



# TUM

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
INSTITUT FÜR INFORMATIK

## Kombinierte viszeralmedizinische und transvaskuläre Eingriffe

Hubertus Feußner, Sebastian Koller, Brian Jensen,  
Morteza Hashemi

TUM-I1635

## PLAFOKON

Universelles, skalierbares Plattformkonzept für mikroinvasive viszeralmmedizinische Eingriffe

### **Kombinierte viszeralmmedizinische und transvaskuläre Eingriffe**

## 1 Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

### Stand der Forschung

Um im menschlichen Körper therapeutische Interventionen vorzunehmen, stehen unterschiedliche Zugangsmöglichkeiten zur Verfügung. In den letzten Jahren wurde immer deutlicher, dass eine Kombination unterschiedlicher Zugangswege erheblich dazu beitragen kann, die therapeutische Effizienz zu steigern und gleichzeitig auch die Traumatisierung zu reduzieren. Beispiele dafür sind die kombinierten laparoskopisch-endoskopischen Eingriffe oder die laparoskopisch assistierten NOTES-Eingriffe. Eine weiterführende Kooperation zwischen einem laparoskopischen oder flexibel endoskopischen Eingriff mit einer gleichzeitigen endovaskulären Intervention bietet vergleichbar mit den oben beschriebenen sog. Rendez-vous-Verfahren theoretisch ebenfalls erhebliche Vorteile, diese wurden jedoch aktuell noch nicht beschrieben.

Laparoskopische Operationen können ausschließlich im chirurgischen Operationssaal durchgeführt werden, während für die endovaskulären Eingriffe spezialisierte Angiographie-Suiten erforderlich sind. Dadurch ist allein schon aus räumlichen Gründen eine Kombination schwierig, abgesehen davon, dass die beiden Disziplinen Chirurgie und interventionelle Radiologie traditionell wenig Berührungspunkte haben.

Andererseits fehlen die technischen bzw. instrumentellen Voraussetzungen für endoskopisch-endovaskuläre Eingriffe. Selbstverständlich gibt es heute für die Viszeralmedizin leistungsfähige Endoskope bzw. für die interventionelle Radiologie ausgezeichnete Kathetersysteme, aber sie sind ausschließlich für „stand alone“ Anwendungen ausgelegt und nicht für die Koordination/Kooperation mit einem anderen interventionellen Partner. Um gezielt miteinander agieren zu können, ist unbedingt eine Feinabstimmung erforderlich, die bisher noch nicht realisiert werden konnte.

### Lokalisierung und Segmentierung von Blutgefäßen

Für viele Eingriffe ist genaues Wissen über die Gefäßstrukturen des Patienten notwendig. Traditionell wird diese Information aus präoperativen Bildern mittels manueller oder semi-automatischer Bildverarbeitungsschritte gewonnen, die vorwiegend aus der Anwendung von speziellen Filtern bestehen, z.B. der Frangi-Filter. Zusätzlich Genauigkeit lässt sich erzielen, indem die Skalierungsparameter des Filters mit einem MRF-Formulierung ermittelt werden [1]. Das ist vor allem wichtig, wenn Aussagen über den Durchmesser der Gefäße getroffen werden sollen. Mit einer „Graph Cuts“ Formulierung ist es möglich, in Angiographie-Bilder nicht nur die Gefäßstruktur sondern auch den Katheter vollautomatisch zu detektieren [2].

In volumetrischen Aufnahmen wie CT oder MR ist es mit einer weiteren MRF-Formulierung darüber hinaus möglich, vollautomatisch die Gefäßstruktur zu extrahieren und gleichzeitig einen Graphen von dessen Verlauf zu erstellen [3]. Für spezielle Anwendungen, z.B. für die Retinachirurgie, kann man die Algorithmusparameter der MRF-Formulierung lernen, um noch genauere Ergebnisse zu erzielen [4]. In endoskopischen Videosequenzen lassen sich während eines Eingriffs zum Teil verdeckte Gefäße mit statischen Ansätzen ermitteln und mit erweiterter Realität visualisieren [5].

### EM-Tracking

Das elektromagnetische Tracking ist eine sehr vielversprechende Technologie für die Instrumentenverfolgung im Operationssaal. Franz et al. [6] verwenden einen Feldgenerator der Firma NDI (Northern Digital Inc., Waterloo, Canada) für EM-Trackingsysteme. Dieser schirmt das Magnetfeld nach unten hin ab und verhindert so Störungen durch den Patiententisch, was zur

Erhöhung der Genauigkeit führen soll. Ziel dieser Studie war die Untersuchung der Genauigkeit dieses Generators im CT nach einem standardisierten Evaluationsprotokoll sowie die Einbindung dieses Generators in ein Marker-basiertes Navigationssystem für Nadelinsertionen. Die Resultate zeigen eine wesentlich höhere Robustheit, Genauigkeit und Präzision.

### **Computerbasierte Visualisierung**

Ein objektorientiertes Framework zur Bildregistrierung, Bildfusion und Bildvisualisierung wurde entwickelt [7]. Die Software erlaubt die nahtlose Integration verschiedener Ansichten und Datenquellen.

Chirurgische Simulationen benötigen haptische Interaktionen in einer virtuellen Umgebung. In [8] ist eine Plattform entwickelt worden, die auf dem Model-View-Controller Muster basiert. Diese Plattform ist für die Implementierung diverser chirurgische Simulationen mit haptischem Feedback eingesetzt worden.

Die Möglichkeiten der 3D-Autostereodisplays sind in [9] diskutiert. Als Anwendungsbeispiele sind in dieser Publikation Gefäßstrukturen im Fokus. Die Ergebnisse motivieren für den Einsatz der 3D-Displays für die Konstruktion und Darstellung komplexer Bilder, was ebenfalls einen Schwerpunkt dieses Teilprojektes darstellt.

### **Kritik am Stand der Forschung**

- Herkömmliche Navigationsverfahren sind nicht für hybride minimalinvasive Interventionen mit zwei flexiblen Systeme ausgelegt.
- Die Registrierung eines flexiblen Manipulators, der mit einem EM-Tracker lokalisiert wird, zu einem Manipulator, der sich selbst visuell in einem eigenen Koordinatensystem lokalisiert, ohne direkten Sichtkontakt der beiden, wurde bis jetzt nicht gezeigt.
- Semi- und vollautomatische Segmentierungsalgorithmen der Blutgefäße wurden bisher nicht für die Navigation zwei flexibler Systeme, die sich keine gemeinsamen Referenzpunkte teilen, entwickelt.

### **Eigene Vorarbeiten**

Seit 2001 liegt der Schwerpunkt der Arbeiten am Lehrstuhl für Robotik und Echtzeitsysteme der Technischen Universität München in kognitiver Robotik, Echtzeitsystemen, Mensch-Roboter-Schnittstellen mit Anwendungen in der Medizin. Die Erfahrungen im medizinischen Umfeld sind sehr vielfältig und umfassen u.a. Arbeiten an der Automatisierung von chirurgischen Bewegungsabläufen sowie zur Übertragung von chirurgischen Fähigkeiten, an Bedieneinheiten und Bedienkonzepten für chirurgische Roboter mit vielen Freiheitsgraden mit Berücksichtigung von Echtzeitkommunikation und Steuerung, an Haptik und virtuellen Schranken für die sichere Interaktion mit der Umgebung und schließlich an der 3D-Rekonstruktion des Situs und der Verfolgung der Instrumente. Die Arbeiten der Gruppe in der ersten Förderperiode beschäftigten sich mit der Steuerung und Bedienung eines vollflexiblen Single-Port Systems und mit der visuellen Wahrnehmung für chirurgische Eingriffe.

Der klinische Antragsteller ist Konsiliaroberarzt der Chirurgischen Klinik und Poliklinik des Klinikums rechts der Isar der Technischen Universität München. Sein spezielles Arbeitsgebiet ist die minimalinvasive Chirurgie, deren erfolgreiche Einführung und klinische Etablierung entscheidend durch ihn vorangetrieben wurde. In konsequenter Fortführung der laparoskopischen Operationstechnik führte er Ende der 90er Jahre in enger Kooperation mit Gastroenterologen die sog. „Rendez-vous-“ bzw. Hybridtechniken ein, die jetzt bei benignen und frühen malignen Prozessen im Gastrointestinaltrakt auch international zunehmend eingesetzt werden.

### Hybrid-/Rendez-vous-Verfahren

Ein besonderer wissenschaftlicher Schwerpunkt der Forschungsgruppe MITI sind seit mehreren Jahren die sog. „Hybrid“- bzw. „Rendez-vous“-Eingriffe (Abb. 3), d.h. Interventionen, die simultan über zwei unterschiedliche Zugangswege durchgeführt werden. Bereits klinisch erfolgreich durchgeführt werden laparoskopisch-endoskopische Kombinationseingriffe [10, 11] und endoskopisch-radiologische Verfahren. Erstere ermöglichen eine minimalinvasive Behandlung von gutartigen und frühen bösartigen Tumoren des Gastrointestinaltrakts, während die endoskopisch-radiologischen Verfahren (endoskopisch-retrograde Cholangioduktographie kombiniert mit der perkutanen transhepatischen Cholangioduktographie) ganz neue therapeutische Möglichkeiten bei der Behandlung von Gallenwegsobstruktionen eröffnet [12].

Ein zentrales Problem ist in beiden Anwendungsbeispielen die gegenseitige Positionsorientierung. Bei den laparoskopisch-endoskopischen Verfahren stehen die Diaphanoskopie und die Palpation im Vordergrund, bei den endoskopisch-radiologischen Verfahren die Fluoroskopie.

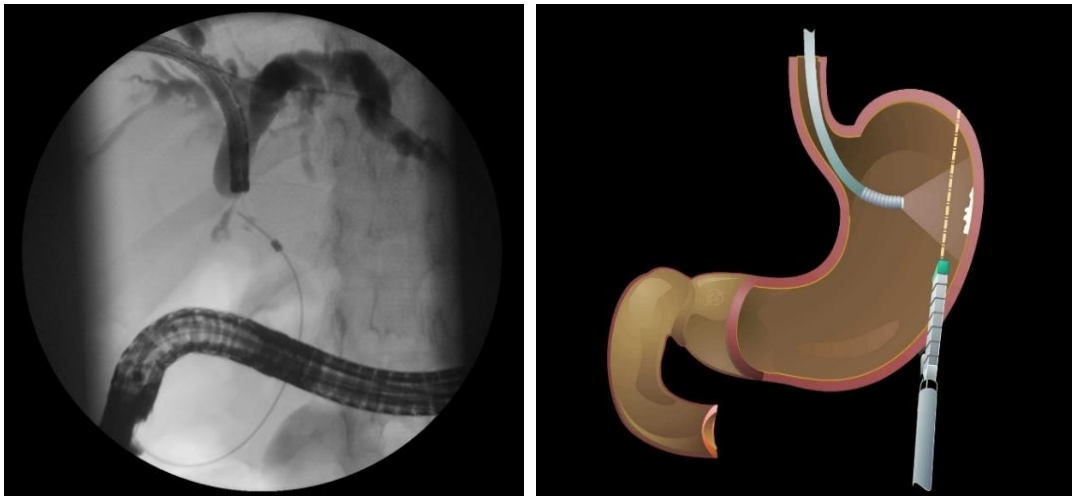


Abb. 1: Hybrid-/Rendez-vous-Verfahren im Gastrointestinaltrakt (Quelle: MITI)  
ERCP mit radiologischer Assistenz (links)

Laparoskopische Wedgeresektion eines Magenkarzinoms unter endoskopischer Assistenz und visueller Kontrolle (rechts)

### Humanoides Trainingsphantom

Ein fester Bestandteil der klinischen Forschung des Klinikums rechts der Isar stellt das humanoide Operationsphantom ELITE (**E**ndoskopisch-**L**aparoskopische **I**nterdisziplinäre **T**rainings-**E**inheit) dar [13, 14]. In Zusammenarbeit der chirurgischen und gastroenterologischen Klinik wurde eine anatomiegetreue Nachbildung des weiblichen Torsos mitsamt Organen des Gastrointestinaltraktes realisiert, was neben endoskopisch intraluminalen, laparoskopischen, auch endoskopisch transmurale (NOTES) Eingriffe ermöglicht.

Auf dieser Basis wurden in der Forschungsgruppe MITI neuartige minimalinvasive Operationsmethoden entwickelt. Erfolgreich konnte bereits eine experimentelle Sigmaresektion

basierend auf einer Kombination eines Single-Port-Eingriffs mittels eines manuell aktuierten SPIDER-Instruments (Transenterix, USA) bzw. eines mechatronisch assistierten HVSPS (MITI, Deutschland) und transanaler Assistenz über ein transsigmoidales Portsystem ISSA (Karl Storz, Deutschland) durchgeführt werden.

Eine Möglichkeit zur Simulation endovaskulärer Eingriffe ist aktuell noch nicht gegeben, würde jedoch zur Komplettierung der zunehmend kooperativ agierenden, interventionellen Disziplinen maßgeblich beitragen.

### **3D-Visualisierung in der Medizin**

Wie bereits in der privaten Unterhaltungselektronik geschehen, findet die 3D-Technologie im operativen Umfeld immer größer werdende klinische Akzeptanz. Ob die neue Technologie für Anwender wirklich einen messbaren Mehrwert bringt, überprüfte die Forschungsgruppe MITI in einer prospektiven klinischen Studie [15], in der die neuesten 3D-Systeme mit einem High-End-2D-Monitorsystem in der Laparoskopie verglichen wurden. Anhand dieser Studie hat sich gezeigt, dass hinsichtlich der operativen Performance nicht nur unerfahrene Anfänger, sondern auch erfahrene Experten von der 3D-Visualisierung profitierten, wobei aber Letztere diese Tatsache subjektiv nicht wahrnahmen.

### **3D-Rekonstruktion und Instrumentenverfolgung**

Da die Integration von passiven Verfahren im bestehenden klinischen Workflow und in existierenden Systemen einfacher gestaltet werden muss, beschäftigten sich die Vorarbeiten der Antragsteller speziell mit solchen Ansätzen.

In erster Linie wurden hochqualitative Stereorekonstruktionsalgorithmen untersucht, die mit den Herausforderungen von chirurgischen Szenen zurechtkommen. Diese Szenen lassen sich typischerweise durch glatte und gekrümmte Oberflächen, die teilweise nur schwach texturisiert sind, charakterisieren und sind für die meisten Stereorekonstruktionsalgorithmen nicht zufriedenstellend zu beherrschen. Ein hochgenauer Stereorekonstruktionsalgorithmus wurde entwickelt (Patch-Match-Huber-Algorithmus [16]), der für glatte und runde Oberfläche ausgelegt ist und durch Regularisierung und globale Optimierung robust gegen texturschwachen Teile der Szene ist. Eine Evaluation mit dem „Middlebury Stereo Benchmark“, die de facto Standardevaluierung für Stereoalgorithmen, zeigt außerdem, dass Patch-Match-Huber zu den besten Verfahren gehört.

Auf Basis der Tiefenschätzung der Szene durch die Stereorekonstruktion ist es möglich, die Bewegung der endoskopischen Kamera in Echtzeit mittels eines Verfahrens aus der direkten Bildanordnung [17] oder mit einem merkmalsbasierten Ansatz zu ermitteln [18].

Gegenüber merkmalsbasierten Verfahren sind direkte Methoden stabiler im Falle von Bildunschärfe durch schnelle Bewegungen oder dynamische Bewegungen in der Szene. Bei der Bewegungsschätzung wird eine initiale Tiefenschätzung der Szene zu Beginn jedes Zeitschritts gebraucht, die durch einen besonders effizienten Stereorekonstruktionsalgorithmus (Dense-Stereo-Hashing [19]) schnell genug geliefert werden kann. Diese Methode ist nicht so genau wie Patch-Match-Huber, läuft aber selbst bei HD-Bildern mit einer akzeptablen Bildwiederholungsrate.

Auf Basis dieser Vorarbeiten ist es ebenfalls möglich, anhand visueller Merkmale verschiedene chirurgische Instrumente zu erkennen [20], was z. B. im Rahmen der chirurgischen Workflowerkennung erfolgreich eingesetzt wird.

Ebenfalls lassen sich in Echtzeit 3D-Modelle der Instrumente mittels einer endoskopischen Kamera verfolgen [21, 22]. Die Instrumente können mit millimetergroßen Mikrokameras augmentiert werden [23], wodurch eine Steigerung der Genauigkeit bei der Verfolgung eines vorgegebenen Pfads erzielt werden kann und aktive virtuelle Schranken realisiert werden können.

## 1.1 Ziele

Viele chirurgische Eingriffe könnten prinzipiell zwar mikroinvasiv (endoskopisch oder per NOTES) durchgeführt werden, sind aber derzeit aus unterschiedlichen Gründen noch nicht reif für den klinischen Einsatz.

Zwei Hinderungsgründe spielen eine wesentliche Rolle:

- Insbesondere bei Frühbefunden ist die exakte Lokalisierung einer Läsion häufig ausgesprochen schwierig.
- Sowohl für endoskopische wie auch SPOT-Techniken sind methodisch bedingt akut auftretende Blutungen nur schwer beherrschbar. Viele Eingriffe gelten derzeit zwar als machbar, sind aber noch zu riskant.

Die Überwindung beider Probleme würde ganz wesentlich zu einer Erweiterung des Indikationsspektrums minimalinvasiver viszeralmedizinischer Interventionen beitragen.

Nach systematischer Überprüfung möglicher Lösungsansätze bietet eine Ergänzung/Assistenz des minimalinvasiven Vorgehens durch eine gleichzeitige vaskuläre Intervention ausgesprochen gute Erfolgsaussichten.

Das zum Teil bahnbrechende therapeutische Potential endovaskulärer Interventionen ist durch die großen Erfolge in der Behandlung kardiologischer Erkrankungen (koronare Stents, Implantation von Herzklappen usw.) oder die großen Fortschritte der interventionellen Radiologie (Behandlung der portalen Hypertension bei Leberzirrhose, Behebung von schweren (peripheren) Durchblutungsstörungen etc.) mittlerweile auch der nichtmedizinischen Öffentlichkeit recht gut bekannt.

Die Nutzung dieses Potentials zur Erleichterung von **SPOT**-Eingriffen ist so naheliegend, dass es fast erstaunt, dass diese Idee bisher noch nicht aufgegriffen wurde. Erklärbar ist das nur dadurch, dass die beiden Disziplinen interventionelle Kardiologie und Radiologie traditionell soweit von der Viszeralmedizin entfernt waren und immer noch sind, dass ein kooperatives Zusammenwirken bisher noch nicht einmal angedacht wurde (im Gegensatz zur interventionellen Gastroenterologie, mit der mittlerweile Kombinationseingriffe erfolgreich praktiziert werden).

Das Ziel dieses Teilprojekts soll deshalb sein, die methodischen Voraussetzungen für ein Zusammenwirken des **SPOT** mit den prinzipiell miniaturisierbaren, endovaskulären **Nebenaktoren** zu schaffen, sodass das nachfolgende Szenario realisiert werden kann.

Während der **SPOT**-Operateur entweder transrektal, oder wie in Abb. 2 dargestellt, transgastral seinen Eingriff durchführt, wird er gleichzeitig von einem endovaskulär agierenden Operateur unterstützt. Wünschenswert wäre eine simultane endovaskuläre Assistenz in der Weise, dass über einen arteriellen Zugang (üblicherweise die Femoralarterie) ein entsprechend modifizierter, endovaskulärer **Nebenaktor** eingebracht wird, mit dem z.B. die versorgende Arterie des Zielgebiets sondiert wird.

Noch völlig ungelöst ist hierbei die Frage der zielgerichteten Interaktion zwischen beiden Akteuren, da keinerlei Sichtkontakt besteht. Beide müssen sich in einem gemeinsamen Koordinatensystem bewegen und zueinander verlässlich navigiert werden. Insbesondere vor kritischen Handlungen müssen die unterschiedlichen Koordinatensysteme intraoperativ mittels geeigneter Methoden, z.B. Elektromagnetisches Tracking und intraoperative Bildgebung, zueinander referenziert und die Position der beiden Akteuren – **SPOT-System** und endovaskulärer **Nebenaktor** – zur Orientierung der Operateure sichtbar gemacht werden.

Eine 3D-Visualisierung des aktuell vorliegenden Operationsszenarios soll hierbei dem Operateur intuitiv die räumliche Position der Akteuren darstellen. Um den zusätzlichen kognitiven Aufwand

einer weiteren 2D-Projektion zu vermeiden, soll in diesem Zusammenhang eine 3D-Darstellung über einen autostereoskopischen Monitor dem Chirurgen zur Verfügung gestellt werden.



Abb. 2: Schematische Darstellung eines kombinierten mikroinvasiven und transvaskulären Eingriffs.

Das für endoluminale Anwendungen weiterentwickelte Aktorsystem sowie das zur Führung des Gesamtsystems verwendete Endoskop wird durch einen Chirurgen mittels einer intelligenten Schnittstelle bedient. Zusätzliche Assistenz soll dem Operateur durch einen modifizierten Nebenaktor zur Verfügung gestellt werden, über den transvaskulär versorgende Gefäße des Zielorgans sondiert und für die Dauer der Operation reversibel verschlossen werden sollen.

Nach Sicherstellung der räumlichen Orientierung der Aktoren wäre die Möglichkeit gegeben, die Läsion zunächst durch zusätzliche gezielte, hochselektive Perfusion dem Operateur sichtbar zu machen. Die genaue Lokalisation und zusätzliche Funktionalität des modifizierten **Nebenaktors** erlaubt es dem **SPOT**-Operateur, die arterielle Blutzufuhr durch das modifizierte endovaskuläre Assistenzsystem (z.B. mittels Ballon) zu blockieren. Kritische Handlungen, z.B. Verschluss von Läsionen während einer Leberteilresektion, können somit ohne Zeitdruck und unter geordneten Bedingungen durchgeführt werden. Auch weitere assistierende, endovaskuläre Aktionen des **Nebenaktors**, z.B. die Gabe von Farb- oder Kontrastmittel oder eine lokale Medikation, könnten somit gezielt durchgeführt werden.

## 1.2 Arbeitsprogramm inkl. vorgesehener Untersuchungsmethoden

### AP 1: Klinische Anforderungsermittlung

Da die Kombination von intraabdominalen und gleichzeitigen endovaskulären Interventionen wissenschaftliches Neuland darstellt, ist von medizinischer Seite eine präzise Definition der Erwartungen und eine systematische Analyse der spezifischen Rahmenbedingungen der endovaskulären Intervention erforderlich. Die medizinischen Antragspartner sind Viszeralmediziner



und von daher keine ausgewiesenen Experten auf dem Gebiet der endovaskulären Interventionen. Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, die bereits vereinbarte Zusammenarbeit mit den interventionellen Radiologen zu konkretisieren.

In einem ersten Schritt wird in enger Abstimmung mit den beteiligten medizinischen Disziplinen ein spezifisches Eingriffsszenario exemplarisch für einen kombinierten viszeralmedizinischen und endovaskulären Hybrideingriff, z.B. ein Eingriff über die Femoralarterie zu einem vorher definierten Areal der Leber, definiert. Die Translation des erworbenen medizinischen Domänenwissens steht hierbei im Vordergrund der weiteren Zusammenarbeit mit den ingenieurwissenschaftlichen Partnern.

In zu erstellenden Testszenarien werden zunächst herkömmliche Kathetersysteme eingesetzt, um Bewegungsraum, Handling, Möglichkeiten zur Navigation usw., z.B. über den Vorschub des Systems oder zusätzliche Bildgebung zu spezifizieren. Diese Erfahrungen werden ebenfalls zur iterativen Optimierung des physischen Modells aus AP 2 übertragen.

### **AP 2: Entwicklung eines physischen Testmodells für endovaskuläre Hybrideingriffe**

Aufbauend auf umfangreichen Vorarbeiten zur Endoskopisch-Laparoskopischen Interdisziplinären Trainingseinheit (ELITE) und den Erkenntnissen aus **AP 1** wird in diesem Arbeitspaket die Entwicklung des physischen Modells in Richtung der endovaskulär assistierten Hybrideingriffe vorangetrieben.

Das in **AP 1** festgelegte Operationsszenario wird in diesem Arbeitspaket zu Evaluationszwecken exemplarisch erstellt. Die dafür notwendigen Gefäßstrukturen und Organe werden aus vorhandenen 3D-Volumendaten segmentiert und zur weiteren Verarbeitung extrahiert.

Mit Hilfe von geeigneten Rapid-Prototyping-Verfahren werden die Gefäß- und Organelemente anatomiegetreu aus den 3D-Volumendaten modelliert und funktionell in das Gesamtsystem des Trainingsphantoms ELITE integriert. Dreidimensionale Wachsformen werden mittels neuartiger Wachsdruckmethoden als „verlorene Formen“ gefertigt, die sich mit geeigneten Kunststoffen umgossen und entformt im Besonderen für die Herstellung der Hohlgefäße sowie –organe eignen. Die untersuchte Gefäßstruktur soll hinsichtlich möglicher Bewegungsrestriktionen, Veränderungen des Bewegungsverhaltens des Kathetersystems bei enthaltenen Fluiden oder anatomischen Veränderungen analysiert werden, um beispielsweise die Bewegungsfreiheit des endovaskulären **Nebenaktors** zu definieren.

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Sicherstellung des gesamten Anwendungsspektrums das erweiterte Trainingsphantom ohne Einschränkung abgebildet hinsichtlich des gewünschten viszeralmedizinischen und endovaskulären Hybrid-Eingriffs.

### **AP 3: Integration und Verarbeitung von Elektromagnetischem Tracking in SPOT und endovaskulären Nebenaktor**

Die in **AP 1** durchgeführte systematische Analyse spezifischer Rahmenbedingungen der endovaskulären Intervention seitens des medizinischen Antragspartners setzt hierbei ebenfalls die Voraussetzung für dieses Arbeitspaket.

In diesem Arbeitspaket werden das **SPOT-System** und der endovaskuläre **Nebenaktor** mit EM-Tracking-Sensoren versehen, um eine unabhängige Lokalisierung der beiden Aktoren untereinander zu ermöglichen. Da die Lokalisierung mittels EM-Tracking immer relativ zum Feldgenerator, der als freierschiebbarer Referenzpunkt dient, erfolgt, wird zunächst eine Evaluierung über die erzielbare Genauigkeit und Verlässlichkeit mit verschiedenen Konfigurationen ausgeführt.

Das Ziel ist es, Konfigurationen zu bestimmen, durch die die notwendige Genauigkeit erzielt werden kann. Hier kommen explizit Konfigurationen in Betracht, womit der Feldgenerator mit den Bewegungen der beiden Aktoren mitbewegt wird, um z.B die Distanz zwischen Feldgenerator und

Aktoren möglichst niedrig zu halten und trotzdem die Genauigkeit konstant zu halten. Da der Referenzpunkt nicht statisch sein kann, ist das Ergebnis der Lokalisierung mit dem EM-Tracker eine hauptsächlich statistisch relevante Positionsinformation der beiden Aktoren relativ zueinander.

Folgende Meilensteine sollen in diesem Arbeitspaket erreicht werden:

- Ein EM-Tracking-System inklusive Hardware und Software wird ausgewählt und erworben.
- Unterschiedliche Szenarien für die Auswahl des Referenzpunktes werden analysiert.
- Die Genauigkeit und Verlässlichkeit mit den verschiedenen Konfigurationen werden evaluiert.
- Möglichkeiten und Strategien für die aktive Bewegung des Referenzpunkts werden untersucht.
- Entwurf und Implementierung von geeigneten Datenstrukturen für die Aufzeichnung und Weitergabe von Positionsinformationen des EM-Trackers.

#### **AP 4: Lokalisierung der Aktoren in-situ**

Die Kernfrage des dualen Ansatzes ist die Bestimmung der Position der beiden Aktoren in-situ. Während die Lokalisierung mittels EM-Tracking aus **AP 3** genaue Positionsinformationen der beiden Aktoren liefert, ist diese Information hierbei nur relativ. Es besteht daher keinerlei direkter Bezug zur Anatomie des Patienten oder zum Operationssaal.

Ziel dieses Arbeitspakets ist es daher, die Lokalisierung des **SPOTs** in-situ zu realisieren und damit eine Brücke zwischen den relativen Positionsinformationen aus dem EM-Trackingsystem und der aktuellen Anatomie des Patienten zu bauen. Dies bildet wiederum die Grundlage für weitere intelligente Funktionalitäten wie die in **AP 5** beschriebenen Navigation.

Da der endovaskuläre **Nebenaktor** nicht mit der notwendigen Sensorik ausgestattet werden kann, wird die in-situ Lokalisierung über das **SPOT** erfolgen. Hierfür werden ähnlich wie in **TP 5** beschriebenen Verfahren aus dem Bereich der optischen Bewegungsschätzung, meist als „Visual Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM)“ in der Robotik bezeichnet, eingesetzt. Solche Methoden haben den Vorteil, dass sie rein passiv arbeiten und mit derselben Kamera betrieben werden können, die der Chirurg für die Bedienung des Systems verwendet.

Insbesondere sind Methoden der direkten Bildanordnung für die Bewegungsschätzung der endoskopischen Kamera im Bauchraum geeignet, da sie robuster gegenüber homogenen Oberflächen, die häufig in solchen Szenen zu finden sind, und weniger störungsanfällig für Deformationen oder Änderungen der Szene im Vergleich zu merkmalsbasierten Verfahren sind. Trotz des höheren Rechenbedarfs sind Methoden der direkten Bildanordnung in der Lage, echtzeitfähig bei höheren Bildwiederholungsraten zu arbeiten [17].

Aus dem angepassten VSLAM-Verfahren werden nicht nur Positionsinformationen der endoskopischen Kamera relativ zu der Umgebung gewonnen, sondern auch 3D-Informationen [16, 19] in Form einer probabilistischen Karte. Mittels zusätzlichen Offline-Optimierungsverfahren wie z.B. dem Bündelausgleich, die im Hintergrund parallel arbeiten können, wird die 3D-Karte noch genauer bestimmt

Konkret werden die folgenden Schritte in diesem Arbeitspaket ausgeführt:

- Ein VSLAM-Verfahren aus dem Bereich der direkten Bildanordnung [17] wird implementiert, der auf die Besonderheiten des Bauchraums angepasst wird.
- Die Datenstrukturen für die 3D-Karteninformation werden entworfen, die für Anforderungen der Navigation aus AP 5 besonders geeignet sind.

#### **AP 5: Navigation und Bewegungsplanung für einen kombinierten Eingriff**

In diesem Arbeitspaket werden die gewonnenen Lokalisierungs- und Karteninformationen aus den **APs 3 und 4** verwendet, um den assistierenden endovaskulären **Nebenaktor** anhand einer Karte, die mit präoperativen und zum Teil intraoperativen Daten erstellt wird, gezielt durch die Gefäßstruktur zu navigieren.

Das übergeordnete Ziel dieses Arbeitspakets ist es, den endovaskulären **Nebenaktor** sicher zu einer präoperativ definierten Stelle der Anatomie des Patienten zu navigieren, damit die Blutversorgung an dieser Position für einen definierte Zeitraum blockiert werden kann, z.B. während einer Leberteilresektion mittels **SPOT**.

Da der endovaskuläre **Nebenaktor** nicht mit Sensorik ausgestattet werden kann, die ihm erlauben würde, sich selbst in der Anatomie und Gefäßstruktur des Patienten zu lokalisieren, ist man zunächst auf eine Aufbereitung entsprechender präoperativer Daten, z. B. CT-Daten, angewiesen. Aus diesen präoperativen Daten wird in erster Linie die Gefäßstruktur mittels semiautomatischen Segmentierungsalgorithmen gewonnen. Die extrahierte Gefäßstruktur wird in einer eigenen Karten-Datenstruktur untergebracht, die besonders für die Navigation und Bewegungsplanung des endovaskulären **Nebenaktors** optimiert wird.

Eine weitere Aufgabe besteht darin, die präoperativen Daten mit der Position des **SPOT** in-situ zu registrieren. Erst dadurch wird die Lokalisierung des endovaskulären **Nebenaktors** innerhalb der präoperativen Daten ermöglicht.

In diesem Arbeitspaket werden Möglichkeiten der automatischen und semiautomatischen Registrierung untersucht, die auf Basis der Trajektorien und der 3D-Karte des **SPOT** erfolgen wird. Da das **SPOT-System** seine eigene Position permanent selbst ermittelt, muss die Registrierung der präoperativen Daten nur einmal erfolgen, danach kann die Registrierung im Hintergrund aperiodisch angepasst werden.

Auf Basis der Karten-Datenstruktur des Gefäßes und der Registrierung der präoperativen Daten zu der aktuellen Position des **SPOT-Systems** kann ein Bewegungsplan des endovaskulären **Nebenaktors** für eine ausgewählte Stelle der Anatomie entworfen werden. Diese Information nutzt der Chirurg, um gezielt durch die Gefäßstruktur zu navigieren. Außerdem lässt sich diese Information intuitiv visualisieren, wie nachfolgend in **AP 7** beschrieben.

Wenn die Konfidenz der Position bei der Navigation der Gefäßstruktur zu gering wird, oder am Schluss einer Navigation die Position bestätigt werden soll, lassen sich Röntgenaufnahmen nach Zugabe von Kontrastmitteln erstellen. Hierfür sind zwei Röntgenaufnahmen vorgesehen, die orthogonal zueinander erstellt werden. Mittels dieser Konfiguration lässt sich eine grobe Bestätigung der absoluten Position, inklusive der Position des endovaskulären **Nebenaktors** und des **SPOT-Systems**, erstellen und somit eine Fehlerkorrektur der absoluten Position ermöglichen.

Die Meilensteine dieses Arbeitspaketes sind wie folgt:

- Geeignete präoperative Daten werden aufgenommen.
- Ein Segmentierungsalgorithmus für die Gefäßstruktur wird implementiert.
- Eine passende Karten-Datenstruktur für die Navigation und Bewegungsplanung in der Gefäßstruktur wird entworfen und implementiert.
- Ein Registrierungsalgorithmus zwischen den präoperativen Daten und der 3D-Karte des SPOT wird implementiert.
- Ein Bewegungsplaner für die Gefäßstruktur wird implementiert, der den Chirurg bei der Navigation unterstützen soll.
- Ein Rekonstruktionsalgorithmus wird für die orthogonalen Röntgenaufnahmen implementiert.
- 

## **AP 6: Erforschung anwendungsspezifischer, endovaskulärer Interventionsmöglichkeiten**

In enger Zusammenarbeit mit weiteren endovaskulär tätigen, klinischen Disziplinen, z.B. Radiologie und Kardiologie, soll ein mögliches Interventionsspektrum für spezifische Hybrid-Verfahren anhand der jeweiligen Indikation und Behandlungsstrategie erstellt werden.

Das Ziel des Arbeitspaketes ist es, konkrete Assistenzleistungen zu erarbeiten, die durch den endovaskulären **Nebenaktor** in einem kombinierten Hybrid-Eingriff mit dem konventionellen **SPOT-System** erbracht werden können. Im Besonderen sollen in diesem Arbeitspaket folgende Themen bearbeitet werden:

- Markierung des Zielgebiets durch endovaskuläre, gezielte hochselektive Farbstoffperfusion einer Läsion.
- Markierung eines bestimmten Leberareals vor der Durchführung einer kritischen Handlung durch das SPOT-System, z.B. durch Kontrastmittel, nuklearmedizinische Tracer oder andere Trackingsonden.
- Definition geeigneter transvaskulärer Zugangswege für jeweilige medizinische Indikationen.
- Konzeptionelle Erarbeitung von therapeutischen Modulen, z.B. zur gezielten Perfusionsblockade arterieller Gefäße über Ballone.
- Möglichkeiten/Potenzial gezielter endovaskulärer Aktionen im Zielgebiet zur Unterstützung des abdominell agierenden Aktors, z.B. gezielte Medikation.
- 

#### **AP 7: Spezifikation eines assistierenden 3D-Visualisierungssystems**

Während der Kooperation beider beschriebenen Aktoren ist ein assistierendes Visualisierungssystem für den/die Operateur(e) unabdingbar. Diese Nutzerschnittstelle soll dem Chirurgen als visuelles Feedbacksystem zur Verfügung stehen, mit dessen Hilfe die Navigation der Aktoren und Durchführung der kooperativen Intervention im Operationsbereich ermöglicht wird.

Auf Basis von aufbereiteten 3D-Datensätzen, die z.B. direkt aus der Verbindung zum Kooperativen Interventionsumfeld KIU aus **TP 4** zur Verfügung gestellt werden, den Lokalisationsdaten (**AP 4**) der einzelnen Aktoren sowie der Navigationsdaten (**AP 5**) können dem Chirurgen z.B. vor der Durchführung einer kritischen Aktion die Position und der Abstand der Aktoren im Raum dargestellt werden.

Um den Operateuren keinen zusätzlichen kognitiven Aufwand zu verschaffen, könnte diese räumliche Situation mithilfe eines autostereoskopischen 3D-Bildschirms zurückgekoppelt werden. Das Autostereodisplay bietet die Möglichkeit, ohne zusätzliche Verwendung einer 3D-Brille ein räumliches Feedback zu erlangen. Falls es der Interventionsablauf zulässt, wäre eine räumliche Betrachtung der Situation mittels Augmented-Reality-Brillen ebenfalls denkbar. In enger Zusammenarbeit mit den medizinischen Partnern soll in diesem Arbeitspaket definiert werden, welche Visualisierungsart sich am besten für die jeweiligen Interventionen eignen.

Folgende Meilensteine sollen in diesem Arbeitspaket erreicht werden:

- Schaffung und Bewertung einer geeigneten visuellen Nutzerschnittstelle für die Operateure
- Bestimmung der absoluten Position der Aktoren im Raum
- Messung von Abständen zwischen den Aktoren
- Mögliche Auslösung von Assistenzfunktionen

#### **AP 8: Erstellung und Evaluierung des Gesamtsystems**

Die Einzelergebnisse hinsichtlich der Software- und Hardware-Komponenten werden in diesem Arbeitspaket in die Architektur des Gesamtsystems integriert. In enger Zusammenarbeit mit den medizinischen Partnern wird anhand der in **AP 1** festgelegten Kriterien und des in **AP 2** erstellten

physischen Modells eine technische und medizinische Evaluation durchgeführt. Folgende Meilensteine der Evaluation sind hierbei vorgesehen:

- Gezielte Evaluation der Genauigkeit und Verlässlichkeit der Lokalisierung der beiden Aktoren
- Sicherheit und Genauigkeit der Navigation und Bewegungspfadplanung
- Sicherheit in der Ausführung erarbeiteter Assistenzfunktionen

## 2 Literaturverzeichnis

- [1] Mirzaalian, H., & Hamarneh, G. (2010, June). Vessel scale-selection using MRF optimization. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on* (pp. 3273-3279). IEEE.
- [2] Hernández-Vela, A., Gatta, C., Escalera, S., Igual, L., Martin-Yuste, V., Sabaté, M., & Radeva, P. (2012). Accurate coronary centerline extraction, caliber estimation, and catheter detection in angiographies. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 16(6), 1332-1340.
- [3] Zhu, N., & Chung, A. (2013, June). Graph-based optimization with tubularity markov tree for 3d vessel segmentation. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on* (pp. 2219-2226). IEEE.
- [4] Orlando, J. I., & Blaschko, M. (2014). Learning fully-connected CRFs for blood vessel segmentation in retinal images. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2014* (pp. 634-641). Springer International Publishing.
- [5] Amir-Khalili, A., Peyrat, J. M., Abinahed, J., Al-Alao, O., Al-Ansari, A., Hamarneh, G., & Abugharbieh, R. (2014). Auto localization and segmentation of occluded vessels in robot-assisted partial nephrectomy. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2014* (pp. 407-414). Springer International Publishing.
- [6] Franz, A. M., Servatius, M., Seitel, A., Hummel, J., Birkfellner, W., Bartha, L., ... & Maier-Hein, L. (2012). Elektromagnetisches Tracking für die interventionelle Radiologie. In *Bildverarbeitung für die Medizin 2012* (pp. 392-397). Springer Berlin Heidelberg.
- [7] Zhu, Y. M., & Cochoff, S. M. (2006). An object-oriented framework for medical image registration, fusion, and visualization. *Computer methods and programs in biomedicine*, 82(3), 258-267.
- [8] Maciel, A., Sankaranarayanan, G., Halic, T., Arikatla, V. S., Lu, Z., & De, S. (2011). Surgical model-view-controller simulation software framework for local and collaborative applications. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 6(4), 457-471.
- [9] Welch, G., Sonnenwald, D. H., Mayer-Patel, K., Yang, R., State, A., Towles, H., ... & Fuchs, H. (2005, October). Remote 3D medical consultation. In *Broadband Networks, 2005. BroadNets 2005. 2nd International Conference on* (pp. 1026-1033). IEEE.
- [10] Wilhelm, D., Delius, S. V., Burian, M., Schneider, A., Frimberger, E., Meining, A., Feussner, H. (2008). Simultaneous use of laparoscopy and endoscopy for minimally invasive resection of gastric subepithelial masses—analysis of 93 interventions. *World journal of surgery*, 32(6), 1021-1028.
- [11] Wilhelm, D., Von Delius, S., Weber, L., Meining, A., Schneider, A., Friess, H., Feussner, H. (2009). Combined laparoscopic–endoscopic resections of colorectal polyps: 10-year experience and follow-up. *Surgical endoscopy*, 23(4), 688-693.
- [12] Weber, A., Roesch, T., Pointner, S., Born, P., Neu, B., Meining, A., Schmid, R., Prinz, C. (2008). Transpancreatic precut sphincterotomy for cannulation of inaccessible common bile duct: a safe and successful technique. *Pancreas*, 36(2), 187-191.
- [13] Gillen, S., Wilhelm, D., Meining, A., Fiolka, A., Doundoulakis, E., Schneider, A., Feussner, H. (2009). The "ELITE" model: construct validation of a new training system for natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES). *Endoscopy*, 41(05), 395-399.
- [14] Fiolka, A., Gillen, S., Meining, A., Feussner, H. (2010). ELITE-The ex vivo training unit for NOTES: Development and Validation. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*, 19(5), 281-286.
- [15] Wilhelm, D., Reiser, S., Kohn, N., Witte, M., Leiner, U., Mühlbach, L., ... & Feussner, H. (2014). Comparative evaluation of HD 2D/3D laparoscopic monitors and benchmarking to a theoretically ideal 3D pseudodisplay: even well-experienced laparoscopists perform better with 3D. *Surgical endoscopy*, 28(8), 2387-2397.
- [16] Heise, P., Klose, S., Jensen, B., & Knoll, A. (2013, December). Pm-huber: Patchmatch with huber regularization for stereo matching. In *Computer Vision (ICCV), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 2360-2367). IEEE.

- [17] Klose, S., Heise, P., & Knoll, A. (2013, November). Efficient compositional approaches for real-time robust direct visual odometry from RGB-D data. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 1100-1106). IEEE.
- [18] Traeger, M. F., Roppenecker, D. B., Jensen, B., Can, S., Knoll, A., & Lueth, T. C. (2014, August). Interdisciplinary concept of design, actuation, control and vision computing of a laser-sintered single-port robot. In Biomedical Robotics and Biomechatronics (2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on (pp. 52-57). IEEE.
- [19] Heise, P., Jensen, B., Klose, S., & Knoll, A. (2015, May). Fast dense stereo correspondences by binary locality sensitive hashing. In Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on (pp. 105-110). IEEE.
- [20] Weede, O., Dittrich, F., Worn, H., Jensen, B., Knoll, A., Wilhelm, D., ... & Feussner, H. (2012, December). Workflow analysis and surgical phase recognition in minimally invasive surgery. In Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on (pp. 1080-1074). IEEE.
- [21] Staub, C., Lenz, C., Panin, G., Knoll, A., & Bauernschmitt, R. (2010, September). Contour-based surgical instrument tracking supported by kinematic prediction. In Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on (pp. 746-752). IEEE.
- [22] Staub, C., Knoll, A., Osa, T., & Bauernschmitt, R. (2010, March). Autonomous high precision positioning of surgical instruments in robot-assisted minimally invasive surgery under visual guidance. In Autonomic and Autonomous Systems (ICAS), 2010 Sixth International Conference on (pp. 64-69). IEEE.
- [23] Staub, C., Lenz, C., Jensen, B., Can, S., Knoll, A., & Bauernschmitt, R. (2012, October). Micro camera augmented endoscopic instruments: Towards superhuman performance in remote surgical cutting. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 2000-2006). IEEE.