webseiten des UKE, wenn man im Suchfeld „voxel-man publications“ eingibt.

⁴ Science 285 (1999), 491.