

H.-O. Peitgen · B. Preim · MeVis, Centrum für Medizinische Diagnosesysteme und Visualisierung, Bremen

Virtuelle Realität in der Radiologie

Zwischen Hoffnung und Dilemma

Der Begriff „Virtuelle Realität“ (VR) wurde in der Computergraphik geprägt [6]. In der virtuellen Welt wird ein Ausschnitt der realen Welt mit höchstmöglichem Detaillierungsgrad (geometrisch) abgebildet. Ziel von VR-Anwendungen ist es, dass man sich in der virtuellen Welt so wie in der realen Welt orientieren, bewegen und interagieren kann. VR-Anwendungen sind dadurch motiviert, dass der modellierte Ausschnitt der realen Welt noch nicht existiert oder unzugänglich ist, wie z.B. bei atomaren Strukturen. Dieser durch die Computergraphik geprägte VR-Begriff ist populär. Für viele verbindet sich damit die Vorstellung eines Benutzers, der Datenhandschuhe trägt und einen klobigen Helm auf dem Kopf hat. Diese Geräte sind durch allerlei Kabel mit einem Rechner verbunden, um die Hand- und Kopfbewegungen zu verarbeiten. Diese enge Sicht verleitet dazu, VR als Spielerei abzutun und das Potenzial von Untersuchungen an Computermodellen zu unterschätzen.

Die Bedeutung von VR-Anwendungen ergibt sich v.a. dadurch, dass neben dem geometrischen Modell auch ein funktionelles Modell erstellt wird, das Manipulationen erlaubt und quantitative Analysen einschließt.

VR-Anwendungen außerhalb der Medizin

Für VR-Anwendungen ist eine 3D-Darstellung erforderlich, in der der Benutzer eine Szene von beliebigen Standpunkten betrachten und bearbeiten kann. Die Herausforderung bei der Gestaltung virtueller Welten liegt darin, dass der Benutzer erkennt, wo er sich in der virtuellen Welt befindet, welche Möglichkeiten zur Navigation existieren und wie ein bestimmtes Gebiet erreicht werden kann. Die Interaktion erfolgt z.B. durch Kopfbewegungen oder durch Handgesten und schließt auch den Tastsinn ein. Es bedurfte jahrelanger Anstrengungen in der Entwicklung von Strategien zur Navigation in einer 3D-Darstellung, in der Entwicklung von Computergraphikhardware, Eingabegeräten, Modellierungs- und Visualisierungsverfahren, bis erfolgreiche Anwendungen entstanden sind. Diese gibt es v.a. im Bereich des Entwurfs von Gebäuden, von Fahrzeugen und von Fabrikanlagen sowie in der Ausbildung (z.B. Flugsimulatoren). Die Anwendungen im Entwurfsbereich sind dadurch motiviert, dass noch kein reales Modell existiert. Die virtuelle Welt – der digitale Prototyp – wird benutzt, um Designvarianten visuell zu vergleichen und Entscheidungen über die weitere Entwicklung zu treffen. Neben der visuellen Beurteilung können auf der Basis funktioneller Modelle konkrete Fragestellungen untersucht werden, wie die, ob bestimmte Bauteile passend miteinander verbunden werden können.

Zu Ausbildungszwecken werden VR-Systeme v.a. dann eingesetzt, wenn eine Ausbildung in der Realität sehr aufwändig ist oder mit einem hohen Risiko verbunden wäre. VR-Systeme sind sehr teuer sowohl in Bezug auf die erforderliche Hard- und Software als auch in Bezug auf die Erstellung eines detaillierten geometrischen Modells. Ihr Einsatz ist begrenzt auf Projekte, deren Kosten im Millionenbereich liegen, z.B. die Entwicklung eines neuen Autos. Daran wird sich durch sinkende Hardwarekosten kaum etwas ändern, da die Modellbildung nicht wesentlich vereinfacht werden kann.

In den naturwissenschaftlichen Disziplinen Mathematik und Physik hat es zunächst erhebliche Widerstände gegen den massiven Einsatz von Computern gegeben. Diese Widerstände hatten Ursachen, die den heute in der Radiologie anzutreffenden sehr ähnlich sind. Ein Grund ist darin zu sehen, dass die Nutzung von Computern mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist. Ein weiterer vielleicht noch schwerer wiegender Grund liegt darin, dass die Arbeit mit Computern die bisherige Arbeitsweise, die durch etablierte Methoden und Werkzeuge geprägt ist, radikal verändert. Dabei ist das, was in einem Computermodell abläuft, weitgehend unklar. Die Zuverlässigkeit und Genau-

Prof. Dr. H.-O. Peitgen

MeVis, Centrum für Medizinische Diagnosesysteme und Visualisierung, Universitätsallee 29,
D-28359 Bremen
e-mail: peitgen@mevis.de

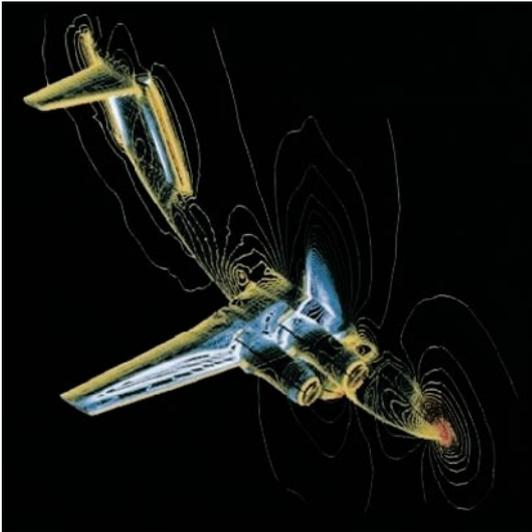


Abb. 1 ◀ **Die Visualisierung von Strömungen ermöglicht neue Einsichten, die durch eine rein numerische Simulation nicht möglich sind. CFD-Berechnung der Druckverteilung an einem japanischen Flugzeug (Asuke Stoll), digitale Bibliothek der NASA**

igkeit von Ergebnissen, die anhand eines Computermodells gewonnen werden, sind für die Anwender schwer abzuschätzen. Wie ist ein virtuelles Experiment zu beurteilen? Welche Phänomene sind real und was sind Artefakte des internen Modells oder der darauf aufbauenden Analysen? Welche Schlussfolgerungen sind zulässig und welche nicht? Das Fehlen überzeugender Antworten auf diese Fragen hat Widerstände gegen eine Computerunterstützung in klassischen Disziplinen verursacht. Die Möglichkeit, gänzlich neue Fragestellungen mit Computerunterstützung zu bearbeiten, ist lange Zeit ungenutzt geblieben.

Schließlich sind aber in diesen Wissenschaften eigene Bewegungen entstanden. Aus der Mathematik heraus entstand das Gebiet Scientific Computing. Dabei werden Untersuchungen durchgeführt, die aufgrund der Komplexität der zugrunde liegenden Modelle ohne Computerunterstützung undurchführbar sind. Im Teilgebiet Computational fluid dynamics (CFD) werden Strömungen, z.B. an speziellen Flugzeugen mit bestimmten Turbinen berechnet und visualisiert (Abb. 1).

Für CFD-Analysen gibt es gute Gründe: Die herkömmlichen Windkanaluntersuchungen konnten nur an stark verkleinerten Modellen oder einzelnen Bauteilen eines realen Flugzeugs vorgenommen werden. Da strömungsmechanische Phänomene sehr komplex und nicht skalierbar sind, sind die so gewonnenen Erkenntnisse nur sehr begrenzt anwendbar. Die Untersuchungen

im Windkanal sind auch auf die Simulation weniger Flugphasen beschränkt. Für eine Risikoabschätzung ist aber gerade das Verhalten in extremen Flugsituationen interessant. Derartige Simulationen sind nur mit Mitteln der virtuellen Realität möglich, erfordern aber wiederum eine äußerst anspruchsvolle Modellbildung. Die Nutzung eines Computermodells hat dabei 2 Aspekte: die numerische Simulation der auftretenden Strömungen und die Visualisierung dieser Simulationsergebnisse. Die Verknüpfung dieser beiden Aspekte erklärt den Stellenwert des virtuellen Experiments.

Innerhalb der Physik ist der Bereich Computerphysik entstanden. Dabei stehen neue Anwendungen im Vordergrund, die extreme Anforderungen an die Computertechnik stellen und einen wichtigen Impuls zu deren Weiterentwicklung geben. Ein bekanntes Beispiel ist die Klimaforschung – die Vorhersage des Klimas in den nächsten Jahrzehnten unter verschiedenen Modellannahmen.

Computerunterstützung ermöglicht eine viel detailliertere Modellbildung und Analyse. Für viele Fragestellungen können erst durch den Einsatz von Computern die realen Verhältnisse ausreichend genau modelliert werden, um aussagekräftige „Experimente“ zu gestalten. Diese positive Entwicklung ist v.a. den Wissenschaftlern in den klassischen Gebieten zu verdanken, die dieses Potenzial erkannt und in enger Kooperation mit Computerspezialisten entsprechende Forschungsprojekte initiiert haben.

Gegenwärtig treten in der Radiologie ähnliche Schwierigkeiten wie schon bei der Computerisierung anderer Gebiete auf. Die Zuverlässigkeit von Diagnosen auf der Basis von Computermodellen und entsprechenden Verarbeitungsschritten richtig einzuschätzen, ist dabei vielleicht die größte Herausforderung. Die Tatsache, dass diese Schwierigkeiten in anderen Gebieten letztlich überwunden worden sind, gibt Anlass zur Hoffnung.

Computerunterstützung und VR in der Radiologie

Der Aufwand der gerechtfertigt ist, um ein Modell eines Autos zu entwickeln, für das 7-stellige Verkaufszahlen angestrebt werden, ist offensichtlich für die Erstellung eines patientenspezifischen Modells völlig ungerechtfertigt. Die Modellbildung für die VR kann in den zuvor genannten Gebieten in beliebiger Genauigkeit erfolgen. Dabei können gezielt Verfeinerungen in der Modellierung an interessierenden Teilen vorgenommen werden. Dies ist in der Radiologie grundsätzlich anders; die Modellbildung beruht auf bildgebenden Verfahren mit begrenzter Genauigkeit. Durch vielfältige Bildverarbeitungsmethoden (Identifikation und Analyse zusammengehöriger Strukturen) wird dabei aus den vielen Bildern ein 3D-Modell rekonstruiert. VR in der Diagnoseunterstützung unterscheidet sich also sowohl vom technischen Aufwand als auch von der Modellbildung her grundlegend von den in anderen Bereichen entwickelten VR-Systemen. Die Modellbildung für VR-Techniken in der Radiologie ist darauf ausgerichtet, präzisere Diagnosen zu ermöglichen und Therapieentscheidungen zu unterstützen. Zu diesem Zweck werden Modelle entwickelt, die patientenindividuell anatomische Strukturen, funktionelle Eigenschaften und pathologische Veränderungen darstellen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die bildgebenden Verfahren Verzerrungen aufweisen, dass Rauschen und Bewegungsartefakte auftreten und die Realität nur in begrenzter Auflösung widerspiegelt wird. Eine besondere Herausforderung besteht darin, Visualisierungen zu entwickeln, die derartige Ungenauigkeiten berücksichtigen und nicht eine Exaktheit vorspiegeln, die nicht vorhanden ist.

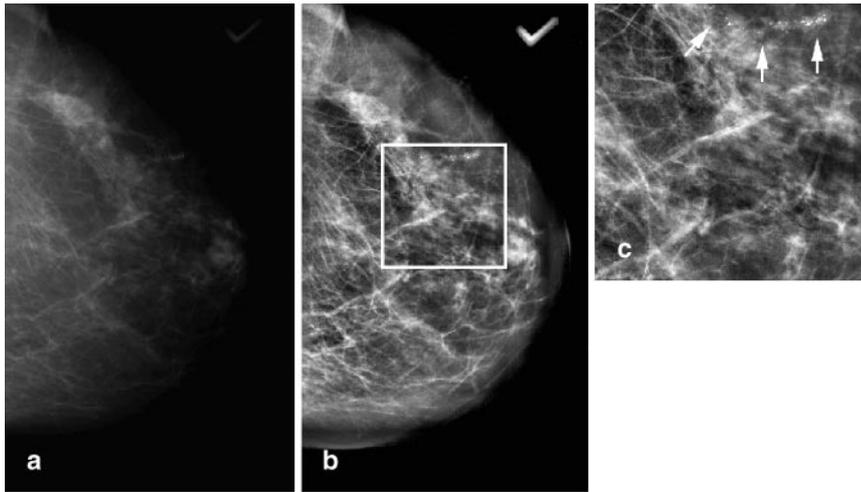


Abb. 2a–c ▲ Gegenüberstellung eines unbearbeiteten Mammogramms (a) und eines Mammogramms (b,c), das hinsichtlich der Erkennbarkeit von Details durch einen adaptiven Filter verbessert wurde. Durch diesen Filter wird das Histogramm der vorhandenen Intensitätswerte optimal ausgenutzt. Der in b markierte Ausschnitt ist in c vergrößert dargestellt, wobei die Pfeile auf eine potenzielle Mikroverkalkung hinweisen. Mit freundlicher Genehmigung von Dietmar Dechow, MeVis Bremen

Die Einstellung bei den Radiologen in Bezug auf eine Computerunterstützung generell hat sich in den letzten Jahren erheblich gewandelt – es ist ein Phasenübergang zu beobachten. Während es noch vor etwa 5 Jahren weit verbreitete Zweifel daran gab, dass die Radiologie von einer Computerunterstützung profitieren kann, können heutzutage hohe Erwartungen an die Computerunterstützung konstatiert werden. Dass eine (weitgehende) Computerunterstützung in der Radiologie technisch möglich ist, wird heute kaum bestritten. Für diesen Meinungsumschwung sind v.a. folgende Entwicklungen verantwortlich:

- Durch das enorm verbesserte Preis-Leistungs-Verhältnis bei Computern und Bildschirmen ist die rechen-technische Grundlage für die effiziente Verarbeitung und Anzeige großer Bilddaten vorhanden.
- Standards, wie DICOM für den Austausch von Bilddaten, haben – trotz mancher Unzulänglichkeiten – eine hohe Akzeptanz gefunden.
- Die technologische Weiterentwicklung hat einen Durchbruch des Internets auf breiter Front ermöglicht. Dies hat weitgehende Konsequenzen für den internen Austausch von Bildern und anderen Dokumenten (Intranet) und ermöglicht teleradiologische Anwendungen.
- Verfahren zur Verschlüsselung von Daten sind mittlerweile kommerziell

verfügbar. Außerdem ist ein rechtlicher Rahmen geschaffen, der festlegt, wie der Schutz von Patientendaten bei einer computergestützten Verarbeitung gewährleistet werden kann.

Zugleich ist ein großer Aufschwung in den Gebieten zu beobachten, die sich der Computerunterstützung widmen und mit der Radiologie und Chirurgie zusammenarbeiten. Neue Konferenzen wie die seit 1994 jährlich stattfindende Tagung „Medicine Meets Virtual Reality“ und neue Zeitschriften sind entstanden. Die bedeutendste Konferenz auf diesem Gebiet – die seit 1985 bestehende CAR-Tagung – erlebt einen ständigen Aufschwung in den Teilnehmerzahlen. Seit 1997 ist sie auf chirurgische Anwendungen ausgeweitet worden (CARS: computer-assisted radiology and surgery), worin auch die Bedeutung der Zusammenarbeit von Radiologen und Chirurgen deutlich wird. Neue Lehrstühle und Institute wurden gegründet, in denen Ingenieure, Naturwissenschaftler und Informatiker neue Verfahren entwickeln, um die bildbasierte Arbeit in der Medizin zu unterstützen. Dies hat dazu beigetragen, dass die mathematischen Methoden und die Software für die Radiologie erheblich weiterentwickelt wurden.

Trotz der tief greifenden Verbesserung der Rahmenbedingungen kann von einem praktischen Durchbruch digitaler Befundung kaum die Rede sein.

Computerunterstützung beschränkt sich weitgehend auf die Ablage digitaler Bilder. Der Kern der radiologischen Tätigkeit, die Befundung, wird weiterhin überwiegend mit herkömmlichen Methoden vorgenommen – digitale Bildverarbeitung und 3D-Visualisierung spielen hier eine untergeordnete Rolle.

Computergestützte Befundung in der Radiologie ist bisher nicht von „innen“ gewachsen – es ist keine eigene wissenschaftliche Bewegung in der Radiologie entstanden. Auch die forschenden Radiologen sehen die Computerunterstützung eher als etwas, das sie nutzen können, als als etwas, das sie selbst aktiv und kreativ gestalten können.

Entwicklung von VR-Anwendungen in der Radiologie

In der Vergangenheit sind große Anstrengungen unternommen worden, um grundlegende Algorithmen der Bildverarbeitung und Visualisierung so zu modifizieren, dass sie in der Radiologie anwendbar sind, bzw. um neue Algorithmen zu entwickeln. Methoden zur Anpassung von Helligkeit und Kontrast, zur Unterdrückung von Rauschen, zur Verstärkung von Kanten und andere basale Bildverarbeitungsmethoden sind intensiv untersucht worden. Im Bereich der Visualisierung wurden z.B. Verfahren zur Anzeige beliebiger Schichten eines Datensatzes und Projektionsmethoden (z.B. Maximum-intensity-Projektion für die Gefäßdarstellung) entwickelt (s. Schumann et al. [3] für einen guten Überblick). Damit existieren prinzipiell die Werkzeuge, mit denen diagnostische Prozesse unterstützt werden können. Für eine konkrete Fragestellung müssen allerdings diese basalen Verfahren geeignet parametrisiert und kombiniert werden. Dies setzt detailliertes Wissen über die einzelnen Verfahren und ihre Parameter in Verbindung mit diagnostischen Fragestellungen voraus. Daher ist eine Computerunterstützung auf dieser Basis nur möglich, wenn entsprechend spezialisiertes Personal zur Verfügung steht. Dies ist aber selbst in Forschungseinrichtungen die Ausnahme.

Kennzeichnend für aktuelle Entwicklungen ist die Integration grundlegender Werkzeuge in Applikationen mit dem Ziel, einzelne Fragestellungen zu bearbeiten. Diese Applikationen be-

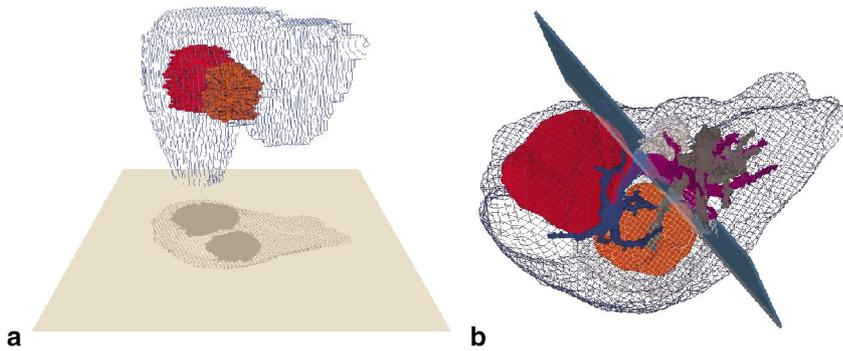


Abb. 3a, b ▲ Darstellung von 2 Tumoren innerhalb des semitransparent dargestellten Leberparenchyms (a) und ihrer möglichen Resektion mit einem geeigneten Sicherheitsrand durch eine Schnittfläche (b). Mit freundlicher Genehmigung von Dirk Selle, MeVis Bremen

sitzen nicht die Flexibilität, die der Einsatz der zuvor beschriebenen Werkzeuge bietet. Sie sind vielmehr auf eine Fragestellung und oft auch auf bestimmte Arten von Bildern zugeschnitten. Beispiele dafür sind Systeme zur Detektion von Mikrokalk in Mammogrammen sowie Systeme zur Detektion von Polypen in virtuellen Kolonoskopien. Dabei werden Modelle der pathologischen Veränderungen entwickelt und Filter entsprechend parametrisiert, um die erwarteten Strukturen hervorzuheben. Als Beispiel wird in Abb. 2 gezeigt, wie durch einen adaptiven Filter, der die lokalen Histogramme eines Mammogramms berücksichtigt, eine Darstellung generiert wird, die die Mikrokalkerkennung unterstützt. Im Gegensatz zu einer globalen Kontrastregelung, die entweder den Hautsaum oder die inneren Strukturen erkennbar macht, ermöglicht dieses Verfahren in allen Bereichen der Mammogramme eine gute Erkennbarkeit von Details. Aufbauend auf derartigen Filtern werden quantitative Verfahren integriert, um z.B. die Bösartigkeit von Läsionen einzuschätzen. Ziel ist, dass die Verfahren automatisch die Fälle „vorsortieren“ und es dem Arzt dadurch ermöglichen, sich auf die unklaren und verdächtigen Fälle zu konzentrieren. Solche Applikationen werden ähnlich wie herkömmliche Untersuchungsmethoden anhand ihrer Sensitivität und Spezifität beurteilt und optimiert. Ein wichtiges Einsatzgebiet sind Screening-Projekte (z.B. anstelle eines Zweitbefunders). Die Entwicklung dieser Applikationen macht es erforderlich, dass die Entwickler die Restriktionen der praktischen Anwendung so gut verstehen, dass sie die

Applikationen geeignet konfigurieren können.

Zukünftige Entwicklungen

Das Potenzial einer Computerunterstützung in der Radiologie geht weit über die zuvor beschriebenen Systeme hinaus und ermöglicht neue Formen der Diagnosesstellung und Therapieplanung. Zukünftige Entwicklungen werden dadurch charakterisiert sein, dass ein kreativer und komplexer Problem-

lösungsprozess mit einer Vielzahl möglicher miteinander verbundener Fragestellungen unterstützt wird, der auch Therapieentscheidungen beinhaltet. Daraus ergibt sich, dass der Umgang mit diesen Systemen patienten- und untersucherindividuell sehr verschieden ist und die Systeme entsprechend anpassbar sein müssen. Die Interaktion ist vielfältiger und im Gegensatz zu den weitgehend automatisch arbeitenden Systemen, die zuvor beschrieben worden sind, dabei untersucherabhängig.

Ein Beispiel für derart komplexe Probleme ist die Planung neurochirurgischer Eingriffe auf der Basis von fMRT- und MRT-Bildern. Dazu werden die multimodalen Bilddaten registriert und fusioniert, damit patientenindividuell sichtbar wird, welche Areale des Gehirns für bestimmte Funktionen zuständig sind. Auf dieser Basis kann die Planung eines geeigneten Zugangs verbessert werden. Die Bildregistrierung, die Integration von Bildern, die aus unterschiedlichen Modalitäten stammen oder zu unterschiedlichen Zeiten entstanden sind, ist eine der grundlegenden Methoden, die ohne eine Computerunterstützung nicht möglich sind.

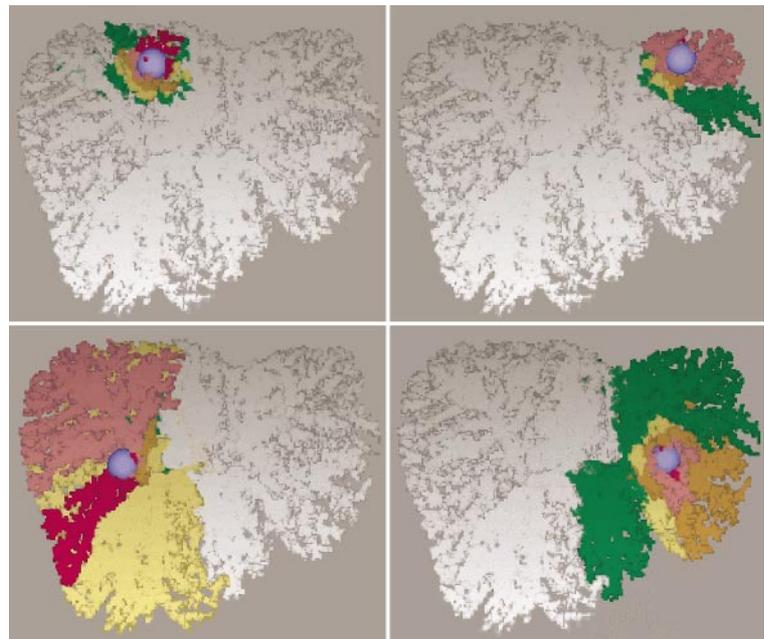


Abb. 4 ▲ In die Modelle von Ausgusspräparaten wurden an verschiedenen Orten Tumoren mit einem Sicherheitsrand implantiert und errechnet, welche Territorien entnommen werden müssen, um den Tumor möglichst organschonend zu entfernen. Die Farben repräsentieren unterschiedliche Sicherheitsränder (rot 0,5 cm, orange 1 cm, hellbraun 1,5 cm, gelb 2 cm, grün 2,5 cm). Die CT-Daten der Ausgusspräparate wurden von Priv.-Doz. Jean Fasel, Institut für Morphologie, Universitätsklinik Genf zur Verfügung gestellt. Mit freundlicher Genehmigung von Dirk Selle, MeVis Bremen

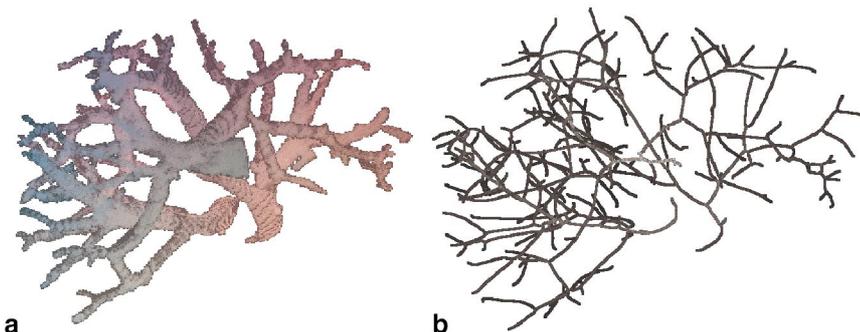


Abb. 5a, b ▲ Darstellung eines Gefäßbaums der Leber, a in Form der Segmentierung, b Skelettdarstellung; Verzweigungsstruktur deutlicher. Mit freundlicher Genehmigung von Dirk Selle, MeVis Bremen

Die prinzipielle Beschränktheit der Aussagekraft einzelner Bilder kann durch die Integration mehrerer Bilder zu einer virtuellen Welt überwunden werden.

Präoperative Planung in der Leberchirurgie

Im Folgenden wird am Beispiel der präoperativen Planung in der Leberchirurgie erläutert, wie Radiologen und Chirurgen künftig intensiver kooperieren, um Therapieentscheidungen zu treffen. Dabei wird anhand der Ausdehnung und Lage von Metastasen die Resektabilität von Tumoren beurteilt. Högemann et al. [1] beschreiben in diesem Heft, wie diese Planung verbessert werden kann. Die Therapieentscheidung betrifft die Frage nach der Auswirkung der geplanten Resektion auf die Gefäßversorgung und auf das postoperativ verbleibende Gewebe. Insbesondere wird angestrebt, Versorgungsgebiete großer Gefäße komplett zu resektieren. Diese Versorgungsgebiete sind aber in CT- oder MRT-Bildern nicht erkennbar. Nur durch eine mathematische Modellbildung ist es möglich, Versorgungsgebiete aus den Gefäßen abzuleiten.

Ein weiterer Aspekt der präoperativen Planung betrifft die Sicherheitsränder, die bei der Resektion eines Tumors zu beachten sind (Abb. 3). Wenn diese Aspekte in ein Modell integriert werden, kann sogar ein Vorschlag generiert werden, wie ein Tumor optimal entnommen werden kann. Dabei wird ausgehend von einem Tumor mit variablen Sicherheitsrändern errechnet, welche Gefäße und damit welche Territorien von der simulierten Resektion betroffen sind. Für eine verlässliche Abschätzung von Territorien ist es nötig, dass

die Gefäße etwa bis zur 5. Verzweigungsebene detektiert werden können. Dies erfordert entweder eine sehr hohe Auflösung der Bilddaten oder eine Modellbildung, die bei beschränkter Auflösung den weiteren Verlauf aus den Gefäßstümpfen „extrapoliert“. Die erforderliche Auflösung ist in klinischen Daten gegenwärtig nicht erreichbar, aber die Weiterentwicklung der Gerätetechnik, v.a. die neueren Multislice-CT, geben Anlass zu Optimismus.

Was bezüglich der Operationsplanung mit hoch aufgelösten Daten möglich sein wird, zeigen wir anhand von detaillierten Ausgusspräparaten. Von diesen Ausgusspräparaten sind CT-Bilder erstellt und digitalisiert worden. In die so entstandenen Modelle sind an verschiedenen Stellen Kugeln als Modelle fokaler Läsionen integriert worden (s. Abb. 4). Für jede derart modellierte Tumorlokalisierung sind Vorschläge für eine Resektion errechnet worden. Diese sind als Grundlage für eine Verfeinerung zu sehen, wobei z.B. günstige Zugangswege und Operationstechniken berücksichtigt werden. Diese Form von Computerunterstützung trägt dazu bei, das Risiko chirurgischer Eingriffe abzuschätzen. Ähnlich, wie die CFD-Berechnungen das Risiko, das mit der Konstruktion von Tragflügeln in bestimmten Flugphasen verbunden ist, kalkulierbar machen, können durch VR-Techniken die Risiken chirurgischer Eingriffe simuliert und beurteilbar gemacht werden.

Die Gestaltung der virtuellen Welt muss sich daran orientieren, welche Fragestellung untersucht wird. Wenn z.B. die Beurteilung von Stenosen im Vordergrund steht, müssen Gefäße in ihrer Ausdehnung so realitätsnah wie möglich dargestellt werden. Die Gefäß-

radien werden zusätzlich farbkodiert dargestellt, um mögliche Anomalien hervorzuheben. Wenn dagegen ein Überblick über die räumliche Struktur eines Gefäßbaums angestrebt wird, ist eine Vereinfachung der Gefäßdarstellung, z.B. durch dünne Skelettlinien, sinnvoll (Abb. 5).

Visualisierung von Unsicherheit

Bei den rekonstruierten Visualisierungen liegt eine große Gefahr darin, dass sie eine Exaktheit vortäuschen, die in Wahrheit nicht gegeben ist. Eine Metastase, die beispielsweise in einer 3D-Visualisierung als scharf abgegrenzte Oberfläche dargestellt wird, ist unscharf begrenzt: Wo genau das Tumorgewebe endet und das gesunde Parenchym beginnt, kann den Bildern nicht entnommen werden. Bei krankhaften Veränderungen ist eine Plausibilitätskontrolle anhand anatomischer Gegebenheiten kaum möglich. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass das Maß an Unsicherheit, mit der Objekte segmentiert werden, ihre Darstellung beeinflusst. Ein sicher zu segmentierender Knochen sollte also „anders“ aussehen als eine Metastase, deren scheinbare Ausdehnung von subtilen Veränderungen der Verteilung eines Kontrastmittels abhängt. Eine Möglichkeit, diese Unsicherheit zu visualisieren, besteht darin, eine Metastase an ihrem Rand kontinuierlich in die Farbe des umgebenden Parenchyms übergehen zu lassen.

Abschätzung von Fehlern für quantitative Analyse

Die Unsicherheit über die tatsächlichen Gegebenheiten muss in noch stärkerem Maß bei der quantitativen Analyse berücksichtigt werden. Die quantitative Analyse – die Vermessung von Abständen, Volumina, Intensitätsverteilungen – ist für die Beurteilung vieler Erkrankungen wesentlich. Exakte quantitative Analysen sind nur mit Computerunterstützung möglich. Allerdings können quantitative Angaben eine gefährliche Entscheidungssicherheit vortäuschen. Daher muss sorgfältig abgeschätzt werden, welche Genauigkeit für die Diagnosestellung erforderlich ist und unter welchen Umständen diese Genauigkeit erreichbar ist. Die Anforderungen können

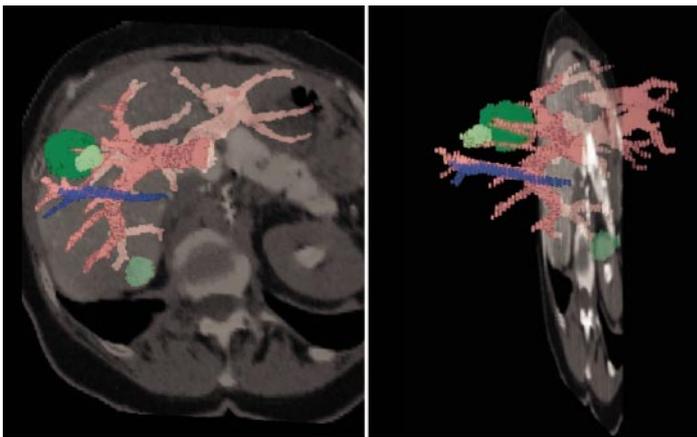


Abb. 6 ▲ 2 Ansichten einer semitransparenten Schicht der Original-CT-Daten, die durch die aufbereiteten Gefäße und Läsionen bewegt werden kann, sodass die Aufarbeitung der Daten überprüfbar wird. Mit freundlicher Genehmigung von Dirk Selle, MeVis Bremen

nen dabei sehr unterschiedlich sein. So reicht es zur Beurteilung eines Krankheitsverlaufs (z.B. bei einer Tumorerkrankung) oft aus, wenn die computer-gestützte Volumetrie die Veränderung des Volumens korrekt widerspiegelt, selbst wenn die absoluten Zahlen stark von denjenigen abweichen, die die Experten manuell ermittelt haben. Generell ist für die Anwendung quantitativer Verfahren entscheidend, dass Messfehler und ihre Fortpflanzung, z.B. durch Messungen an geeigneten Phantomen, analysiert werden.

Plausibilitätskontrolle durch Integration der Originaldaten

Gerade weil die virtuelle Realität, die durch Rekonstruktion aus Bildern entsteht, in vielerlei Hinsicht fehlerhaft sein kann, ist es entscheidend, dass ein intelligenter Rückgriff auf die Originaldaten möglich ist, um die Plausibilität der Visualisierung bzw. Quantifizierung zu überprüfen. Die Möglichkeit, Originaldaten zu betrachten, ist allerdings unzureichend, denn es ist sehr aufwändig, die Korrelation zwischen einer Struktur in einem 3D-Modell und den entsprechenden Regionen in den Originaldaten zu finden. Daher müssen z.B. Mechanismen entwickelt werden, die bei der Selektion eines Objekts in der 3D-Darstellung die Anzeige entsprechender Regionen in den Originaldaten bewirken (und umgekehrt das 3D-Modell so darstellen, dass eine in den Originaldaten selektierte Struktur gut erkennbar ist). Eine andere Variante

des Rückgriffs auf die Originaldaten ist die Integration von aufbereiteten Strukturen und Originaldaten in einer Ansicht, wobei diese z.B. durch die Nutzung von Transparenz überlagert werden (Abb. 6).

Konsequenzen für die radiologische Community

Radiologen sollten sich für die Computerunterstützung bei der Befundung öffnen und eigene Vorstellungen in die Weiterentwicklung einbringen. Diese eigenen Vorstellungen können dazu beitragen, dass ein Bewusstsein für die computergestützte Radiologie entsteht. Dafür ist es wichtig, dass in den radiologischen Zeitschriften, auf radiologischen Kongressen und in der Deutschen Röntgengesellschaft die computergestützte Radiologie einen markanten und sichtbaren Platz einnimmt. Dabei ist der Weiterbildungsaspekt entscheidend: ein Kursprogramm, in dem State-of-the-art-Berichte zu wichtigen Aspekten der medizinischen Bildverarbeitung und Visualisierung gegeben werden, und Tutorials, die den Einstieg in diese Themen ermöglichen. Ein Überblick über diese Themen ist für die forschenden Radiologen essenziell. Davon ausgehend können eigene radiologische Forschungen entstehen.

Der gegenwärtig erfolgende Umbruch kann und sollte als Chance zur Mitgestaltung verstanden werden. Wünschenswert ist, dass ein kooperativer Geist entsteht, ein Pioniergeist, der in vielen Gebieten der Computerunter-

stützung den Weg gebahnt hat. Eine solche Einstellung ist z.B. nötig, um die in einer Forschungsk Kooperation entstehenden Verfahren in größerem Stil testen und verfeinern zu können.

Eine wichtige Aufgabe für die forschenden Radiologen besteht darin, eine umfassende Bestandsaufnahme zu erarbeiten, die den aktuellen Stand der Computerunterstützung bei der Befundung dokumentiert und dabei Schwierigkeiten und Potenziale charakterisiert. Eine solche Beschreibung von erreichbaren Fortschritten in der Behandlung von Erkrankungen, aber auch von erreichbaren Kostensenkungen wäre eine hervorragende Grundlage, um kurz-, mittel- und langfristige Forschungsziele zu definieren und dabei zu beschreiben, welche technologischen und organisatorischen Voraussetzungen für deren Umsetzung erfüllt werden müssen. Ein Vorbild für eine solche Anstrengung kann die Initiative „The Biomedical Information Science and Technology Initiative“ sein, die von einer entsprechenden Kommission für das National Institute of Health in den USA im Jahr 1999 erarbeitet wurde. Noch einschlägiger ist ein Dokument, das vom US Public Health Service on Womens Health und vom National Cancer Institute erarbeitet wurde. Der „Report of the Joint Working Group on Image-Guided Diagnosis and Treatment, Faina Shtern und David Winfield (Hrsg.), U.S. Public Health Service Office on Woman's Health und National Cancer Institute, 1999“ enthält eine breite Diskussion von Forschungszielen für die Computerunterstützung in der Radiologie. Eine aufgeschlossene Haltung unter den Radiologen und eine klare Beschreibung ihrer Forschungsziele ist nicht zuletzt unerlässlich dafür, dass in den Forschungsförderungsinstitutionen das Bewusstsein wächst, dass dieses Gebiet besonders förderungswürdig ist und der Förderung bedarf. Eine sorgfältige Beschreibung der Forschungsziele kann den Rahmen für eine Forschungsförderung bilden.

Ziel der Entwicklung neuer Methoden und Systeme kann nur der Einsatz in der Patientenversorgung sein. Dies darf aber nicht dazu führen, dass Projekte und Zielsetzungen, deren praktische Nutzung nicht in naher Zukunft möglich erscheint, abgetan werden. Einige Beispiele aus anderen Bereichen,

in denen eine weitgehende Computerunterstützung heute selbstverständlich scheint, belegen, wie viel Forschungsvorlauf für wichtige Anwendungen erforderlich ist. So wurden bereits in den 60er Jahren die ersten Systeme für den computergestützten Entwurf von Maschinen (computer-aided design, CAD) konzipiert [5]. Diese Systeme erfordern eine enorme Verarbeitungsleistung, große Speicher und hoch aufgelöste Bildschirme, weil mehrere Varianten der 3D-Modelle zusammen mit Maßen und Konstruktionsanweisungen verwaltet werden müssen. Als die ersten Forschungsprojekte begonnen wurden, war nicht ansatzweise gesichert, dass die technischen Voraussetzungen jemals erfüllt werden können. In ähnlich visionärer Weise wurden die ersten Konzepte für die interaktive Gestaltung von Molekülen vorgestellt [2], die heute in der pharmakologischen Forschung nicht mehr wegzudenken sind. Derartige Weitsicht in den Überlegungen zur Computerunterstützung in der Radiologie ist gegenwärtig kaum zu beobachten. Der unmittelbare Nachweis einer möglichen Zeit- und Ressourceneinsparung wird zu oft zum „Totschlagsargument“ für neue Ideen.

Nicht zuletzt ergeben sich Konsequenzen für die Weiterbildung in der Radiologie. Diese sollte dahingehend verändert werden, dass Grundlagen medizinischer Informationssysteme, Bildverarbeitung und Visualisierung für die fachärztliche Weiterbildung in der Radiologie anerkannt oder sogar obligatorisch werden.

Konsequenzen für die Entwickler

Das Dilemma der computergestützten Radiologie kann selbstverständlich nicht allein durch die Radiologen gelöst werden. Die Entwickler – die Ingenieure, Naturwissenschaftler und Informatiker – müssen erhebliche Kreativität und Hartnäckigkeit entwickeln, um einen Durchbruch der Computerunterstützung zu ermöglichen. Dazu zählen eine konsequente Anwendungsorientierung und eine gründliche Analyse klinischer Abläufe (die wiederum die Mitarbeit von Radiologen erfordert!). Dabei muss sorgfältig erfasst und kommuniziert werden, was sich bewährt hat, damit eine

solide Grundlage entsteht, auf der künftige Entwicklungen aufbauen können.

Wie in anderen Bereichen ist die Entwicklung überzeugender Metaphern nützlich, um die Einstiegshürden für die Benutzer zu verringern, aber auch um die Entwicklung zu fokussieren. Der Einsatz von PCs in Büros ist maßgeblich durch die Orientierung an der Desktopmetapher erleichtert worden. Diese wurde so realisiert, dass Dokumente auf einem Bildschirm in überlappenden Fenstern ähnlich abgelegt werden können, wie auf einem Schreibtisch. Der digitale Lichtkasten ist eine Metapher, die ein großes Potenzial für radiologische Anwendungen hat. Wenn die Darstellung und die Manipulationsmöglichkeiten (Helligkeits- und Kontrastregelung, flexible Lupen) eines interaktiven Systems sich an denen eines Lichtkastens orientieren, erleichtert das den Zugang für Radiologen. Die Schwierigkeit der Entwicklung robuster Algorithmen darf nicht dazu führen, dass die Benutzungsschnittstelle vernachlässigt wird. Geringer Lernaufwand, effiziente und weitgehend fehlerfreie Interaktion müssen wichtige Ziele sein, um die entwickelten Verfahren klinisch zu erproben. Daher ist eine benutzerzentrierte Entwicklung zu fordern, bei der sich die verwendete Terminologie (z.B. Menüeinträge, Hilfetexte) an der „Sprache des Radiologen“ orientiert.

Schätzung von Aufwand und Nutzen

Eine radikale Veränderung in radiologischen Kliniken kann sinnvollerweise nur begonnen werden, wenn die möglichen Einsparungen und die entstehenden Kosten sorgfältig erfasst und einander gegenübergestellt werden. Diese Aufgabe ist äußerst komplex, weil zusätzlich zu den leicht vorhersehbaren Anschaffungskosten schwer abschätzbare Kosten für organisatorische Veränderungen kommen. Die weitgehende Computerisierung zieht außerdem einen erheblichen Beratungs- und Schulungsaufwand nach sich.

Veränderungen durch Digitalisierung

Die Möglichkeiten des Einsatzes von Computerunterstützung ändern sich bei einer weitgehenden Digitalisierung von radiologischen Kliniken grundlegend.

Diese Veränderungen bringen neue Möglichkeiten mit sich (z.B. schneller Bildaustausch, quantitative Bildanalyse, Einsparung der Filmkosten), bergen aber auch neue Risiken für die Computerunterstützung. In einer komplett digitalen Welt sind die einzelnen Komponenten einem schnellen Wandel unterworfen; die Produktzyklen sind äußerst kurz. Zugleich ist es in der digitalen Welt erforderlich, dass alle Komponenten aufeinander abgestimmt und miteinander kompatibel sind. Insofern ist der Einsatz von Computerunterstützung nur dann planbar, wenn es verlässliche und anerkannte Standards für die Formate aller anfallenden Daten gibt. Außerdem ist ein Kern an radiologischer Software erforderlich, der relativ stabil und ausführlich dokumentiert ist. Wohldefinierte Softwareschnittstellen und Richtlinien für die Benutzungsschnittstellen müssen entwickelt werden, damit Softwareentwickler auf einer verlässlichen Basis spezielle Lösungen entwickeln können. Erst dadurch können solche Softwareentwicklungsprojekte kalkulierbar werden. Eine hoffnungsvolle Initiative bezüglich einer derartigen Integration ist die Initiative „Integrating the Healthcare“. Dieser 1998 gegründete Zusammenschluss von 12 Fachgesellschaften und mehr als 20 großen Firmen (darunter Siemens, Philipps, Picker, General Electric und Toshiba) hat sich zum Ziel gesetzt, Standardisierungsbemühungen anzustoßen und voranzutreiben. Es ist zu hoffen, dass diese Initiative in Deutschland große Verbreitung findet.

Eine Konsequenz aus den praktischen Schwierigkeiten der Integration komplexer Software in die klinischen Abläufe kann darin bestehen, entsprechende Dienstleistungen anzubieten. Das Aufbereiten von Daten, die aufwändige Erstellung von 3D-Modellen und quantitative Analysen werden dabei – ähnlich wie Labordienstleistungen – ausgelagert und in einer darauf spezialisierten Einrichtung übernommen. Diese Form der Computerunterstützung ist natürlich nicht überall anwendbar; insbesondere nicht bei Notfällen. In vielen Situationen, wie bei der Planung onkologischer Operationen, ist aber ausreichend Zeit vorhanden, um die Datenaufbereitung außer Haus erledigen zu lassen.

Fazit

In diesem Beitrag wurde versucht, den aktuellen Stand des Einsatzes von VR in der Radiologie zu charakterisieren und Perspektiven aufzuzeigen. Der Vergleich mit anderen Disziplinen hat sich dabei als nützlich erwiesen. Eine weitgehende Computerunterstützung in der bildbasierten Arbeit ist möglich und wünschenswert. Sie wird dazu beitragen, dass sich der Gebrauch von Bildern in der Medizin erheblich ausweiten wird und insofern die Rolle der Radiologie stärken. Computerunterstützung wird aber auch dazu beitragen, die Effizienz der radiologischen Arbeit zu erhöhen und teilweise sogar zu automatisieren. Die basale Diagnostik ist davon am ehesten betroffen. Die große Chance v.a. für die forschenden Radiologen besteht darin, sich an die Spitze dieser „Computerisierung“ zu stellen und sie zu gestalten.

Danksagung

Dieser Beitrag basiert auf intensiven Diskussionen mit unseren Kollegen Dr. Markus Lang, Sebastian Meyer und Dr. Guido Prause. Das Projekt zur Planung in der Leberchirurgie ist inspiriert von Prof. Klose (Medizinisches Zentrum für Radiologie am Klinikum der Philipps-Universität Marburg) und wurde außerdem mit Priv.-Doz. Fasel (Institut für Morphologie, Universitätsklinikum Genf), Prof. Galanski (Abteilung Experimentelle Radiologie/Diagnostische Radiologie an der Medizinischen Hochschule Hannover) und Prof. Oldhafer (Klinik für Allgemein- und Transplantationschirurgie an der Universität Essen) bearbeitet. Die radiologischen Daten, die den Abb. 3, 5 und 6 zugrunde liegen, wurden an der Abteilung von Prof. Galanski angefertigt. Abb. 2 basiert auf einem Datensatz von Priv.-Doz. Teubner, Städtisches Klinikum Pforzheim.

Literatur

1. Högemann D, Stamm G, Shin H, Oldhafer K-J, Schlitt HJ, Selle D, Peitgen HO (2000) **Individuelle Planung leberchirurgischer Eingriffe an einem virtuellen Modell der Leber und ihrer Leitstrukturen.** Radiologe 40: 267–273
2. Levinthal C (1966) **Molecular model-building by computers.** Sci Am 214: 42–52
3. Schumann D, Seemann M, Schoepf UJ, Haubner M, Krapichler C, Gebicke K, Reiser M, Englmaier K-H (1998) **Computergestützte Diagnostik basierend auf computergestützter Bildanalyse und 3D-Visualisierungen.** Radiologe 38: 799–809
4. Selle D (1999) **Analyse von Gefäßstrukturen in medizinischen Schichtdatensätzen für die computergestützte Operationsplanung.** Dissertation, Fachbereich Mathematik und Informatik, Universität Bremen, Shaker Verlag, Aachen
5. Stotz R (1963) **Man-machine facilities for computer-aided design.** IFIPS Proc Spring Joint Comput Conf 23: 323–328
6. Sutherland I (1963) **Sketch-pad: a man-machine graphical communication system.** IFIPS Proc Spring Joint Comput Conf 23: 329–345

B. Hamm, G. P. Krestin, M. Laniado, V. Nicolas
MRT von Abdomen und Becken

Stuttgart, New York: Thieme, 1999. 364 S., 383 Abb., 61 Tab., (ISBN 3-13-108921-0/696), geb., DM 298,—

Die Autoren berichten in dem vorliegenden Werk über die MRT als neue konkurrierende bildgebende Methode für die Diagnostik und Differentialdiagnostik von Erkrankungen im Abdomen und kleinen Becken.

Das Buch gliedert sich hierbei in 36 Kapitel, die konzeptionell durchgängig und schlüssig nach Einleitung, Indikation, Untersuchungstechnik, Kontraindikation und Bildgebung normaler und pathologischer Befunde aufgebaut sind. Hierdurch gelingt es dem Leser rasch sich einzudenken. Obwohl gerade in der MRT der Stand des Wissens zum Zeitpunkt der Veröffentlichung eines Buches schon überholt sein kann, ist es den Autoren gelungen, die Übersicht zu behalten und das technisch Mögliche vom Nützlichen zu unterscheiden. Gut gefallen haben mir insbesondere die Art „Kochrezepte“ die Angaben zu sinnvollen MR-Sequenzen und Protokollen liefern. Somit gelingt es gerade dem Einsteiger, Untersuchungen rasch zu lernen oder kann als praktische Unterstützung am Arbeitsplatz dienen. Das Bildmaterial darf als erstklassig gelten.

Aufgrund seines adäquaten Preis-Leistungs-Verhältnisses gehört das Buch in jede Bibliothek einer radiologischen Abteilung oder radiologischen Praxis und eignet sich auch hervorragend in der Facharzt-Vorbereitung.

H. Hawighorst (Heidelberg)