



LAO 36 FLUORO 34 NORMAL

FFA cm 100
TIME mm:ss 0:37

RAO 29 FLUORO NOR

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Operations-Trainingsysteme in der Medizin

Schlüssellochchirurgie will gelernt sein – aber möglichst nicht am lebenden Patienten. Der angehende Arzt übt die schwierigen Techniken an einem künstlichen Ersatz, der ihm durch ausgefeilte Computersimulationen eine lebensechte Operationssituation vorspiegelt.

Von Daniel Gembris, Jürgen Hesser und Reinhard Männer

Minimalinvasive Verfahren (»Schlüssellochchirurgie«) haben die Chirurgie in den letzten Jahrzehnten revolutioniert. Mit millimetergroßem Gerät kann der Arzt Engstellen in Herzkranzgefäßen von innen heraus wieder erweitern und Wucherungen im Darm ohne offene Operation entfernen. Das Verfahren erspart dem Patienten nicht nur den großen Schnitt mitsamt den zugehörigen Belastungen, sondern eröffnet auch neue, ungeahnte Möglichkeiten. So erreicht seit wenigen Jahren der Augenchirurg mit seinen Miniaturinstrumenten die Netzhaut an der hinteren Wand des Auges, ohne die Linse oder den dahintergelegenen Glaskörper zu beeinträchtigen.

Die neue Technik stellt allerdings hohe Ansprüche an die manuelle Geschicklichkeit des Arztes. Bei einer Operation an der Netzhaut kann ein Fehlgreif von nur einem Zehntelmillimeter das Auge vollständig erblinden lassen.

Wie kann man die notwendige Fingerfertigkeit erlernen? Ein gebräuchliches Verfahren ist das Üben am so genannten Tiermodell. Beispielsweise operiert der angehende Chirurg zu Trainingszwecken

am Auge eines toten Schweins. Allerdings sind die Tierorgane anatomisch oft völlig anders aufgebaut als die des Menschen, sodass die erworbenen Fähigkeiten nur ansatzweise übertragbar sind. Zudem sind viele Krankheitsbilder des Menschen im Tiermodell nicht vorhanden. Daher erlernt der Mikrochirurg auch heute noch in der Regel sein Handwerk, indem er unter der Aufsicht eines erfahrenen Kollegen direkt am Patienten operiert. Da er behutsam in die Komplexität der Eingriffe eingeführt werden muss, dauert eine solche Ausbildung typischerweise mehrere Jahre. Selbst in dieser langen Zeit pflegen die selteneren Komplikationen nicht so oft aufzutreten, dass man den Umgang mit ihnen angemessen üben könnte. Nur zu oft gerät daher der fertig ausgebildete Arzt in völlig neue Situationen und muss improvisieren. Dabei macht er naturgemäß mehr Fehler, mit entsprechenden Konsequenzen für den Patienten.

Wir können eine wesentlich risikoärmere Ausbildungsform anbieten: die computergestützte Simulation. Ein solches Trainingssystem beruht auf dem Prinzip der Virtuellen Realität: Der Arzt sieht am Simulator die gleichen Bilder und fühlt die gleichen Widerstände und Kräfte wie bei einer richtigen Operation. Bilder wie Kräfte werden jedoch von



CATHI GMBH

▲ Die Ausstattung ist wie in einem echten Katheterlabor (siehe auch das Bild links). Aber auf dem Tisch liegt statt eines Patienten eine Puppe, und die Bilder auf den Monitoren kommen nicht von einer Röntgenkamera, sondern sind durch ein Computerprogramm errechnet. Mit dem System Cathi kann man den Ernstfall einer Ballondilatation üben, ohne dass ein Tropfen Blut fließt.

einem Rechner erzeugt und in geeigneter Weise präsentiert.

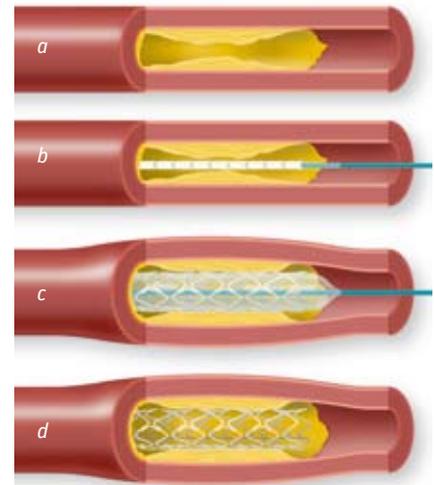
So beobachtet ein Netzhautchirurg in der Realität das Operationsfeld unter einem Stereomikroskop und arbeitet mit einer Pinzette, die er in das Auge eingeführt hat. In der virtuellen Realität tritt an die Stelle des Patientenauges eine Attrappe. Der Rechner registriert die Bewegung der Pinzette und setzt sie in Bildern um. Auf einem dem Stereomikroskop nachempfundenen Display sieht der Arzt eine virtuelle Pinzette, die sich genauso bewegt wie die echte. Auch das Auge und das Krankheitsbild sind virtuell, das heißt, sie existieren nur als Modelle im Rechner und können jederzeit nach Belieben ausgewechselt werden. Das System kann dem Arzt auch seltene Komplikationen so oft präsentieren, bis er den Umgang mit ihnen beherrscht. ▷

▷ Zudem werden die Leistungen verschiedener »Schüler« vergleichbar, weil sie alle mit den gleichen »Fällen« konfrontiert werden.

Wenn der Arzt mit der Pinzette zugreift, wird die Reaktion des Gewebes in Echtzeit berechnet und in dem virtuellen Stereomikroskop dargestellt. So erlebt der Arzt unmittelbar, dass die Netzhaut blutet, wenn er sie verletzt – obwohl sie im Simulator nicht physisch existiert. Ein solches Simulationssystem hilft dem Arzt insbesondere, die Koordination seiner Hände und seiner Augen zu trainieren, an die bei den beschriebenen Operationen besonders hohe Anforderungen gestellt werden.

Eine realistische Nachbildung der Operationsabläufe setzt besonders leistungsfähige Rechner und schnelle Programme voraus. Der trainierende Arzt muss in den Zustand der »Immersion« versetzt werden, in dem er sich ungestört der Illusion hingeben kann, er operiere nicht in der virtuellen, sondern in der echten Welt. Damit dies gelingt, muss jede seiner Aktionen unmittelbar zu einer Reaktion des Systems führen. Bewegt er die Pinzette, so muss der Computer deren neue Position bestimmen, die Auswirkungen der Bewegung auf das Gewebe berechnen und das Ergebnis bildlich darstellen, und das alles ungefähr fünfzigmal pro Sekunde. Bei einer langsameren Bildfolge und entsprechend längerer Verzögerung empfindet der Arzt das Verhalten des Systems als unnatürlich, und die Illusion geht verloren. Um diese kurze Reaktionszeit zu erreichen, muss die ganze Kette der Datenverarbeitungsschritte optimiert werden, angefangen von der Positions-

▶ **Herzinfarktbehandlung durch Ballondilatation:** In die verengte Stelle der Koronararterie (a) wird ein Ballon eingeführt (b) und aufgeblasen (c), wodurch die Ablagerungen in die Arterienwand gedrückt werden. Der mit dem Ballon zusammen auf die richtige Weite gedehnte Stent bleibt zur Stabilisierung zurück (d).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

vermessung der Operationsinstrumente über die biomechanische Simulation der beteiligten Gewebe bis hin zur Computergrafik.

Der Einsatz von virtueller Realität zum Training ist nicht neu. Das bekannteste Beispiel ist der Flugsimulator zur Ausbildung von Piloten. Operationstrainingssysteme werden seit etwa fünfzehn Jahren entwickelt. Allerdings hat ihr praktischer Einsatz erst in letzter Zeit deutlich zugenommen, nachdem Studien ihre Effizienz belegt haben. Mittlerweile ist für besonders anspruchsvolle Operationen das vorhergehende Training an einem Simulationssystem sogar zwingend vorgeschrieben, so zum Beispiel von der amerikanischen Gesundheitsbehörde FDA für Kathetereingriffe an der Halsschlagader.

Das Institut für Computerunterstützte Medizin (ICM) der Universitäten Mannheim und Heidelberg mit Standort in Mannheim ist führend bei der Entwicklung realitätsnaher Trainingssysteme für die Medizin und hat in diesem

Bereich schon zwei Firmen ausgegründet. Bis heute haben wir drei verschiedene Trainingssysteme realisiert:

- ▶ Cathi (*Catheter instruction system*) für Eingriffe an Blutgefäßen,
- ▶ Eyesi (*Eye surgery simulator*) für Augenoperationen und
- ▶ EndoSim (*Endoscopic Simulator*) für endoskopische Eingriffe im Darm.

Diese drei Systeme wollen wir im Folgenden vorstellen. Sie basieren zwar auf grundlegend verschiedenen Computerprogrammen, haben aber große Gemeinsamkeiten in der Grafik, der Simulation der physikalischen Wechselwirkungen von Instrument und Gewebe sowie der Konstruktion der Eingabesysteme.

Cathi: Orientierung im Geäst der Herzkranzgefäße

Der Herzinfarkt gehört in der westlichen Welt zu den häufigsten Todesursachen. Er entsteht dadurch, dass eine der das Herz versorgenden Arterien, ein Herzkranzgefäß, sich durch Ablagerungen an der Innenwand verengt oder gänzlich verschließt. Mangels Blutversorgung erbringt der entsprechende Teil des Herzmuskels seine Leistung nicht mehr oder stirbt sogar ab. Je größer der Infarktbereich, desto eher droht der Tod des Patienten. Eine klassische Therapie ist der Bypass. Man öffnet den Brustkorb des Patienten und legt eine Umleitung an dem verstopften Gefäß vorbei. Wesentlich unblutiger ist die perkutane transluminale Coronar-Angioplastie (PTCA), auch Ballondilatation genannt: Man macht die Engstelle wieder durchlässig, indem man die Ablagerungen in die Wand hineinpresst. Dazu muss man einen Ballon an die richtige Stelle bringen und mit hohem Druck (bis über 30 bar)



aufblasen. Damit nach dieser Behandlung das Gefäß weiterhin offen bleibt, stabilisiert man es, indem man an der bisherigen Engstelle ein steifes Drahtgeflecht, einen so genannten Stent, einsetzt (Bild links). Die PTCA ist mittlerweile ein Routineeingriff, der allein in Deutschland über 200 000-mal pro Jahr praktiziert wird.

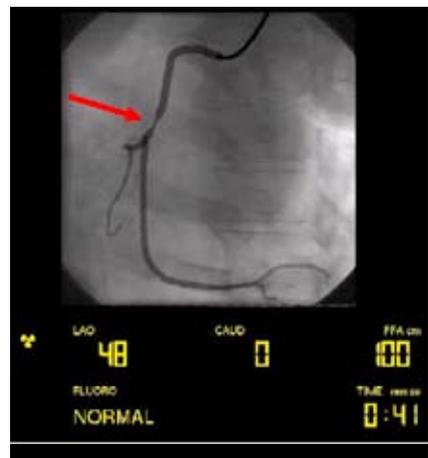
Die einzelnen Schritte dieser Operation erfordern beträchtliches Fingerspitzengefühl. An der Leiste, manchmal auch im Arm, bringt der Kardiologe über eine Hohlnadel einen Führungskatheter, einen flexiblen Schlauch mit einem Außendurchmesser von etwa zwei Millimetern, in die Arterie ein und schiebt ihn entgegen dem Blutstrom durch die Aorta bis zu der Stelle, wo die Herzkranzgefäße abzweigen, dem so genannten Ostium.

Der nächste Schritt ist die Diagnose unter Röntgendurchleuchtung. Da die Gefäße dieselbe Röntgendichte haben wie das umliegende Gewebe, müssen sie durch ein Kontrastmittel sichtbar gemacht werden, das Röntgenstrahlen absorbiert und daher im Röntgenbild schwarz erscheint. (Im traditionellen Röntgenbild wäre es weiß statt schwarz; aber hier wird das ganze Röntgenbild zur besseren Sichtbarkeit invertiert wie beim

Übergang vom fotografischen Negativ zum Positiv.) Diese – in der Regel jodhaltige – Flüssigkeit wird durch den Katheter injiziert und mit dem Blutstrom in die Herzkranzgefäße transportiert. Verengungen (Stenosen) oder Verschlüsse (Thromben) zeichnen sich dann dadurch im Röntgenbild ab, dass eine dicke schwarze Linie dünn wird oder plötzlich endet (Bild rechts). Das sieht man allerdings nur, wenn die Röntgenkameras im richtigen Winkel zum Gefäß orientiert sind und ihr Kontrast geeignet eingestellt ist. Diese Justierung erfordert ein hohes Maß an Erfahrung.

Hat der Arzt eine behandlungsbedürftige Engstelle gefunden, schiebt er durch den schon gelegten Katheter einen dünnen Draht. Dieser ist am Ende leicht gebogen, aber so weich, dass er innerhalb des Katheters eine gestreckte Form annimmt. Erst wenn er am Ende austritt, krümmt er sich wieder. Indem der Arzt ihn am hinteren Ende dreht, kann er ihn an Abzweigungen in die gewünschte Richtung bis zur Engstelle und durch sie hindurch lenken; welche Abzweigung die richtige ist, muss er dem Röntgenbild entnehmen.

Hat der Draht die Engstelle passiert, dient er als Führungsschiene für den Ballon und möglicherweise den Stent, die



▲ So stellt der Simulator Cathi ein von Kontrastmittel durchflossenes Herzkranzgefäß dar. Die Stenose ist durch einen roten Pfeil markiert.

beide mit Kathetern zum Zielort geschoben werden. Mit deren Aufdehnung ist die Operation beendet.

Es leuchtet unmittelbar ein, dass dieser Eingriff einschließlich der Maßnahmen bei Komplikationen viel Übung erfordert. Andererseits ist für intensives Üben wenig Raum, wenn ein Patient mit einem lebensgefährlichen Herzinfarkt auf dem Operationstisch liegt. Einen Ausweg aus dem Dilemma bietet der Simulator Cathi. Er ist das Werk von Ulrike Kornmesser, die ihn in ihrer Dissertation in Mannheim entwickelt hat und mittlerweile Geschäftsführerin der gleichnamigen Firma ist.

Auf den ersten Blick sieht Cathi aus wie ein Ausschnitt aus einem echten Katheterlabor (Eröffnungsbild). Wir verwenden die Originalinstrumente wie Kontrastmittelspritzen, Drähte und Katheter. Lediglich Patient und Röntgenanlage sind virtuell.

Bewegt der Arzt Draht oder Katheter, wird das über ein spezielles Trackingssystem gemessen und dem System mitgeteilt. Dieses bestimmt, wie sich das Instrument im virtuellen Gefäßbaum bewegt, und errechnet ein entsprechendes Röntgenbild des Patienten, in dem das Instrument geometrisch korrekt eingezeichnet wird. Injiziert der Arzt Kontrastmittel, so wird dem System mitgeteilt, wie viel Kubikzentimeter pro Sekunde aus dem Katheter strömen. Der Computer simuliert daraufhin anhand eines physikalischen Modells die Ausbreitung des Kontrastmittels im Gefäß ▷

KOLLISIONSERKENNUNG

OBJEKTE IN DER VIRTUELLEN WELT können ebenso wie in der realen Kräfte aufeinander ausüben, etwa die für die Operation verwendete Pinzette auf die Netzhaut. Praktisch bedeutsam sind nur Kräfte durch unmittelbaren Kontakt; es kommt also darauf an, welche Gegenstände einen sehr geringen Abstand voneinander haben. Wollte man jedoch bei n Gegenständen sämtliche Abstände zwischen je zweien von ihnen bestimmen, müsste man ungefähr $n^2/2$ solcher Abstände berechnen. Da in der virtuellen Welt eine Pinzette oder eine Membran aus mehreren tausend Dreiecken besteht, wären das Millionen von Rechenoperationen. Dieser Aufwand lässt sich auf zwei Wegen drastisch reduzieren.

► **Vereinfachung der räumlichen Struktur:** Man teilt den Raum in Einheiten gleicher Größe auf, ähnlich den Fächern in einem Regal. Die Dreiecke jedes Objekts werden in diese Fächer einsortiert (wobei möglicherweise ein Dreieck in mehrere Fächer gerät). Kollisionen können nur zwischen Dreiecken stattfinden, die im selben Fach liegen. Die genauere Untersuchung kann sich daher auf den Inhalt der einzelnen Fächer beschränken, was die Anzahl der Rechenoperationen auf einige tausend reduziert.

► **Vereinfachung der Objektstruktur:** Man konstruiert einfache geometrische Körper, beispielsweise Quader, welche die Objekte enthalten. Wenn zwei dieser Quader keinen Punkt gemeinsam haben, können auch die in ihnen enthaltenen Objekte nicht kollidieren. Wenn doch, kann man die betroffenen Quader – und nur diese – in Teilquader zerlegen, dadurch die Anzahl der denkbaren Kollisionen weiter reduzieren, die verbleibenden Teilquader nochmals zerlegen und so weiter. So hält sich der Rechenaufwand auch dann in Grenzen, wenn man einer genaueren Simulation zuliebe die Objekte durch noch mehr noch kleinere Dreiecke darstellt.

▷ und färbt die Gefäßstrukturen im Bild entsprechend ein.

Das System weiß also gewissermaßen, wie die Herzkranzgefäße des virtuellen Patienten verlaufen. Genauer gesagt: Es hat verschiedene Gefäßgeometrien vorrätig, die es zu Übungszwecken einspielen kann. Diese haben wir aus Röntgenbildern rekonstruiert, die während normaler Eingriffe an Patienten aufgenommen wurden. Dabei nutzen wir aus, dass in manchen Katheterlaboren so genannte Biplanaranlagen stehen, die gleichzeitig zwei Röntgenbilder in zueinander senkrechten Richtungen aufnehmen. Wie beim gewöhnlichen beidäugigen Sehen kann man durch Verknüpfung der Informationen aus beiden Bildern auch die Entfernung des Objekts von der Kamera erschließen. Bezieht man zusätzlich noch Wissen über charakteristische Eigenschaften der Gefäße mit ein, beispielsweise dass ein Gefäß nicht scharf umknickt, nicht blind endet und seinen Durchmesser nicht plötzlich stark verändert, gewinnt man ein hinreichend vollständiges Bild des Gefäßbaums.

Neue Entwicklungen, die schon marktreif sind, betreffen die Navigation des Führungskatheters sowie Operationen in anderen Bereichen wie an den Halsschlagadern oder den Becken-Bein-Gefäßen. Auch spezielle Zusatzinstrumente wurden schon simuliert, darunter so genannte *cutting-balloons*, die stark verkalkte Bereiche aufbrechen, oder auch IVUS-Systeme (*intravascular ultrasound*), bei denen per Ultraschall im Katheter

ein lokales Bild der untersuchten Gefäße aufgenommen werden kann. In diesem Jahr soll eine Erweiterung für die Kinderkardiologie (gerade hier gibt es wenig Möglichkeiten zum Trainieren) und für Verschlüsse in der Herzscheidewand auf den Markt kommen.

EyeSi: Eingriffe an der Augenlinse und der Netzhaut üben

Operationen am Auge (Bild unten) erfordern ebenfalls sehr große Fertigkeiten. Eine besondere Schwierigkeit liegt darin, dass der Arzt die Bewegung seiner Finger, mit denen er die Instrumente führt, mit den im Operationsmikroskop stark vergrößerten Bildern der Instrumente koordinieren muss.

Zu den bekanntesten Operationen zählt das Ersetzen einer Augenlinse, die durch den grauen Star trüb geworden ist. Dazu muss das vordere Auge geöffnet und die Linse so weit zerkleinert werden, dass die Teile entfernt werden können. Anschließend wird eine künstliche Linse eingesetzt.

Seltener, aber auch wesentlich schwieriger sind Operationen hinter der Linse. Wenn sich infolge einer Erkrankung der Glaskörper des Auges trübt, kann man ihn durch ein Öl mit ungefähr dem gleichen Brechungsindex ersetzen, sodass die Abbildungseigenschaften des Auges unverändert bleiben. Bei dieser Operation führt der Augenchirurg zwei Instrumente, die wie Nadeln aussehen, neben der Linse in das Auge ein. Eines davon ist eine Lichtquelle, das andere ein Vitrektor, eine Art Mikrostaubsauger, der durch eine Öffnung am Ende der Nadel Teile des Glaskörpers einsaugt und nach außen spült. Die beiden Instrumente dürfen dabei die Netzhaut (Retina), den »Lichtsensorn« des Auges, nicht berühren, weil dies zur Erblindung führen kann.

Noch schwieriger sind Operationen direkt an der Netzhaut. Infolge einer diabetischen Erkrankung kann sich unmittelbar vor der Netzhaut eine Membran bilden, welche die Sehfähigkeit des Patienten reduziert. Mit einer extrem feinen Pinzette kann der Arzt eine solche Membran von der Netzhaut lösen, aus dem Auge entfernen und damit die Sehkraft wiederherstellen.

Wenn die Netzhaut im Bereich des schärfsten Sehens (der Makula) degeneriert ist, aber in anderen Bereichen, wo es eigentlich nicht so dringend notwendig wäre, besser erhaltene Netzhaut vorhan-

den ist, kann der Chirurg das »schlechte« Netzhautstück mit einem »guten« vertauschen. Dazu spritzt er Flüssigkeit zwischen die Netzhaut und das darunterliegende Gewebe, sodass sie sich löst und an die neue Stelle bewegt werden kann.

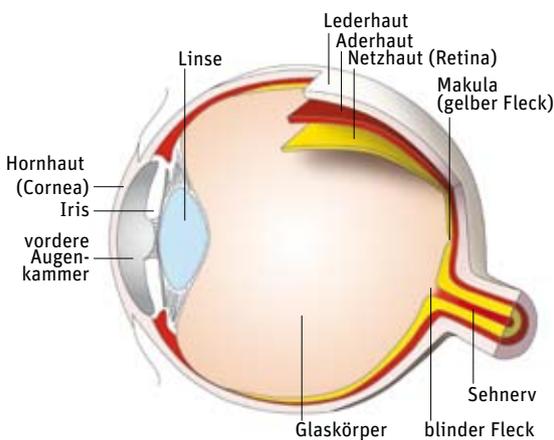
Markus Schill und Clemens Wagner haben als Trainingsstation für derartige Eingriffe das System EyeSi entwickelt und darüber am ICM promoviert. Inzwischen arbeiten beide bei der Firma VRmagic in Mannheim, einer Ausgründung des ICM, an der Weiterentwicklung und Vermarktung des Systems. Bereits heute hat das Training an diesem System das »wet lab« mit den Schweineaugen weit gehend verdrängt.

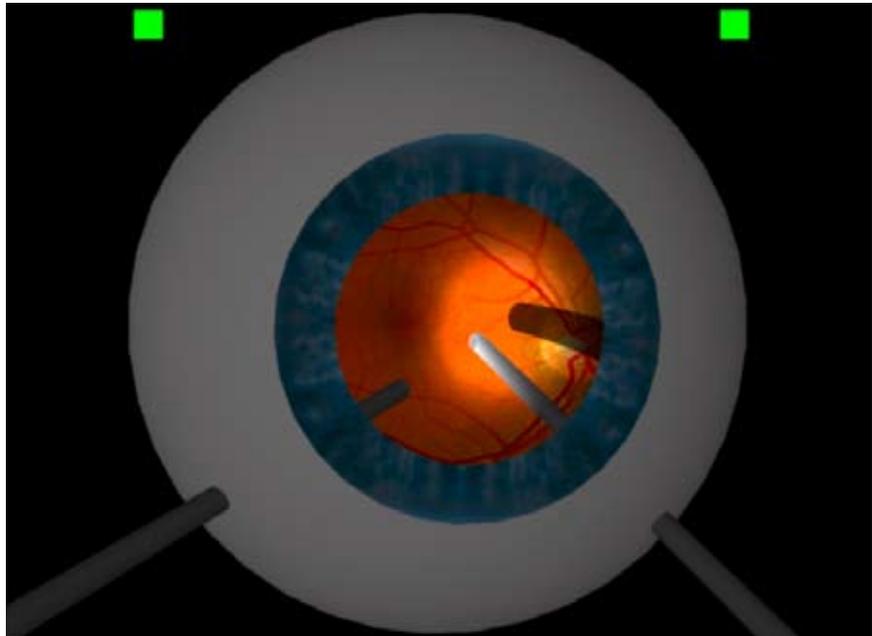
Der lernende Chirurg führt originalgetreue Instrumente in die mechanische Nachbildung eines Auges ein und blickt in ein Sichtsystem, das einem Stereomikroskop nachempfunden ist. Durch Okulare mit verstellbarem Augenabstand und Dioptrienkorrektur betrachtet er zwei daumennagelgroße, hochauflösende Mikrodisplays, in die das System die beiden Komponenten eines Stereobildpaares einspielt. Wie bei einem echten Stereomikroskop kann der Benutzer zwischen verschiedenen Linsensystemen wählen. Die (geringe) Tiefenschärfe sowie Licht- und Schatteneffekte werden ebenfalls realistisch nachgebildet.

Um die Fünffzigstelsekunde Zeitverzug zwischen Aktion des Benutzers und Reaktion des Systems einzuhalten, muss jeder Teil dieser Reaktion auf Geschwindigkeit optimiert werden. Hochauflösende Kameras verfolgen die Bewegungen der Instrumente und des mechanischen Auges mit einer Genauigkeit von weniger als einem Millimeter. Ein PC-Programm, das auf den Kamerabildern die farbigen Markierungen auf den Objekten findet und daraus deren Positionen im Raum berechnet, wäre jedoch zu langsam. Wir haben diese Aufgabe einem eigens konfigurierten Mikrochip (einem FPGA, siehe Spektrum der Wissenschaft 8/1997, S. 44) übertragen.

Als Nächstes muss das System feststellen, ob zum Beispiel ein Instrument die Netzhaut berührt. Im Prinzip könnte jede Stelle eines Instruments jede Stelle des Auges oder auch eines anderen Instruments berühren. Diese Fälle alle einzeln durchzuprüfen wäre viel zu zeitaufwändig. Stattdessen verwenden wir hierarchische Methoden: Wir teilen das Operationsgebiet zunächst grob in Teil-

▼ Mit minimalinvasiven Instrumenten kann man in den Glaskörper des menschlichen Auges eindringen, ohne die Linse zu verletzen.





ALLE BILDER AUF DIESER SEITE: VPMAGIC/DRBH

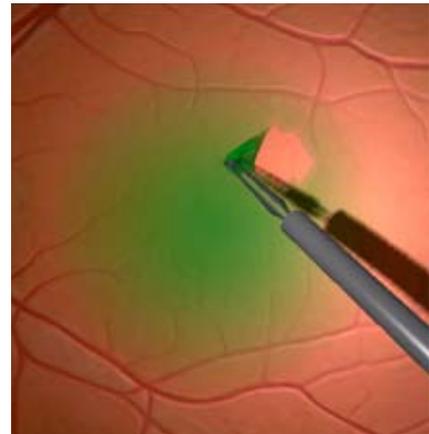
gebiete auf und verfeinern diese Aufteilung nur dort, wo sich Gegenstände nahelkommen (Kasten S. 45).

Findet eine Berührung statt, muss die daraus folgende Deformation – zum Beispiel die Eindellung der Netzhaut durch ein Instrument – berechnet werden. Die Gewebesimulation in EyeSi basiert auf einem modifizierten Feder-Masse-Modell (Kasten S. 48). So wird eine Membran als eine Menge von Massepunkten dargestellt, die mit Federn verbunden sind. Wird ein Massepunkt verschoben, so übt er über die an ihm hängenden Federn Kräfte auf seine Nachbarn aus. Daraufhin bewegen sich diese Punkte, ziehen über ihre Federn an ihren Nachbarpunkten und so weiter, sodass sich die ursprüngliche Verschiebung über eine gewisse Strecke ausbreitet. Diese genäherte Lösung der Bewegungsgleichungen kann ausreichend schnell berechnet werden.

Aus der veränderten Geometrie sind nun die Bilder zu berechnen, die das linke und das rechte Auge im Stereomikroskop sehen würden. Diese Aufgabe übernimmt eine moderne Grafikkarte. Da sich der Chirurg während der Operation vollständig auf visuelle Informationen verlassen muss, haben wir auf eine realistische Visualisierung des Operationsfelds einschließlich Beleuchtungssituation und Schattenbildung besonderen Wert gelegt.

Während der »Schüler« in der virtuellen Welt arbeitet, bestimmt der »Lehrer« über einen berührungsempfindli-

▲ **Das Trainingssystem EyeSi (links):** In der austauschbaren Gesichtsmaske auf dem höhenverstellbaren Tisch befindet sich ein mechanisches Auge, wahlweise mit Zugängen für Eingriffe am Glaskörper oder Katarakt-Operationen. Im simulierten Operationsmikroskop (oben) ist ebenso wie im echten nur der von der Lichtquelle ausgeleuchtete Bereich gut zu erkennen. Die grün eingefärbte Membran vor der Netzhaut (rechts) reißt ab, wenn man sie mit der simulierten Pinzette ungeschickt greift.



chen Bildschirm (Touchscreen), welchen Fall der Schüler bearbeiten soll und welche Eigenschaften die Instrumente und Pedale des Geräts haben sollen. Um der Situation im Operationssaal möglichst nahezukommen, haben wir die Benutzeroberflächen gebräuchlicher Vitrektomie- und Phako-Maschinen (Glaskörper- und Linsenextraktionsmaschinen) getreulich nachgebildet. Über den Touchscreen kann man auch aufgezeichnete Trainingssitzungen wiedergeben und Theoriekurse ablaufen lassen.

EndoSim: Navigieren durch die Schlingen des Darms

Für die Diagnose und die Therapie von Erkrankungen innerhalb des Verdauungstrakts setzt man heute flexible Endoskope ein. Das sind schlauchartige Geräte, die in den Mund (Gastroskopie) oder den After (Koloskopie) eingeführt

werden. Mit Stellrädern am hinteren Ende kann der Arzt über eine Seilzugmechanik das Vorderende biegen und damit sowohl in die gewünschte Richtung lenken als auch den Blick gezielt auf bestimmte Stellen des Darms richten. Einblick in das Innere des Patienten bekommt man in älteren Geräten durch Glasfasern, neuerdings durch eine Miniaturkamera an der Spitze des Geräts, die ihre Bilder elektronisch auf einen Monitor überträgt.

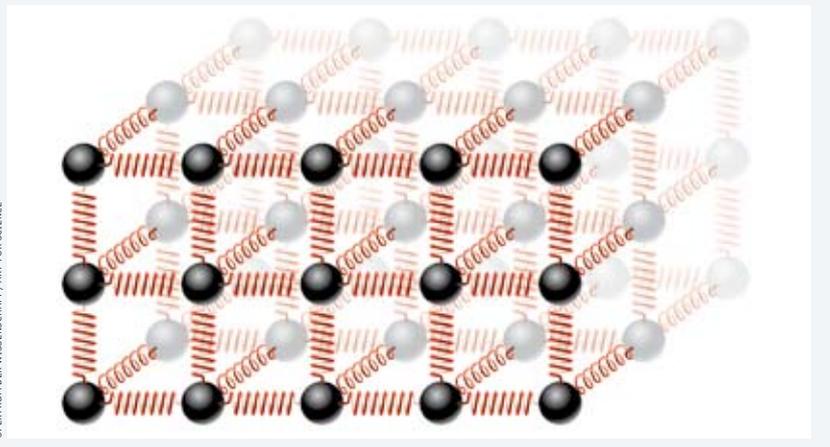
Bei einer Koloskopie muss der Arzt das Endoskop durch den gesamten Dickdarm mitsamt allen Windungen und Kurven navigieren, um ihn zum Beispiel auf Polypen überprüfen zu können. Die Spitze des Geräts muss er daher möglichst in der Mitte des Darms halten, insbesondere in Kurven.

Dabei ist trotz sorgfältiger Entleerung des Darms vor der Operation das ▶

GEWEBESIMULATION

IM PRINZIP BESTEHT DAS KÖRPERGEWEBE DES MENSCHEN wie jede Materie aus trägen Massen, die mehr oder weniger elastisch miteinander verbunden sind und deren Bewegungen durch Reibungseffekte gedämpft sind. Für die physikalische Modellierung pflegt man die drei Effekte Trägheit, Elastizität und Reibung zu trennen. Ein Stück Gewebe wird dann durch eine Ansammlung von Massepunkten wiedergegeben, die durch gedämpfte Federn miteinander verbunden sind. Das ergibt für jeden Massepunkt eine Kräftegleichung und daraus mit dem Gesetz »Kraft ist Masse mal Beschleunigung« eine (gewöhnliche) Differenzialgleichung, welche die Bewegung des Massepunkts beschreibt. Die Lösung dieses gekoppelten Systems von Differenzialgleichungen besteht darin, aus den gegenwärtigen Positionen der Massepunkte deren Positionen eine kurze Zeit später zu bestimmen. Wenn dieses Zeitintervall nicht zu lang ist und man gewisse Kompromisse bei der Genauigkeit eingeht, ist eine näherungsweise Lösung sehr schnell zu berechnen.

Im Prinzip könnte man dieses Modell mitsamt allen Konstanten – Massen, Federkonstanten, Reibungskoeffizienten – aus den physikalischen Eigenschaften des Materials herleiten. Die so gewonnenen Modelle sind jedoch in der Regel zu kompliziert, als dass ein Computer sie in der verfügbaren Zeit durchrechnen könnte. Stattdessen wählt man ein möglichst einfaches Modell und modifiziert dessen Parameter so lange, bis das Verhalten des Modellsystems dem Vorbild hinreichend nahekommt. Solche deskriptiven Modelle werden fast durchgehend in medizinischen Simulatoren eingesetzt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

▷ Kamerabild für eine Orientierung oft nicht ausreichend. Daher navigiert der Arzt sowohl nach Sicht als auch nach Gefühl: Wenn der Endoskopschlauch an die Darmwand stößt, sieht er das nicht unbedingt auf dem Monitor, sondern spürt es an dem verstärkten Widerstand, den das Gerät beim Weiterschieben erfährt. Je nach Lage des Schlauchs ergeben sich elastische oder Reibungskräfte, die zu unerwarteten Effekten führen können: Ist das Koloskop, dem (durch den Eingriff verformten) Darm folgend, am Vorderende zu einer Schlinge gekrümmt, und man lässt es los, streckt es sich mitunter derart, dass es ein Stück weit aus dem Körper wieder herausgeschoben wird. Die Verspannung des Geräts macht sich auch dadurch bemerkbar, dass sich die Navigationsräder immer schwerer dre-

hen lassen – auch ein Hinweis darauf, dass die Situation verbessert werden müsste.

Während der Arzt bei der Herzkathe- ter- und der Augenoperation kaum Kräfte wahrnimmt, liefern diese ihm bei der Endoskopie entscheidende Hinweise auf die Operationssituation. Bei dem Trainingsgerät EndoSim, das zum Erlernen der Navigation bei einer Endoskopie sowie kleinerer Eingriffe dient, haben wir deswegen besonderen Wert auf eine realistische Krafterückkopplung (*force feedback*) gelegt. Wesentliche Entwicklungsarbeiten an EndoSim hat Olaf Körner in seiner Dissertation am ICM geleistet; die Fortführung dieses Projekts liegt in den Händen unseres Doktoranden Klaus Rieger.

Statt in den Darm eines echten Patienten führt der Schüler das – modifi-

zierte – Endoskop in ein mechanisches Gerät ein (Kasten rechts). Ein Computer berechnet das Bild, das die Kamera in der Spitze des Endoskops aufnehmen würde, und zeigt es auf einem Monitor an. Zugleich berechnet er die Kräfte, die auf das Gerät wirken würden, und realisiert sie mit Hilfe so genannter Force-Feedback-Geräte. Bei EndoSim geschieht das mit je einem Motor pro Freiheitsgrad des Endoskops.

Für die Kraftberechnung verwenden wir ein deskriptives Modell. Dabei unterscheiden wir vier verschiedene Arten von Interaktion zwischen Endoskopspitze und Darm (Bild S. 50 oben). Für die Feinanpassung unseres Modells haben wir die Parameter so lange variiert, bis sich der nachgemachte Darm für erfahrene Ärzte, die wir um Rat fragten, so anfühlte wie ein echter. Das geometrische Modell des Darms wurde aus einem Visible-Human-Datensatz gewonnen (Bild S. 50 unten), den die Arbeitsgruppe von Karl Heinz Höhne am Universitätsklinikum Eppendorf in Hamburg entwickelt hat (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 9/2001, S. 46). Zusätzlich zur Krafterückkopplung kann sich der Arzt auch akustisch darauf hinweisen lassen, wenn er das Endoskop in eine schmerzhafte Lage gebracht hat: Der virtuelle Patient stöhnt.

Üben am individuellen Modell

Eine Neuentwicklung gibt dem Übenden darüber hinaus Hinweise, wie er aus einer verfahrenen Situation wieder herauskommt: Auf Wunsch weist ihm das System einen Weg aus der Verklebung, den es aus den aktuellen Daten mittels heuristischer Verfahren berechnet.

Mit unseren Bemühungen um Operationstrainingssysteme sind wir nicht allein. Simulationssysteme werden entwickelt

- ▶ für die Zahn-, Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie in der oben genannten Arbeitsgruppe von Karl Heinz Höhne;
- ▶ für Bauchoperationen und gynäkologische Eingriffe von Uwe Kühnapfel und seinen Mitarbeitern am Forschungszentrum Karlsruhe;
- ▶ für Untersuchungen am Kniegelenk von Robert Riener und Mitarbeitern an der Technischen Universität München;
- ▶ für Ultraschallaufnahmen, die endoskopische Untersuchung von Gelenken, die Untersuchung des Naseninneren sowie gynäkologische oder den Magen be- ▷

KRAFTRÜCKKOPPLUNG

OB ES EINE KAFFEETASSE ZU HALTEN, eine Schraube festzuziehen, zwei kompliziert geformte Bauteile zusammensetzen oder einen flexiblen Schlauch schonend in den Darm eines Patienten einzuführen gilt: Für viele feinmotorische Tätigkeiten regeln wir unsere eigenen Bewegungen nahezu unbewusst in Abhängigkeit von dem Widerstand, den das Werkstück der Bewegung entgegensetzt. In dem Endoskopie-Simulator EndoSim muss diese Widerstandskraft stellvertretend für den echten Darm von Motoren aufgebracht werden, die auf das vom Benutzer gehaltene Instrument wirken.

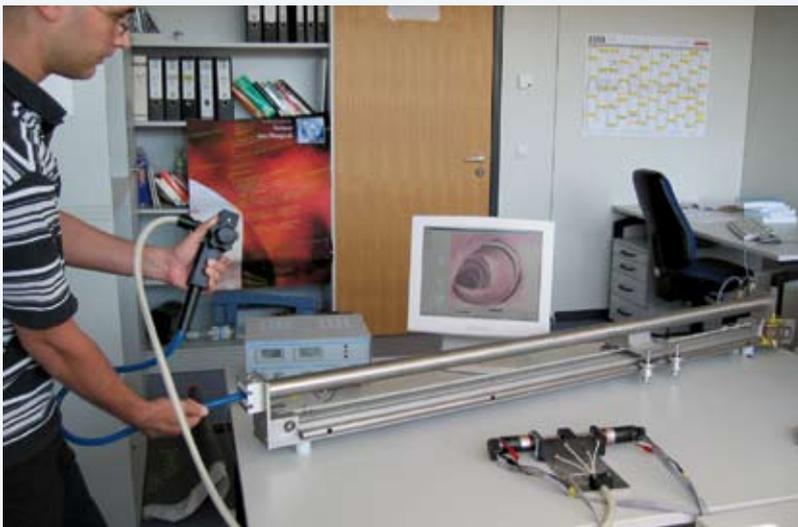
Bei einem echten Endoskop endet der Schlauch in einem Handgriff. Daran sind zwei Stellräder angebracht, mit denen der Benutzer die Spitze des Schlauchs in zwei zueinander senkrechten Richtungen verbiegen kann.

Im Simulator EndoSim läuft der Schlauch in einem Führungsrohr, das auf der Unterseite geschlitzt ist. Die Spitze des Schlauchs ist über ein Abschlusstück und eine Stange, die durch den Schlitz im Rohr läuft, mit einem Schlitten verbunden. Dieser wird auf einer Aluminiumschiene geführt und über einen Zahnriemen von einem Motor angetrieben. Der liefert die Widerstandskraft gegen Vorschieben und Zurückziehen des Schlauchs.

Das Abschlusstück ist so auf der Stange montiert, dass der Schlauch in sich drehbar bleibt. In seiner Verlängerung sitzt ein weiterer Motor, der so lang und dünn ist, dass er mitsamt dem Schlauch im Rohr vor- und zurückgleiten kann und zugleich genügend Kraft aufbringt, um dem Versuch des Benutzers, den Schlauch zu drehen, einen realistischen Widerstand entgegenzusetzen. Die Drehung selbst wird über einen so genannten Drehgeber (»Encoder«) am Ende des Motors gemessen.

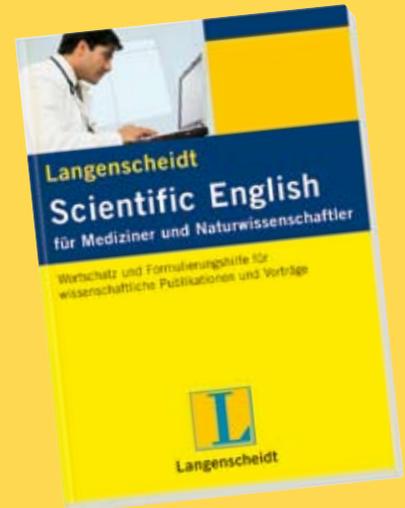
UM DEN ARZT DEN WIDERSTAND DES SCHLAUCHS gegen Verbiegungen der Spitze richtig spüren zu lassen, könnte man mit Stellmotoren die Spitze aktiv verbiegen. Die Motoren würden jedoch in dem engen Führungsrohr keinen Platz finden. Wollte man die Motoren nach außen verlagern und ihre Kraft, ähnlich wie die vom Arzt über die Handräder ausgeübte Kraft, über Seilzüge auf die Schlauchspitze wirken lassen, müssten die Motoren im Handgriff selbst sitzen, wo es immer noch zu eng ist: In zwei zueinander senkrechten Richtungen könnte man allenfalls kleine und zu schwache Motoren montieren.

Statt die Kraft auf den Umweg über die Seilzüge bis zur Spitze und zurück zu schicken, lassen wir sie unmittelbar auf die Stellräder wirken. Allerdings müssen die Motoren wegen ihrer Größe auch hier ausgelagert werden. Es trifft sich gut, dass an einem echten Endoskop außer dem Untersuchungsschlauch ein Versorgungsschlauch angeschlossen ist, der unter anderem das Gerät mit Strom versorgt und über den Flüssigkeit in den Darm eingespült und aus ihm abgesaugt werden kann. Durch diesen Schlauch lassen wir Seilzüge laufen. Im Endoskophandgriff endet jeder Seilzug in einem unelastischen Teflonfaden, der auf die Achse des Stellrads aufgewickelt ist. Am anderen Ende läuft ein ähnlicher Teflonfaden um die Achse des antreibenden Motors.



OLAF KÖRNER

Langenscheidt Scientific English Für Mediziner und Naturwissenschaftler



1. Auflage 2006
152 Seiten, Paperback
ISBN 978-3-86117-257-4
€ 24,90 [D] · € 25,60 [A] · sFr 42,70

Wortschatz und Formulierungshilfe für wissenschaftliche Publikationen und Vorträge

Optimal vorbereitet mit authentischen Beispielsätzen für Präsentationen, Diskussionen, Fachartikel und Manuskripte

Sprachlich perfekt in britischem und amerikanischem Englisch

So bekommen Ihre wissenschaftlichen Inhalte das sprachliche Niveau, das sie verdienen!

Umfangreicher Anhang mit Vorschlägen für die Manuskripteinreichung bei britischen und amerikanischen Fachzeitschriften.

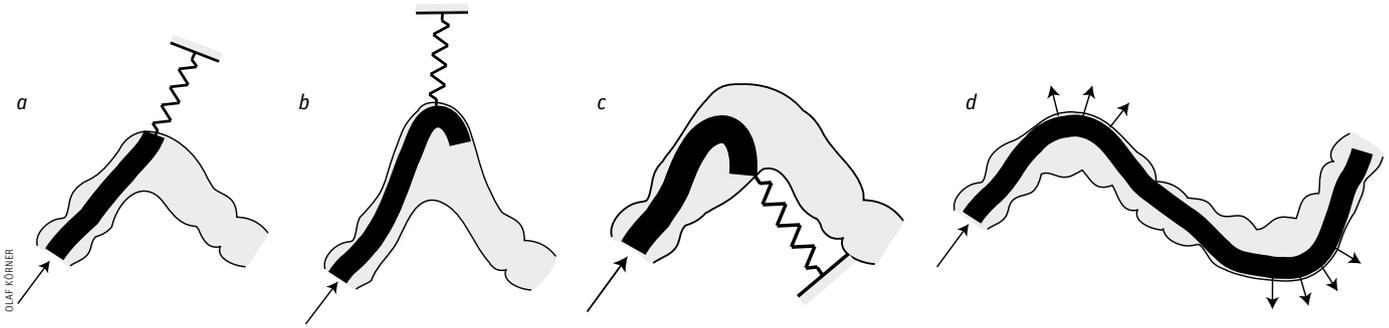
Infos & mehr

www.langenscheidt.de/fachverlag

Langenscheidt Fachverlag GmbH
Postfach 40 11 20 · 80711 München
fachverlag@langenscheidt.de



Langenscheidt
Fachverlag



▲ So können Endoskop und Darm Kräfte aufeinander ausüben: (a) frontale Kollision der Spitze, (b) Verformung des Darms, (c) seitliche Kollision der Spitze, (d) Reibung am Schlauch.

- ▷ treffende Kathetereingriffe am Fraunhofer-Institut für grafische Datenverarbeitung in Darmstadt unter maßgeblicher Beteiligung von Georgios Sakas (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 103 und 5/2001, S. 115);
- ▶ für Katarakt-Operationen am Karolinska-Institut in Stockholm.

Die Firmen METI (*Medical Education Technologies*) in Sarasota (Florida), Symbionix in Tel Aviv und Immersion Medical in Gaithersburg (Maryland) bieten jeweils ein größeres Sortiment an medizinischen Simulationssystemen.

Für die Zukunft ist zu erwarten, dass sich Trainingssysteme immer weiter durchsetzen werden. Bereits die heutigen Systeme basieren großenteils auf Softwarekomponenten, die sich leicht auf andere Operationen übertragen lassen. Bei-

▼ Aus den Daten des Projekts »Visible Human«, die von der Arbeitsgruppe um Karl Heinz Höhne aufbereitet wurden, erzeugt das System EndoSim ein Bild, das ein Endoskop in einem echten Darm aufnehmen würde.

spiele sind die Gewebesimulation, die je nach Wahl der Parameter für die unterschiedlichsten Gewebe eingesetzt werden kann, und die Kollisionserkennung, die bei jeder Art simulierter Operation benötigt wird.

Trainingssysteme für neuartige Operationen sind immer dann relativ leicht zu entwickeln, wenn der zu simulierende Bereich klein ist, also bei minimalinvasiven Operationen. Hauptschwierigkeit dabei ist die Programmierung der »Inhalte«, die dem Arzt vorgespiegelt werden. Solche Inhalte wären im Prinzip direkt aus Patientendaten, wie sie oft vor einer Operation mit Magnetresonanzen- oder Computertomografen aufgenommen werden, zu gewinnen. Dann wäre es möglich, eine Operation nicht an irgendeinem Modell, sondern an dem virtuellen Körper eines konkreten Patienten durchzuspielen, bevor die reale Operation stattfindet. Dies könnte bei besonders komplizierten Fällen das Risiko für den Patienten vermindern.

Da die Trainingssysteme immer realistischere Simulationen erlauben und die Effektivität der Systeme immer besser belegt ist, scheint die Zeit dafür gekommen zu sein, dass sie fester Bestandteil der Medizinerbildung werden. Entsprechende Schulungen könnten dabei an Simulationszentren durchgeführt werden, wie sie bereits an verschiedenen Orten, zum Beispiel in Mainz, existieren. ◁



Daniel Gembris (oben) promovierte 2001 in Physik an der Universität Dortmund. Er ist Leiter der Arbeitsgruppe Magnetresonananz-Technologie am Institut für Computerunterstützte Medizin (ICM) in Mannheim. **Jürgen Hesser** (Mitte) promovierte 1992 in Heidelberg über genetische Algorithmen und habilitierte sich 1998 mit dem Thema Virtuelle Realität in der Medizin an der Universität Mannheim. Er leitet die Arbeitsgruppe Bildanalyse und Grafik am ICM. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Echtzeit-Bildanalyse, inverse



Probleme, Computergrafik sowie Bioinformatik. Aus seiner Arbeitsgruppe gingen die drei Firmen Volume Graphics GmbH, Cathi GmbH und UltraOsteon GmbH hervor. **Reinhard Männer** promovierte 1979 in Heidelberg in Physik und habilitierte sich dort 1986. Er ist Inhaber eines Unesco-Lehrstuhls für Technische Informatik an der Universität Mannheim sowie Leiter des ICM. Seine Forschungsinteressen beziehen sich unter anderem auf anwendungsspezifische Rechensysteme in Physik und Medizin. Männer ist Mitgründer von acht Spin-Off-Firmen.

Implementation of a haptic interface for a virtual reality simulator for flexible endoscopy. Von Olaf Körner und Reinhard Männer in: Proceedings of the 11th symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems. Von Blake Hannaford und Hong Tan (Hg.). IEEE Computer Society Press, Los Angeles 2003, S. 278

Collision detection and tissue modeling in a VR simulator for eye surgery. Von C. Wagner, M. A. Schill und R. Männer in: 8th Eurographics Workshop on Virtual Environments. Von S. Müller und W. Stürzlinger (Hg.). Eurographics Association, Aire-La Ville (Schweiz) 2002, S. 27

Intraocular surgery on a virtual eye. Von Clemens Wagner, Markus A. Schill und Reinhard Männer in: Communications of the ACM, Bd. 45, Heft 7, S. 45, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/861879.

