

# Navigation in der Leberchirurgie - Anforderungen und Lösungsansatz -

Marcus Vetter<sup>a</sup>, Peter Hassenpflug<sup>a</sup>, Matthias Thorn<sup>a</sup>, Carlos Cárdenas<sup>a</sup>,  
Gerald Glombitza<sup>a</sup>, Wolfgang Lamadé<sup>b</sup>, Götz Martin Richter<sup>c</sup>,  
Hans-Peter Meinzer<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Deutsches Krebsforschungszentrum, Abt. Med. und Biol. Informatik  
Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg  
Universität Heidelberg, <sup>b</sup>Chirurgische Klinik, <sup>c</sup>Radiologische Klinik  
Im Neuenheimer Feld 110, D-69120 Heidelberg

E-Mail: {M.Vetter,P.Hassenpflug}@DFKZ-Heidelberg.de

**Abstract:** Vorgestellt werden die klinischen und technischen Anforderungen an ein computergestütztes Navigationssystem in der Leberchirurgie. Ein Lösungsansatz zur Navigation in der Leberchirurgie wird im Kontext intraoperativer Rahmenbedingungen diskutiert. Die medizinischen Anforderungen wurden an mehreren chirurgischen Zentren erhoben. Offene und laparoskopische Operationstechniken stellen jeweils spezifische Anforderungen an ein solches System. Zur notwendigen Echtzeit-Bildakquisition kommen intraoperativer Ultraschall (IOUS) und offene Magnetresonanztomographie (OMRT) in Frage. Die Eignung von optischen und magnetischen Trackingsystemen zur Positionsbestimmung und von medizinischen Schneidegeräten zur Anbindung an ein Navigationssystem werden vorgestellt. Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse zeigen, dass ein Navigationssystem für die Leberchirurgie medizinisch sinnvoll ist, und die Genauigkeit der technischen Realisierung untersucht werden muss.

**Schlüsselwörter:** Computer-Assisted Surgery (CAS), Image-Guided Surgery (IGS), Navigation in der Leberchirurgie

## 1 Einleitung

Für das Jahr 1998 veröffentlichte die Weltgesundheitsorganisation WHO die folgenden Zahlen primärer Leberkreberkrankungen (ICD 155) [FPP98]: weltweit waren es 436771 Menschen, die neu erkrankten. Im selben Jahr verstarben daran 426934 Menschen. Allein in Deutschland erkrankten jährlich etwa 5200 Patienten neu an Leberkrebs [St99]. Primärtumore sind häufig durch virale Infekte (z. B. Hepatitis) oder durch übermäßigen Alkoholkonsum (Leberzirrhose) verursacht.



Abb. 1. Links und Mitte: Orientierung anhand intraoperativer Visualisierungen. Rechts: Individueller Gefäßbaum, Tumor und Resektionsvorschlag für einen Patienten.

Die häufigste Ursache für sekundäre Lebertumore (Metastasen in der Leber) sind Tumorzellen, die sich von einem Kolonkarzinom abgesiedelt haben.

Die Leberchirurgie ist derzeit die einzige potenziell kurative Therapie bei Leberkrebs. Chemo- und Strahlentherapie haben nur adjuvante und palliative Bedeutung. Die Fünfjahresüberlebensrate ohne chirurgische Therapie liegt unter 2 %. Eine Tumorentfernung (Resektion) erhöht derzeit die Fünfjahresüberlebensrate auf 20% bis 40%. Es sind jedoch nur ca. 30% der Patienten operabel [LOH95]. Wichtige Faktoren für die Operabilität sind die intrahepatische Lokalisation des Tumors, der Gesamtbefall des Organismus und die „partial hepatic resection rate“ (PHRR) [Ra00]. Die Regenerationsfähigkeit der Leber ist ausreichend groß, um innerhalb eines Jahres selbst bei bis zu 80%-iger Geweberesektion ihre volle Größe und Stoffwechselfunktion wiedererlangen zu können [HSK98]. Das verbleibende Gewebe muss eine ausreichende metabolische Funktion aufweisen, um die Regeneration der Leber zu gewährleisten.

Intraoperative Komplikationen entstehen z. B. bei einem lebensbedrohenden Rückstau des venösen Abflusses durch die Verletzung einer zentralen Lebervene oder eines anderen wichtigen intrahepatischen Gefäßes. Postoperative Komplikationen können bei unzureichender Radikalität entstehen, d. h. wenn nicht der gesamte Tumor mit ausreichendem Sicherheitsabstand entfernt wird. Nekrosen treten auf, wenn das abhängige Gewebe nicht vollständig entfernt wird. Dieses ergibt sich aus den Leberarealen, die von Gefäßen versorgt werden, die den Tumor mit Sicherheitsabstand durchziehen. Ein weiteres Problem ist das Auftreten von Rezidiven, die durch Aussaat von Tumorzellen während des chirurgischen Eingriffs entstehen.

Das hier vorgestellte Projekt hat zum Ziel, die beschriebenen Komplikationen zu minimieren, indem die chirurgische Therapie durch ein bildgestütztes Chirurgie-System (Image-Guided Surgery System, IGSS) unterstützt wird. IGS bedeutet, dass sich der Chirurg mittels computergenerierter Visualisierungen seiner räumlich verfolgten Instrumente orientiert. Diese werden in Beziehung zu geplanten Zielstrukturen in den prä- und intraoperativen Bilddaten dargestellt. Technisch wird dies durch Navigationssysteme realisiert, die Komponenten zur intraoperativen Bildgebung, Bildregistrierung, räumlichen Instrumenten- und Markerverfolgung (Tracking), Modellierung der Organverformung und Visualisierung integrieren. Ein IGSS muss so gestaltet sein, dass es sich in den in den klinischen Workflow einfügt.

## 1.1 Bildgestützte Chirurgie als Teil der computergestützten Chirurgie

Mittels der computergestützten Chirurgie (Computer-Assisted Surgery, CAS) wird der Chirurg idealerweise durchgehend in der gesamten Abfolge komplexer chirurgischer Prozeduren unterstützt, die die Bildakquisition, Operationsplanung, Operationssimulation, Unterstützung der Therapie (IGS) und die Verlaufskontrolle umfassen.

Die Therapieunterstützung ist für starre anatomische Regionen, also für Knochen und knochen-nahe Gewebe, weit fortgeschritten und teilweise schon im klinischen Routine-Einsatz [GME92, Wi98]. Mit Hilfe von Navigationssystemen kann intraoperativ der Eingriff durch eine vorausgegangene Operationsplanung unterstützt werden, wodurch die Indikationsstellung erweitert wird und der Eingriff exakter durchgeführt werden kann. Auf diese Weise können die durch die präoperative Planung gewonnenen Informationen umgesetzt werden.

Im Bereich der Weichteiloperationen ist die Umsetzung der Operationsplanung durch ein Navigationssystem momentan nicht möglich, da hier die intraoperative Bewegung der weichen Organe zu einer starken Abweichung vom präoperativ aufgenommenen Datensatz führt und die präoperativen Planungsdaten nicht mehr mit dem aktuellen Situs übereinstimmen.

Seit 1996 arbeiten wir an einem System zur computergestützten Operationsplanung für die Leberchirurgie [Gl99]. Es wurden bereits intraoperative Computerprojektionen der präoperativ berechneten Visualisierungen eingesetzt [Th01, La00] (Abb. 2). Die Übertragung auf die tatsächliche, momentane Lage und Verformung der Leber bleibt bislang jedoch der Vorstellungskraft des Chirurgen überlassen.

In dem hier vorgestellten und sich daran anschließenden Projekt werden die Grundlagen für ein computerunterstütztes Navigationssystem für die Weichteilchirurgie gelegt, welches die Übertragung der durch die Operationsplanung gewonnenen Informationen auf den aktuellen Situs ermöglicht. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Anforderungsanalyse für dieses Projekt und ein erster Lösungsansatz vorgestellt.

## 2 Material und Methoden

Um die Projektrisiken im noch weitgehend unbearbeiteten Gebiet der IGS in der Viszeralchirurgie zu minimieren, wurde ein geeignetes Vorgehensmodell zusammengestellt [Sa97], das zu Beginn iterative und später explorative Projektphasen vorsieht. Die Analyse der medizinischen und technischen Anforderungen war Gegenstand der ersten Projektphase. Mittels nach der Delphi-Methode durchgeführter Befragungen von Leberchirurgen in Heidelberg, München und Mainz sowie der Beobachtung und Video-Dokumentation mehrerer Leber-Operationen wurden multizentrisch die Gemeinsamkeiten und Besonderheiten des Operationsablaufs identifiziert und so invariante Systemanforderungen ermittelt [Ve01, Ha01]. Die Eignung verschiedener Bildgebungs- und Trackingsysteme für ein Navigationssystem in der Weichteilchirurgie wurden untersucht [Ch98]. Es wurden verschiedene Schneidewerkzeuge [KW99] verglichen, um ihre Eignung für eine Anbindung an das System zu prüfen.

### 3 Ergebnisse

Ein wesentliches Ergebnis der Analyse ist, dass die chirurgischen Erwartungen an ein Navigationssystem bei offener und laparoskopischer Operationstechnik höchst unterschiedlich sind. Daraus ergeben sich neben gemeinsamen Anforderungen solche, die von der gewählten Operationstechnik abhängen.

#### 3.1 Klinische Anforderungen bei offener und laparoskopischer Leberchirurgie

Bei beiden Techniken steht die Zuordnung von Strukturen aus der Operationsplanung zu denen des intraoperativen Situs im Vordergrund. Die Analyse hat ergeben, dass das bisherige Operationsplanungssystem für den intraoperativen Gebrauch erweitert werden muss, um intraoperative Befunde in die Planung einbeziehen zu können. Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass nach Mobilisierung der Leber ein Zeitfenster von bis zu einer Stunde zur Verfügung steht, um die intraoperativ gewonnenen mit den präoperativen Daten zu registrieren [PH00] und beispielsweise für die anschließende Navigation Marker zu setzen. Für die Registrierung kann die Ruhigstellung der Leber ausgenutzt werden, die durch geeignete anästhesistische (Jet-Ventilation) und chirurgische Maßnahmen (z. B. durch Fixation mit Nadeln, eine Halterung oder Auslegung des Bauchraumes mit Tüchern) erreicht werden kann. Nach erfolgter Registrierung und dem Anbringen von Markern soll es das Navigationssystem ermöglichen, sowohl intraoperative Strukturen in den Planungsdaten zu lokalisieren als auch die aktuelle Position der wesentlichen chirurgischen Instrumente in den prä- und intraoperativen Daten darzustellen.

Bei offenen Eingriffen ist ein Navigationssystem für oberflächennahe, tastbare Tumore aus Sicht der befragten Chirurgen unnötig. Für die Tiefennavigation allerdings, bei der die Resektionsflächen häufig nahe an lebenswichtig zu erhaltenden Gefäßstrukturen verlaufen, ist ein Navigationssystem zur Orientierung wünschenswert. Bislang führt die zeitliche Trennung sich abwechselnder Arbeitsschritte zur Orientierung und Durchführung des Eingriffes zu Ungenauigkeit. Die Güte der Orientierung ist derzeit nicht quantifizierbar und somit weder medizinischen Geräten noch anderen am Eingriff beteiligten Personen zugänglich. Somit hängt die Qualität im Sinne der Genauigkeit stark vom subjektiven Erfahrungshorizont der am Eingriff beteiligten Personen ab. Lediglich die Komplikationsrate und das Auftreten von Rezidiven liefern einen postoperativen Indikator für die Operationsqualität.

Die Indikation für laparoskopische Eingriffe ist noch eng begrenzt auf oberflächennahe, vor allem ventral und rechts lateral gelegene Tumore. Problematisch für die Orientierung ist vor allem der fehlende Tastsinn, für den Chirurgen wichtige Tastsinn. Ein Navigationssystem könnte den fehlenden Tastsinn ersetzen und dadurch die Indikationsstellung für laparoskopische Eingriffe erweitern. Das hätte den Vorteil, dass mehr Lebertumore als bisher minimal-invasiv und damit schonender für den Patienten reseziert werden könnten. Dadurch ließen sich auch schneller und öfter Rezidive operieren.

### 3.2 Prä- und intraoperative Bildakquisition

Die präoperativen Bilddaten werden von der Radiologischen Universitätsklinik in Heidelberg erstellt. Hierbei kommt ein Multidetektor Spiral-CT, Somatom Plus 4 Volume Zoom (Siemens AG, Erlangen, [www.siemens.com](http://www.siemens.com)) mit automatischen Bolusgabe-Funktion zum Einsatz. Jeder Patient erhält kontrolliert 150 ml eines nicht-ionischen Kontrastmittels, das mit 4 - 5 ml/s verabreicht wird. Bei einem Schichtabstand von 3 mm und einem Tischnschub von 6 mm/s beträgt die Aufnahmezeit für die gesamte Leber ca. 40 s, so dass der Patient während der Aufnahme den Atem anhalten kann. Die CT-Bilder werden zu unserem Institut mit der Teleradiologie-System CHILI® (Steinbeis Transferzentrum Medizinische Informatik, Heidelberg, [www.chili-radiology.com](http://www.chili-radiology.com)) übertragen und mit unserem chirurgischen Planungssystem bearbeitet.

Die Navigation erfordert die Akquisition intraoperativer Daten in Echtzeit, damit die aktuelle Lage der Leber dem Resektionsmodell zugeordnet werden kann. Zur Echtzeit-Bildakquisition kommen intraoperativer Ultraschall (IOUS) und offene MRT in Frage. CT scheidet aufgrund der hohen Strahlenbelastung für Patient und Operateur aus. Die offene MRT liefert derzeit die besten Daten [K197]. Allerdings ist sie nur an wenigen Zentren vorhanden, kostenintensiv und wird von vielen Chirurgen aufgrund des beengten Operationsfeldes nur wenig akzeptiert.

**Tabelle 1.** Intraoperative Bildakquisition: Offene MRT im Vergleich zu intraoperativem Ultraschall (IOUS)

	offene MRT	IOUS
Dimensionen	3D	2D über die Zeit, 3D mit Tracking
Akquisitionszeit	hoch (die Bildaufnahme und Auswertung benötigt mehrere Sekunden)	niedrig (erfüllt Echtzeitanforderungen)
funktionelle Bildgebung	derzeit nicht in ausreichender Geschwindigkeit verfügbar	Blutflussparameter über das Dopplersignal
Bildqualität	hoch (guter Weichteilkontrast)	schlecht (Speckle-Rauschen, schlechter Kontrast)
Operationsfeld	beschränkt durch die Scanner-konfiguration	nur störend während der Bildaufnahme
Verfügbarkeit	spezieller Operationssaal erforderlich	Standardausrüstung im Krankenhaus
Kosten	hoch	im Vergleich zur MRT gering

Intraoperativer Ultraschall liefert gegenüber der MRT nur zweidimensionale Bilder. Für den Ultraschall als Bildgebungsmodalität spricht aber, dass er an jeder Klinik verfügbar

ist und durch seinen Einsatz nur geringe Kosten entstehen. Auch werden beim IOUS gegenüber der offenen MRT keine speziellen Operationssäle benötigt. Zur diagnostischen Kontrolle der in den präoperativen Bildern erkannten Läsionen wird bereits intraoperativer Ultraschall eingesetzt. Nach Mobilisierung der Leber tritt ein Radiologe zum Operationsteam hinzu und beurteilt die präoperativ gefundenen oder ggf. zusätzlich entdeckten Läsionen.

### **3.3 Tracking von Instrumenten und Markern**

Die Navigation kann durch ein Trackingsystem unterstützt werden. Hierfür kommen sowohl optische als auch magnetische Systeme in Frage. Die wichtigsten Vor- und Nachteile beider Technologien sind in Tabelle. 2 zusammengestellt. Der Vorteil optischer Systeme liegt darin, dass sie im Operationsfeld nur passive Komponenten benötigen. Ihr Nachteil besteht darin, dass mindestens drei Marker erfasst werden müssen, um die sechs Freiheitsgrade eines Raumpunktes bestimmen zu können. Dabei kommt erschwerend hinzu, dass bei den häufig notwendigen Lageveränderungen der Leber während der Resektion nicht immer alle Marker erfasst werden können. Im Fall von mehreren zu erfassenden Raumpunkten ist jeweils eine spezifische Markergeometrie erforderlich, um die Raumpunkte voneinander unterscheiden zu können. Die Abstände der einzelnen Marker für die Erfassung eines Raumpunktes umfassen dabei mehrere Zentimeter. Magnetische Trackingsysteme benötigen zwar aktive Komponenten im Operationsfeld, erlauben aber die Erfassung aller sechs Freiheitsgrade in nur einem Raumpunkt, auch wenn dieser verdeckt ist. Verfälschungen können durch ferromagnetische Stoffe und externe Magnetfelder entstehen, wie sie beispielsweise bei starken Strömen im Operationsfeld (Elektrokoagulatoren) oder Ablenkspulen von Monitoren auftreten.

Als optisches Trackingsystem experimentierten wir mit dem 3D Localizer-System ROPAL-med (Rohwedder Visotech GmbH, Markdorf, Deutschland, [www.Rohwedder-Visotech.com](http://www.Rohwedder-Visotech.com)), einem Stereo-Kamerasystem. Es stellte sich heraus, dass optische Trackingsysteme für die offene Leberchirurgie nicht geeignet sind, da die Marker während der Intervention häufig verdeckt werden. Wir konzentrieren uns daher nun auf magnetische Trackingsystemen. Dazu integrierten wir ein MiniBIRD 500® (Ascension Technology Corporation, Burlington, Vermont, USA, [www.ascension-tech.com](http://www.ascension-tech.com)) in einen Visualisierungsprototyp. Die Kombination von Ultraschall und Trackingsystem ermöglicht die Zuordnung von Ultraschallbildern zu Positionen im Raum. Darüber hinaus lässt sich mit Hilfe der Freihand-Scanning Ultraschall Software Stradx (Department of Engineering, Cambridge University, Großbritannien) ein konventionelles HP Sonos 5500 DSR 2D-Ultraschall-Gerät (Agilent, Andover, Massachusetts, USA, [www.agilent.com](http://www.agilent.com)) zu 3D Ultraschallaufnahmen erweitern.

### **3.4 Geeignete Schneideinstrumente in Kombination mit dem intraoperativen Navigationssystem**

Als Durchtrennungsverfahren des Leberparenchyms kommen derzeit die "finger-fracture" Technik, Ultraschall-Dissektoren, mono- und bipolare Elektrokoagulatoren und neuerdings auch Jet-Cutter zum Einsatz. Aus medizinischer Sicht besteht ein Diskurs

über Vor- und Nachteile der verschiedenen Techniken zur Parenchymdurchtrennung. Deshalb konzentrierte sich die Analyse auf die technischen Aspekte einer möglichen Anbindung der Schneidewerkzeuge an ein Navigationssystem. Die "finger-fracture" Technik, bei der das Parenchym vom Operateur mit den Fingern durchtrennt wird, schließt eine Anbindung an ein Navigationssystem aufgrund der mangelnden Genauigkeit aus. Alle anderen Schneidewerkzeuge lassen sich mit optischem Tracking kombinieren (Tabelle. 2).

Für eine Anbindung an ein magnetisches Trackingsystem ist ein Jet-Cutter wie beispielsweise Handy-Jet<sup>TM</sup> (SAPHIR-Medical Products GmbH, Schwaig München, Deutschland, [www.saphir-medical.com](http://www.saphir-medical.com)) am besten geeignet, weil er ohne Elektrizität im Operationsfeld auskommt und das Handstück aus nicht ferro-magnetischen Materialien gefertigt werden kann. Dem Jet-Cutter kommt auch klinisch eine zunehmende Bedeutung zu, weil er eine komplikationsarme, gefäßerhaltende Durchtrennung des Parenchyms ermöglicht. Ultraschall-Dissektoren und elektrische Koagulatoren sind für ein magnetisches Tracking nur bedingt geeignet, weil die auftretenden Ströme und metallischen Handstücke zu Verfälschungen des magnetischen Gradientenfeldes und damit zur Ungenauigkeit in der Navigation führen.

**Tabelle 2.** Instrumenten- und Markertracking: Vergleich von optischen und magnetischen Systemen

	optisches Tracking	magnetisches Tracking
kompatible Schneideinstrumente	alle	Jet-Cutter
Freiheitsgrade	6 Freiheitsgrade (3 Marker müssen erfasst werden)	6 Freiheitsgrade
Komponenten im Situs	passiv (ohne Kabel)	aktiv (mit Kabel)
Markergeometrie	komplex (jeder zu erfassende Punkt benötigt seine spezifische Geometrie)	einfach (verschiedene Geometrien sind nicht erforderlich)
Markerabmessungen	groß (mehrere Zentimeter)	klein (z.B. 5mm x 5mm x 10 mm)
Systemstörungen	durch Markerverdeckung	durch Magnetfelder und ferromagnetische Stoffe

## 4 Lösungsansatz

Die Aufgabe eines IGS System für die Leberchirurgie ist die Erfassung der aktuellen Lage des Organs und der Instrumente im Raum, so dass sich der Chirurg mittels computer-generierter Visualisierungen seiner Instrumente in Beziehung zu der geplanten Zielstrukturen orientieren kann. Diese werden in den prä- und intraoperativen Bilddaten

dargestellt. Für die Zuordnung der im Raum erfassten Instrumente zu den interessierenden Strukturen des Organs ist die Kenntnis der genauen Lage und Verformung der Leber notwendig. Hierzu müssen die intraoperativen Bilddaten mit den präoperativen Daten registriert werden. Ist die Position der intraoperativen Bilddaten im Raum bekannt und eine Registrierung mit den präoperativen Bilddaten möglich, können die identifizierten Strukturen aus der Operationsplanung der aktuellen Lage im Situs zugeordnet werden. Während der chirurgischen Intervention kommt es jedoch zur ständigen Lageveränderung und Deformation der Leber. Erschwerend kommt die Resektion von Lebersegmenten hinzu, die eine Gestaltveränderung des Organs bedingt und den Abgleich zwischen prä- und intraoperativen Bilddaten erschwert.

Hieraus ergeben sich folgende Probleme: Zum einen ist es nicht möglich während der gesamten Resektion über einen Zeitraum von mehreren Stunden hinweg Bilddaten zu akquirieren, die stets die aktuelle Lage der interessierenden Strukturen wiedergeben. Die offene MRT benötigt für die Bildakquisition mehrere Sekunden (Totzeit). Die permanente Lageveränderung des Organs lässt daher einen Rückschluss auf die aktuelle Position der Leber nicht zu. Auch würde die maximal zulässige Energieeinstrahlung auf Patienten und Operationspersonal durch eine stetige Bildakquisition überschritten. Der alternative Einsatz von intraoperativem Ultraschall ist hinsichtlich der Totzeit und Belastung für den Patienten besser geeignet. Ein Einsatz über die gesamte Leberresektion ist jedoch unpraktikabel. Dies wird durch den beengten Zugang zum Organ und die ständige Lageveränderung während der Resektion verhindert.

Als Lösungsansatz für dieses Problem schlagen wir die zeitliche Trennung von Registrierung der Bilddaten und der Lage- bzw. Deformationsverfolgung während der eigentlichen Resektion vor. Nach Mobilisierung der Leber wird sie mit Hilfe von chirurgischen und anästhesistischen Methoden zunächst ruhiggestellt. Die intraoperative Bildakquisition und Registrierung mit den präoperativen Bilddaten kann im fixiertem Zustand des Organs erfolgen.

Der Registrierung von intraoperativen Bilddaten mit den präoperativen CT-Daten kommt eine besondere Bedeutung zu. Während der Ruhigstellung der Leber favorisieren wir als intraoperatives Bildgebungsverfahren den Doppler-Ultraschall. Für die Registrierung eignen sich daher besonders multimodale, merkmalsbasierte, nicht-rigide Registrierungsverfahren.

Nach Registrierung der intra- mit den präoperativen Bilddaten werden an zuvor geplanten Stellen Navigationshilfen an bzw. in die Leber eingebracht. Diese sollen nach Aufhebung der Fixierung die Lage und Deformation der Leber erfassen. Nadelförmige Navigationshilfen werden hierzu in die Nähe der interessierenden Strukturen eingebracht, wie z. B. in die Nähe des Tumors, in die Nähe der Resektionsfläche oder in die Nähe wichtiger, zu erhaltender Gefäße. Die in der Leber fixierten Navigationshilfen spannen ein entlang ihrer Achse lokal sehr genaues Zylinderkoordinatensystem auf. Die räumliche Erfassung der Navigationshilfen erfolgt über ein magnetisches Trackingsystem. Verschiebungen der Navigationshilfen gegeneinander lassen auf Deformationen des Organs schließen. Mittels eines mathematischen Modells, welches die Gewebeeigenschaften des Leberparenchyms beschreibt, werden quantitative Aussagen über Gewebeverschiebungen im näheren Umfeld der Navigationshilfen ermöglicht. Dieses Verfahren lässt sehr genaue Aussagen über die Lage von zuvor geplanten, auch in der Tiefe des Organs liegenden Zielstrukturen zu. Bei weiter entfernten Organbereichen nimmt die Genauigkeit ab.



Aus den präoperativen CT-Aufnahmen der Leber wird die individuelle Gefäßstruktur des Patienten extrahiert und in eine symbolische Darstellung überführt. Derzeit untersuchen wir, wie genau sich aus intraoperativem Ultraschall extrahierte Gefäßmerkmale mit den präoperativen abgleichen lassen. Als Merkmale kommen neben morphologischen auch funktionelle Parameter in Betracht. Diese können beispielsweise präoperativ durch Flusssimulationen und intraoperativ mittels Doppler-Ultraschall gewonnen werden.

## **5 Diskussion, Resümee und Ausblick**

Derzeit stellt die Chirurgie bei Leberkrebs die einzig potenziell kurative Therapieform dar. Für die ca. 30% der operablen Krebserkrankungen der Leber (ICD 155) kann durch Resektion des krebstragenden Gewebes die Fünfjahresüberlebenszeit derzeit von unbehandelt 2% auf ca. 40% angehoben werden. Die Erwartungen an ein computergestütztes Navigationssystem sind zum einen, dass durch die genauere Orientierung künftig auch schwierigere Fälle operiert werden können und zum anderen, dass durch die Möglichkeit zur verbesserten Radikalität die Fünfjahresüberlebenszeit weiter angehoben wird.

Sowohl für die Tiefennavigation in der offenen wie auch zur Ersetzung des fehlenden Tastsinns in der laparoskopischen Leberchirurgie besteht ein großer klinischer Bedarf für ein computergestütztes Navigationssystem. Hiervon erhoffen sich die Chirurgen eine Orientierungshilfe, die es ihnen erlaubt, die Operationsplanung genauer und sicherer als bisher umsetzen zu können.

Die aufwendige Systemanalyse erscheint daher den gestellten Projektzielen angemessen, weil so zu Beginn viele Risiken minimiert und Fehlentwicklungen vorgebeugt werden konnten. So stellten sich Teile der anfänglichen Lösungsideen frühzeitig im klinischen Umfeld als nicht realisierbar heraus. Zwei Ideen zur Realisierung der Registrierung und Navigation wurden bereits vertieft und als Patent eingereicht.

Unsere folgenden Arbeiten müssen zeigen, ob die angestrebten Registrierungsverfahren den Erwartungen hinsichtlich Genauigkeit und Geschwindigkeit standhalten und ob der Einsatz von Navigationshilfen in Verbindung mit Echtzeit-Verformungsmodellen eine hinreichend genaue Beschreibung der Deformationsvorgänge von interessierenden Zielstrukturen erlaubt.

Darüber hinaus wird an Phantomen die Genauigkeit der Navigation untersucht werden. Sollte sich die Navigation als ausreichend genau erweisen, wären damit auch die Grundlagen für Augmented-Reality und Robotik in der Leberchirurgie gelegt.

## **6 Danksagung**

Dieses Forschungsprojekt wird in der Abteilung Medizinische und Biologische Informatik, Prof. Dr. H.-P. Meinzer, Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg durchgeführt und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung durch den Innovationswettbewerb Medizintechnik (Förderkennzeichen 01EZ0008) finanziert. Für die Beteiligung an der klinischen Anforderungsanalyse danken wir den Herren PD Dr. med. H. G. Rau, Klinikum Großhadern der Ludwig-Maximilians-Universität München,

Prof. Dr. med. Dr. h.c. Ch. Herfarth, Chirurgische Klinik der Universität Heidelberg und Prof. Dr. med. G. Otto, Klinik für Transplantationschirurgie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

## Literaturverzeichnis

- [Ch98] A. K. Chakravarti, B. Vasanta, A. S. A. Krishnan, R. K. Dubash, "Modified Delphi Methodology for Technology Forecasting: Case Study of Electronics and Information Technology", *Technological forecasting & social change* 58(1-2):155-166, 1998.
- [FPP98] J. Ferlay, D. M. Parkin, P. Pisani, *GLOBOCAN 1: Cancer Incidence and Mortality*, International Agency for Research on Cancer of the World Health Organization, Lyon: IARC Press, 1998.
- [GI99] G. Glombitza, W. Lamadé, A. M. Demiris, M. R. Göpfert, A. Mayer, M. L. Bahner, H.-P. Meinzer, G. Richter, T. Lehnert, C. Herfarth, "Virtual planning of liver resections: image processing, visualization and volumetric evaluation", *International Journal of Medical Informatics*, 53(2-3): 225-237, 1999.
- [GME92] R. L. Galloway, R. J. Maciunas, C. A. Edwards, "Interactive, image-guided neurosurgery", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 39:1226-1231, 1992.
- [Ha01] P. Hassenpflug, M. Vetter, C. Cárdenas, M. Thorn, H.-P. Meinzer, "Navigation in liver surgery - results of a requirement analysis", in *Computer Assisted Radiology and Surgery*, H. U. Lemke, M. W. Vannier, K. Inamura, A. G. Farman (Hrsg.), *CARS'01 Proceedings ICS 1230*, Elsevier, in print.
- [HSK98] C. Herfarth, N. Senninger, C. F. Krieglstein: *Leber*, S. 687-698. In: J. R. Siewert (Hrsg.): *Chirurgie*. Berlin, Heidelberg: Springer, 6. Aufl., 1998.
- [K197] H. P. Klotz, R. Flury, P. Erhart, P. Steiner, J. F. Debatin, G. Uhlschmid, F. Largiadèr, "Magnetic Resonance-guided Laparoscopic Interstitial Therapy of the Liver", *The American Journal of Surgery*, 174:448-451, Oktober 1997.
- [KW99] F. Köckerling, H. W. Waclawiczek (Hrsg.): *Leberchirurgie*, Johann Ambrosius Barth Verlag, Heidelberg, Leipzig, 1999.
- [La00] W. Lamadé, G. Glombitza, L. Fischer, P. Chiu, C. E. Cárdenas, M. Thorn, H.-P. Meinzer, L. Grenacher, H. Bauer, T. Lehnert, C. Herfarth, "The Impact of 3-Dimensional Reconstructions on Operation Planning in Liver Surgery", *Archives of Surgery* 135:1256-1261, November 2000.
- [LOH95] T. Lehnert, G. Otto, C. Herfarth, "Therapeutic Modalities and Prognostic Factors for Primary and Secondary Liver Tumors", *World Journal of Surgery*, 19: 252-263, 1995.
- [PH00] N. Pagoulatos, D. R. Haynor, Y. Kim, "Image-based Registration of Ultrasound and Magnetic Resonance Images: A Preliminary Study", in *Image Display and Visualization*, S. Mun (Hrsg.), *Proc. of SPIE* 3976:156-164, Februar 2000.
- [Ra00] H. G. Rau, R. Schauer, T. Helmberger, N. Holzknacht, B. von Ruckmann, L. Meyer, E. Buttler, M. Kessler, G. Zahlmann, D. Schuhman, F. W. Schildberg, "Impact of virtual reality imaging on hepatic liver tumor resection: calculation of risk", *Langenbecks Archives of Surgery*, 385:162-170, April 2000.
- [Sa97] J. Samentiger, *Software Engineering with Reusable Components*, Springer, Berlin, 1997.
- [St99] Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): *Statistisches Jahrbuch 1999 für die Bundesrepublik Deutschland*, Stuttgart: Metzler-Poeschel, September 1999.
- [Th01] M. Thorn, L. Fischer, C. Cárdenas, M. Vetter, P. Hassenpflug, L. Grenacher, G. M. Richter, W. Lamadé, H.-P. Meinzer: „Integration der Operationsplanung in den OP-Saal für die onkologische Leberchirurgie“, in *Bildverarbeitung für die Medizin 2001*,

- H. Handels, A. Horsch, T. Lehmann, H.-P. Meinzer (Hrsg.), S. 104-108, Springer, 2001.
- [Ve01] M. Vetter, P. Hassenpflug, C. Cárdenas, M. Thorn, G. Glombitza, H.-P. Meinzer, „Navigation in der Leberchirurgie - Ergebnisse einer Anforderungsanalyse," in Bildverarbeitung für die Medizin 2001, H. Handels, A. Horsch, T. Lehmann, H.-P. Meinzer (Hrsg.), Informatik aktuell, S. 49-53, Springer, 2001.
- [Wi98] C. R. Wirtz, M. Knauth, S. Haßfeld, V. Tronnier, F. K. Albert, M. M. Bonsanto, S. Kunze, "Neuronavigation - first experiences with three different commercially available systems", Zentralbl.-Neurochirurgie 59(1): 14-22, 1998.