

Echtzeitdiagnostik und Sichtsimulation in der minimal invasiven Therapie

- Möglichkeiten und Märkte -

Die Technologien bildgebender Verfahren in der Medizin haben sich in letzter Zeit ebenso sprunghaft weiterentwickelt wie die Techniken insbesondere der minimal invasiven Eingriffe. Allgemein herrscht jedoch Unzufriedenheit über die ergonomischen Randbedingungen - minimal invasive Eingriffe erfordern aufgrund des immer noch recht primitiven Instrumentariums ein hohes Maß an Übung seitens des Operateurs, sonst entstehen ernste Risiken.

Angesichts der immer weiter steigenden Zahl der Therapieverfahren kann jedoch das Maß an Übung, das der einzelne Arzt an verschiedenen Geräten und Methoden gewinnen kann, nicht beliebig groß sein.

Entscheidend kommt es jetzt darauf an, durch eine Weiterentwicklung der apparativen Ausrüstung wieder zu einer ergonomischen und leicht beherrschbaren Operationsweise zu gelangen, so daß auch neue Verfahren, die bisher von hochkarätigen Spezialisten entwickelt wurden, ihren Eingang in die allgemeine chirurgische Praxis finden können, ohne die Patienten einem unvermeidbaren Risiko auszusetzen.

Dies zu erreichen, bedeutet folgende Vorgaben umzusetzen:

- **Wiedererlangung des Tastsinns und der direkten, orientierungsrichtigen Aktionsweise**
- **Wiedererlangung der direkten, perspektivrichtigen Sicht auf das Operationsfeld**

Dies sind zwei verschiedene, wenn auch parallel zu betrachtende Entwicklungslinien: Zum einen die Technik der endoskopischen Instrumente in Richtung einer verbesserten Ausstattung und vereinfachten Handhabung, zum anderen die Gewinnung und Darstellung von Bilddaten in dynamischer und perspektivisch richtiger Weise, zur Simulation einer direkten Sicht.

Wir wollen uns hier mit dem zweiten Schwerpunktthema befassen, das in wesentlichen Elementen auch den Einsatz der landläufig unter dem Thema Virtual Reality bekannten Technologischen Entwicklungsrichtung (wir bevorzugen den Begriff Sichtsimulation bzw. Sehfeldsimulation) beinhaltet.

Im Bereich der Bilddatengewinnung ebenso wie der visuellen Darstellung stehen wir heute an der Schwelle völlig neuer Möglichkeiten. Dies betrifft zum einen wesentlich verbesserte bildgebende Verfahren, die schnell genug sind, daß bewegte Bilder aus dem Körperinneren live gewonnen werden können und die zudem mit Geräten realisiert werden, die während einer Operation oder Behandlung einsetzbar sind; zum anderen betrifft es die Bildwiedergabe über eine semitransparente Optik, die als Brille, Helm, oder integriert in das Stativ eines OP-Mikroskops ausgeführt wird und einen realistischen, perspektivisch richtigen, simulierten Blick in das Körperinnere ermöglicht, ohne den Arzt in seiner natürlichen Wahrnehmung oder seiner Bewegungsfreiheit einzuschränken.

- L Ohne Zweifel werden diese Verfahren, sobald sie eingeführt sind und die Ausrüstung allgemein zur Verfügung steht, auch routinemäßig bei offenen Operationen eingesetzt werden, da sie einen Blick in das Gewebe und damit ein präziseres, schnelleres und sichereres Operieren ermöglichen.

Bildgebende Verfahren

Zur Gewinnung der Bilddaten aus dem Körperinneren bieten sich insbesondere Röntgen, NMR, Ultraschall und endoskopische Bildaufnahmetechniken an.

Ultraschall

Eine virtuelle Darstellung von Ultraschall-Schnittbildern im Körper, am Ort Ihrer Entstehung, würde ein weit besseres Raumgefühl vermitteln und eine wesentlich leichtere Zuordnung zum Umfeld gewährleisten. Hiermit ist dann ein bewußtes Ableuchten interessanter Bereiche möglich. Der Aufwand zur Bildberechnung ist hierbei erfreulich gering, da er sich auf einfache Koordinatentransformation beschränkt und eine Objekterkennung nicht notwendig ist. Ebenso - und dies ist im Hinblick auf bestehende physikalische und technische Schwierigkeiten besonders wichtig - erspart es die Gewinnung und Darstellung vollständiger Volumendatensätze. Eine solche Anordnung wurde in den USA bereits experimentell demonstriert.

Die Entwicklung neuartiger Sensorarrays ermöglicht die intelligente Abtastung eines Volumens bei flexibler Steuerung in zwei Achsen. Besonders interessant ist dabei die Kleinheit der Arrays, die den Einbau in der Spitze eines Endoskops ermöglicht. Die Schnelligkeit der Darstellung wird dabei allerdings nach wie vor durch die endliche Laufzeit der Ultraschallechos begrenzt. Mittels rechnergesteuerter Optimierung kann hier jedoch die Abtastung auf wichtige Bildinhalte konzentriert und so eine Geschwindigkeitsmaximierung erreicht werden. Die Machbarkeit dieses Verfahrens wurde demonstriert. Entwicklungsprojekte zur praktischen Anwendung sind in Vorbereitung.

Ultraschall stellt aufgrund seiner großen Wellenlängen und der langsamen Ausbreitungsgeschwindigkeit völlig andere Randbedingungen, als optische Aufnahmeverfahren. Zur Gewinnung dreidimensionaler Bilddaten sollte sich die Ultraschall-Holographie mit großen Array-Sensoren eignen. In der Patentliteratur findet man Ansätze zur Ultraschall-Holographie mit Lineararrays. Diese sind jedoch langsam, aufgrund der Schallaufzeiten. Erfolgchancen erscheinen jedoch nur bei Einsatz von zweidimensionalen Arrays gegeben. Entwicklungen in dieser Richtung sind uns jedoch z.Zt. nicht bekannt bzw. wurden vorerst aufgegeben.

Röntgen

Ansätze zur Echtzeitdarstellung gibt es in Form schneller Tomographen mit großer Arbeitsöffnung, die von wenigen Vorkämpfern bereits operationsbegleitend eingesetzt werden. Von einer Echtzeitdarstellung sind diese Geräte noch weit entfernt und ein unmittelbares Arbeiten im Bildaufnahmefeld ist wegen der Strahlenbelastung nicht möglich. So werden denn im praktischen Einsatz stets Einzelbilder zur Kontrolle des Operationsfortschritts gemacht, wobei der Patient auf einem speziellen Fahrtisch liegt und jeweils zur Bildaufnahme in das Gerät eingefahren wird. Immerhin werden durch diese Technik zahlreiche bisher undenkbbare Eingriffe erst ermöglicht.

Der Vorteil der Röntgentechnik liegt in der Gewinnung hochauflösender Bilder ohne nicht-lineare geometrische Verzerrungen.

Der Nachteil der Strahlenbelastung für Arzt und Patient schränkt die Anwendung allerdings etwas ein. Optimal ließen sich Röntgengeräte zusammen mit anderen Verfahren wie Ultraschall und NMR einsetzen, wobei sie jeweils nur nach Notwendigkeit kurz zugeschaltet würden.

NMR

Die bisher marktgängigen NMR-Geräte ließen konstruktiv bedingt ein behandelndes Arbeiten nicht zu. Ebenso erschweren die starken magnetischen und Hochfrequenzfelder den Einsatz vieler Geräte im oder in der Nähe des NMR-Systems.

Die Probleme der elektromagnetischen Verträglichkeit sind jedoch prinzipiell lösbar. Ebenso sind konstruktive Maßnahmen möglich, die ein Arbeiten im NMR-Feld zulassen. Auch hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit gibt es verschiedene Möglichkeiten, die normalerweise langen Aufnahmezeiten für NMR-Bilder zu verkürzen.

Ein erstes 'offenes' NMR wurde bereits 1991 von Toshiba entwickelt. Es ermöglicht bei nur 0,06 Tesla Feldstärke ein Arbeiten im Feld auch mit 'normalen' Instrumenten aus Edelstahl oder Titan. Diese Geräte liefern ein Schnittbild pro Sekunde bei verwendbarer Qualität und wurden bereits bei einer Vielzahl von Eingriffen eingesetzt.

Inzwischen wurden weitere Geräte entwickelt, die mit supraleitenden Magneten arbeiten. Das Magnetom Open von Siemens hat ein offenes Magnetjoch und arbeitet mit 0,2 Tesla. General Electric stellte ein Gerät mit zwei parallelen Spulen vor, das zu den Hochfeldgeräten zählt und daher extreme Anforderungen an die verwendeten Instrumente stellt, andererseits verschiedene Arten des Zugangs zum Operationsfeld ermöglicht.

NMR ist somit ein wichtiges Diagnoseverfahren für interaktive Therapie, das trotz hohen Aufwands insgesamt erhebliche Vorteile bietet. Die begrenzte Bildauflösung macht allerdings, wie bei Ultraschall, einen ergänzenden Einsatz von Röntgen-CT nötig.

Optisch-Endoskopische Bildaufnahme

Bei Eingriffen in Körperhöhlen kommt der optischen Bildgewinnung selbstverständlich die größte Bedeutung zu. Hier wird die Sehfeldsimulation einen sehr bedeutenden Fortschritt ermöglichen: die Darstellung der mit der Endoskopkamera aufgenommenen Bilder in perspektivrichtiger Entzerrung, so daß der Arzt nicht mehr in ein Okular oder auf einen Bildschirm blicken muß, sondern die abgebildeten Oberflächen durch quasi-Hineinsehen in den Patienten an ihrer wirklichen Position sieht, eventuell zusammen mit Informationen von anderen bildgebenden Verfahren, wodurch er quasi direkt am Objekt arbeiten kann. Dies ist unter Sicherheitsaspekten insofern relativ unproblematisch, als er auch seine Instrumente gleichzeitig im virtuellen Bild sieht und dadurch Darstellungsfehler weitgehend kompensiert werden.

Da für diese Anwendung die präzise Bestimmung der dreidimensionalen Gestalt von Oberflächen erforderlich ist, müssen spezielle Kameras wie Stereokamera, Laser-Laufzeitkamera oder Laserscanner zum Einsatz kommen. Genau hierin liegt die noch zu überwindende Schwierigkeit.

Bilddarstellung

Aus ergonomischer Sicht ergeben sich zwei widersprüchliche Forderungen, die zu erfüllen wären. Zum einen ist die ortstreue Darstellung im Bereich interaktiven Handelns eine wesentliche Voraussetzung für schnelles und sicheres Arbeiten und im übrigen der Auslöser für unsere Bestrebungen überhaupt. Zum anderen darf der Arzt den direkten Blickkontakt zum Operationsfeld und zu seiner Umgebung niemals verlieren.

Diese Ziele zu vereinen, ist nur über die Einblendung der zusätzlichen Information in das direkt gesehene Bild möglich.

Dies allerdings erfordert eine exakte räumliche Zuordnung, die nur erreichbar ist, wenn die Positionen der aufgenommenen Objekte und der Blickpunkt des Betrachters genau bekannt sind.

Positionssensorik ist also eine hierbei sehr wesentliche technologische Fragestellung. Es werden Sensoren benötigt für:

- Geräteposition (von Kameras, Endoskopen, Instrumenten)
- Patientenposition
- Kopfposition des Arztes / der Ärzte
- Pupillenposition bzw. Blickrichtung (optional)

Die wesentliche Anforderung gegenüber bereits verfügbaren, von Consumeranwendungen geprägten Lösungen ist die benötigte Genauigkeit. Diese ist leicht erreichbar nur bei einigen Geräten wie z.B. Ultraschallköpfen und Mikroskopstativen, wo man Gelenkarme mit Winkelsensoren verwenden kann. Andere Aufgaben, wie die Kopfpositionssensorik, müssen berührungslos realisiert werden, was hinsichtlich Genauigkeit und Störsicherheit Probleme bereitet. Einige Positionssensoren arbeiten mit Hochfrequenzfeldern, was den Einsatz am NMR schwierig macht. Optische und Ultraschallsensoren leiden unter Abschattungsproblemen.

Wird zur Vermeidung von parallaktischen Fehlern oder zur Steuerung der Darstellung eine Pupillensensorik erforderlich, so findet man zwar Produkte, aber nur zu exorbitanten Kosten. Eine Mikrokamera mit integrierter Bildverarbeitung könnte dieses Problem lösen. Dies wurde (noch zu langsam und ungenau) bereits in japanischen Kameras und Camcordern realisiert.

Im Bereich der Positionssensorik sind also noch umfangreiche, grundlegende Arbeiten zu leisten und neue Verfahren zu finden und zu entwickeln. In diesem Bereich gibt es in Deutschland und in Europa zahlreiche potente Unternehmen, die diese Aufgabe lösen können. Produkte hierzu werden Märkte weit über die Medizintechnik hinaus finden, mindestens innerhalb der zahlreichen weiteren Anwendungen im Bereich der Virtuellen Realität (VR), die bereits in naher Zukunft zu erwarten sind.

Dies gilt ebenso für die **Display - Technologie**, an die im Bereich professioneller Applikationen meist erhöhte Anforderungen insbesondere hinsichtlich der Bildauflösung zu stellen sind, die von bisherigen Produkten nicht erfüllt wurden. Erste Lösungen - in Form von Helmen -- wurden vor kurzem für militärische Anwendungen von mehreren amerikanischen und auch von europäischen Firmen vorgestellt. Diese sind für die Medizinanwendung nicht nur zu teuer, sondern auch zu schwer.

Bei hohen Bildauflösungen dominieren immer noch Displays mit Elektronenstrahlröhren, die in Bezug auf das Gewicht nicht das Optimum darstellen. Für eine hochauflösende Darstellung von VR-Bildern im gesamten Gesichtsfeld wären zwischen 6 und 30 Millionen Bildelemente erforderlich. LCD's stehen in kleiner Bauform mit bis zu 180.000 und als mittelgroße Bildschirme mit annähernd 1 Million Bildelementen kommerziell zur Verfügung. Miniaturröhren erreichen bereits mehr als 1 Million Elemente. Probleme mit der Röhrentechnik ergeben sich bei einem Einsatz in der Nähe eines NMR-Gerätes. Ebenso wäre das notwendige Gewicht wenig komfortabel.

- L Die Darstellung der zur Zeit verfügbaren Diagnosedaten erfordert allerdings nur die Transposition zweidimensionaler Schwarzweiß-Bilder begrenzter Auflösung (NMR und Ultraschall z.B. 256x256 Pixel, Röntgen-CT ca. 512X512 Pixel) in die reale dreidimensionale Szene. Dies stellt weder von der Display- noch von der Rechentechnik her extreme Anforderungen. Die Vorteile der direkten räumlichen Zuordnung der Bilder wären nichtsdestoweniger enorm. Insbesondere könnte eine technisch maßvolle Entwicklung hier sehr schnell zu einem wirklich interessanten Produkt führen, das erstmals eine professionelle Breitenanwendung von VR darstellen und damit einen nicht zu unterschätzenden qualitativen Entwicklungssprung begründen würde.

Dies umso mehr, als die Medizintechnik und andere professionelle Anwendungen hier nur die Vorhut einer revolutionären Entwicklung bilden werden. Systeme in VR-Technologie werden gegenüber heutigen Applikationen der Informations- und Kommunikationstechnik immense Mengen an Material sparen, indem viele Arten von Ein- und Ausgabegeräten wie Tastaturen, Monitore, Fernsehgeräte etc. durch semitransparente VR-Displays ersetzt werden können, die so leicht gebaut sein können wie eine gewöhnliche Brille und mit denen sich eine grosse Anzahl von *virtuellen Geräten* gleichzeitig in die reale Umgebung einfügen lassen.

In die VR-Brille integrierte Kameramodule mit Objekterkennung könnten sogar heute VR-ty-pische Geräte wie Datenhandschuhe sowie einen Teil der Positionssensorik ersetzen und gleichzeitig eine Fülle weiterer Anwendungen erschließen.

- L Die Reduktion peripherer Hardware auf die reine Kommunikation mit den menschlichen Sinnen und der Ersatz realer Hardware durch virtuelle Geräte (*Virtualware*), koppelt alle Volkswirtschaften, die die Schlüsselbausteine hierzu nicht produzieren können, von einer wesentlichen technologischen Hauptströmung ab. Dies betrifft neben der reinen Rechnertechnik insbesondere die Technologien höchstauflösender Miniaturdisplays, der Positionssensorik und bildverarbeitender Mikrokameras und die zugehörige Software. Nationale und europäische Entwicklungen auf diesen Gebieten sind absolut unerlässlich.

Diese Zusammenhänge müssen außerordentlich ernst genommen werden. Dabei geht es nicht nur um die prinzipielle Beherrschung der Technologie, sondern um die kostengünstige Fertigung komplexer Massenprodukte. Konnte man es sich bei Spezialprodukten wie dem Camcorder noch leisten, den Japanern allein das Feld zu überlassen, ist dies bei der *Virtualware* nicht mehr möglich. Zum Teil muß jetzt technologisches Terrain erst wieder erobert werden, sonst wird durch diese Entwicklung auf lange Sicht unser Lebensstandard ernsthaft bedroht.

Die Probleme der **Bildverarbeitung** und -Darstellung sollten bei einer gesamten Betrachtung der VR-Technologie nicht unterschätzt werden. Im technischen Schwierigkeitsgrad gibt es hier jedoch zahlreiche Abstufungen, von denen einige nur mit immensem Aufwand an Rechentechnik und Programmierung bewältigt werden können, andere jedoch auf einfache Weise realisierbar sind..

Für die oben erwähnten, einfacheren Demonstratoren zur medizinischen Sehfeldsimulation eignen sich bereits Maschinen im oberen PC- bzw. im Workstation-Bereich und die Programmierung dieser Applikationen dürfte den einschlägigen Firmen ohne weiteres gelingen.

Wesentlich aufwendiger sind ambitioniertere Verfahren wie die Darstellung von Volumendaten, die nach heutigen Maßstäben noch teure Hochleistungsrechner und spezielle Hardwarelösungen voraussetzt, oder bereits heute in Entwicklung befindliche Datenkopplungen verschiedener Bildaufnahmetechniken, teilweise im Zusammenwirken mit Anatomie-Datenbanken. In einem Zeithorizont von 5-10 Jahren, den man hier für die kommerzielle Verwirklichung wirklich hochwertiger Sensorik- und Displaykomponenten ansetzen kann, ist jedoch sicher mit einer so erheblichen Verbilligung der benötigten Hardware zu rechnen, daß diese Kosten für die medizinische Anwendung tragbar werden.

Initiativen zur Umsetzung

So interessant die geschilderten Möglichkeiten sind, so schwierig ist - abgesehen von den angesprochenen Sonderfällen - ihre Umsetzung, und so schwierig ist auch die Einschätzung der Marktpotentiale. Die für diese Aufgaben prädestinierten Firmen sind daher - gerade in Zeiten wirtschaftlicher Rezession - vorsichtig in ihrer Herangehensweise.

Im Vorfeld der Umsetzung der dargestellten Ideen ist daher eine detaillierte Bewertung der neuen Technologien und eine Abgrenzung ihrer sinnvollen Einsatzgebiete zu leisten. Hierzu gehören:

- Eine Auflistung von Anwendungen, gestuft nach technologischem Schwierigkeitsgrad, die
 - in 1 Jahr (quasi mit existierender Technik)
 - in 3 Jahren
 - in 5 Jahren
 - in 10 Jahrenrealisierbar erscheinen.
- Eine Untersuchung der möglichen Marktpotentiale im Medizinbereich, nach den Kriterien
 - Welche Kosten sind für die einzelnen Applikationen zu erwarten
 - Wer würde sie einsetzen
 - Welche Mengen wären konkret absetzbar.

- L Hierbei ist klarzustellen, daß Grundlagenentwicklungen, wie in den Bereichen Displaytechnik und intelligente Kameras, ohne jeden Zweifel nicht im Medizinmarkt allein amortisierbar sind. Consumer- Büro- und industrielle Märkte bieten ein 1000fach größeres Potential, ein Gerät für die Medizintechnik darf jedoch kaum auch nur 10fach teurer sein als im Konsumbereich, wodurch eine Umlage der Entwicklungskosten realistisch gesehen nicht zu erreichen ist. Unternehmen, die sich hier im Grundlagenbereich engagieren, müssen daher ein klares Konzept und reale Möglichkeiten für den Eintritt in den Massenmarkt haben.

Immerhin kommen aus den Massenmärkten jetzt bereits Produkte, die qualitativ erste Gehversuche in Medizinanwendungen erlauben.

- L Mit der fortschreitenden Durchdringung aller Lebensbereiche mit Informationstechnik und der längst erfolgten Globalisierung der Märkte wird die Konsumelektronik einschließlich Computertechnik zunehmend zum wichtigsten Amortisationsfaktor für hochtechnologische Grundlagenentwicklungen. Wer diese Märkte meidet, dem fehlt letztlich das Kapital zur Erhaltung seiner Wettbewerbsfähigkeit.

Applikationen im Medizinbereich erfüllen also eine **Vorreiterfunktion im Bereich volkswirtschaftlich wichtiger technologischer Strömungen**. Aus den hierfür erarbeiteten Grundlagen entstehen später, betreibt man es richtig, eine große Anzahl von Produkten auch für andere Märkte, die im Falle der hier betrachteten Entwicklungen ein außerordentlich hohes Potential bieten werden.

Eine zu erstellende Studie soll aufzeigen, wie in einem schrittweisen, breit angelegten Entwicklungsprozeß verschiedene Generationen von Produkten mit jeweils eigenen Marktpotentialen entstehen können, um sowohl die vordringlichen Applikationen in der Medizin zu realisieren als auch grundlegende Technologien zu entwickeln und den Weg für ein stetiges und wirksames Eindringen in internationale Massemärkte zu ebnen.

Zur Realisierung der Ideen bedarf es der Zusammenarbeit einer größeren Zahl von mittelständischen ebenso wie Großunternehmen. Ziel der Evaluation sollte auch die Definition von nationalen und ggf. in EU-Strukturen eingebundenen Verbundprojekten sein.

Berlin, den 20.9.1993

Rolf Hainich