

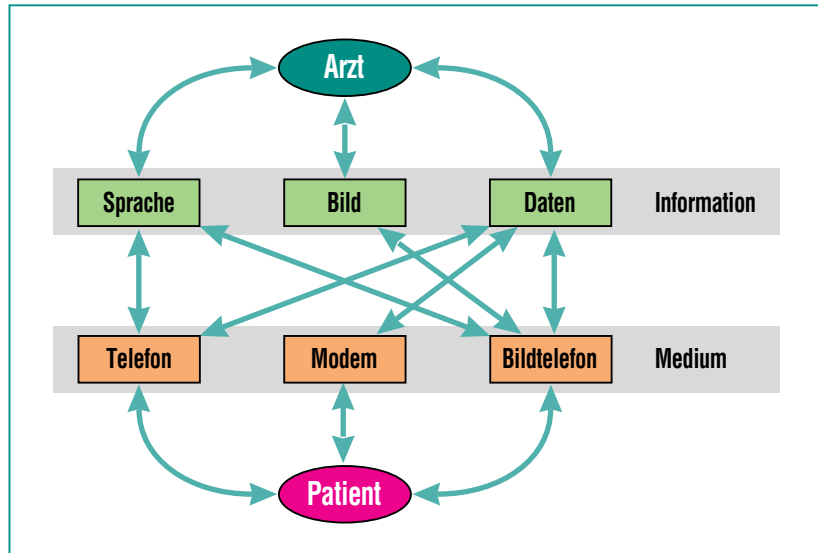
# Teletechniken und chirurgische Robotik

U. Voges, E. Holler, IAI

## Einleitung

Verschiedene Teletechniken finden derzeit in Form von Telepräsenzsystemen ihren Weg in die Medizin. Hierzu sind die Telemedizin, das Telemonitoring, das Teleconsulting, das Teleteaching, die Teleplanung und die Teleoperation zu zählen. Diese einzelnen Anwendungsbeispiele innerhalb der Telepräsenzsysteme stellen z. T. recht unterschiedliche Funktionen dar und benutzen verschiedenartige Techniken (vgl. Tabelle 1).

Unter Telemedizin wird i.a. die Kommunikation und der Informationsfluss zwischen Arzt und Patient über eine größere Entfernung unter Verwendung elektronischer Übertragungsmedien verstanden (vgl. Abbildung 1). Hierzu sind einerseits die Überwachung des Patienten daheim zu zählen wie auch die Abhaltung von Sprechstunden. Letzteres ist z. B. eine Anwendung, die in dünnbesiedelten Lebensräumen sehr wichtig ist, da auf diese Weise eine lange Anreise zum Arzt (oder des Arztes) auf wichtige Notfälle eingeschränkt werden kann bzw. auch



**Abb. 1: Telemedizin: Verbindung zwischen Arzt und Patient über verschiedene Medien.**

in Notfällen bereits eine Vordiagnose gestellt werden kann. Im einfachsten Fall ist eine Bildtelefonanlage eine ausreichende Telekommunikationseinrichtung für die Telemedizin, aber auch die Einbeziehung von Daten und Bildern (z.B. Röntgenbild) in die Übertragung über ein Modem u.ä. kann mit dazu gehören.

Bei Telemonitoring haben wir meist nur eine Informationsrichtung: Daten über den Zustand

des Patienten werden zum überwachenden Arzt übertragen. Tritt ein kritischer Zustand ein, so wird i.a. das Betreuungspersonal alarmiert und besucht den Patienten. In der Regel wird die Informationsabfrage eine periodische Aktivität sein (z.B. jede Stunde, einmal pro Tag), die jeweils für einen definierten Zeitraum läuft.

Das Teleconsulting bezeichnet die Hinzuziehung eines weiteren Arztes zur Diagnose und ggf.

	Sprache	Daten	Bild <1 Bild/s	Bild bidirektional <1 Bild/s	Video >5 Bild/s	Video bidirektional >5 Bild/s	Steuerungs- information	Steuerungs- information bidirektional
Telemedizin	ja	ja	ja	ggf.	ggf.	nein	nein	nein
Telemonitoring	ggf.	ja	ggf.	nein	ggf.	nein	ggf.	nein
Teleconsulting	ja	ja	ja	ja	ja	ggf.	ggf.	nein
Teleteaching	ja	ggf.	nein	nein	ja	ja	ja	ggf.
Teleplanung	nein	ggf.	ja	nein	ja	nein	ggf.	nein
Teleoperation	ja	ggf.	nein	nein	ja	ja	ja	ja

**Tab. 1: Teletechniken und dafür verwendete Kommunikationseinrichtungen.**

auch zur Therapie unter Nutzung von Telekommunikationseinrichtungen („second opinion“). Dabei ist Voraussetzung, dass nicht nur die verbale Kommunikation zwischen den Ärzten möglich ist, sondern zusätzlich z.B. Bildinformation ausgetauscht und idealerweise über Zeigefunktion verfügt werden kann, die auch auf der Gegenseite gesehen werden kann. So kann der beratende Arzt auf kritische Bereiche hinweisen oder Grenzen eines zu entfernenden Tumors angeben.

Unter Teleteaching verstehen wir die Möglichkeit, dass entweder der „Lehrer“ über eine Telekommunikationseinrichtung mit dem „Schüler“ verbunden und diesen bei einer Operationsdurchführung oder -planung beaufsichtigt, oder dass mehrere „Schüler“ einen „Lehrer“ bei der Operation beobachten können und auch interaktiv Fragen stellen können. Neben der Videobildübertragung ist die Übertragung von Steuerinformation von Bedeutung, um so nicht nur verbal eingreifen zu können, sondern den Schüler aktiv „bei der Hand“ zu nehmen.

Die Teleplanung beinhaltet die Planung einer Operation auf der Basis präoperativ gewonnener Informationen, wobei der Tele-Aspekt durch eine Form des Teleconsulting oder Teleteaching auftritt. Wird für die eigentliche Operation eine Telemanipulationseinrichtung verwendet (s.u.), so kann unter Verwendung von Techniken der virtuellen Realität die Operation mit einer Telemanipulationseinrichtung trainiert und geplant werden.

Die Teleoperation oder auch Telechirurgie ist die mit Hilfe einer Telemanipulationseinrichtung, also eines Master-/Slave-Systems, durchgeführte Operation. Die Entfernung zwischen dem chirurgischen Arbeitsplatz mit der Eingabeeinheit (Master) und der Arbeitseinheit (Slave) kann dabei variabel sein: in der Regel werden beide Einheiten im selben Operationssaal untergebracht sein, ggf. die Bedieneinheit auch in einem zentralen Kontrollraum. Nur selten wird die technisch machbare Distanz ausgereizt. Die durch Signalkonvertierung, -Komprimierung, -Dekomprimierung und -Übertragung auftretenden Zeitverzögerungen von u. U. mehr als 200 Millisekunden lassen aber keine wahre Echtzeitoperation mehr zu. Das Führen eines Skalpells über eine derartige Entfernung führt zu nicht vertretbaren Risiken.

Neben der Telemanipulation ist auch der Einsatz eines Roboters für die Chirurgie möglich: vor der Operation wird eine genaue Planung der von einem Roboter vorzunehmenden Arbeitsschritte durchgeführt und in ein Roboterprogramm umgesetzt. Zu Beginn der Operation wird der Roboter kalibriert und in die vorgegebene Startposition gebracht; unter Kontrolle des Chirurgen verrichtet der Roboter seine Arbeit. Der Chirurg kann keine Änderungen und Eingriffe in den Ablauf vornehmen, sondern nur einen Abbruch veranlassen, wenn wider Erwarten ein Problem auftaucht. Änderungen müssen in einem gesonderten Schritt wieder einprogrammiert werden. Häufig wird im normalen Sprachge-

brauch keine saubere Trennung zwischen Telemanipulationssystem und Roboter getroffen. Während der Roboter nur eine vorher definierte Aufgabe durchführen kann, die er ohne menschlichen Eingriff abarbeitet, ist bei einem Telemanipulationssystem der Mensch der Handelnde, der den Manipulator führt. Die Hand des Operateurs beschreibt eine Bewegung, die vom Manipulator unmittelbar nachvollzogen wird. In der medizinischen Anwendung wird in der Regel oft von einem Roboter gesprochen, auch wenn in den meisten Fällen der Chirurg über den chirurgischen Arbeitsplatz den Manipulator steuert.

Telechirurgie ist ein medienwirksamer Begriff, der von Beginn an mit dem Einsatz der Roboter-Technologie in der Chirurgie verknüpft wurde: hier wird eine Fiktion vermittelt, die suggeriert, dass künftig die chirurgische Versorgung von Patienten auch ohne Anwesenheit eines Chirurgen vor Ort möglich sein wird.

Im Zuge des ARTEMIS-Projekts des Forschungszentrums Karlsruhe wurde nicht nur die technische Machbarkeit chirurgischer Assistenz-Robotik-Systeme demonstriert, es wurden auch Untersuchungen zur Anwendung der Teletechniken bei der Realisierung derartiger Systeme und zur Anwendbarkeit der Telechirurgie angestellt. Über die Ergebnisse der ARTEMIS-Arbeiten zu den Möglichkeiten und Grenzen der Telechirurgie in unterschiedlichen Ausprägungen wird im folgenden berichtet.

## Vor- und Nachteile

Die Vorteile bei den meisten Tele-techniken im Bereich der Medizin liegen auf Seiten des Patienten. So ist es bei der Telemedizin möglich, den Kontakt zwischen Arzt und Patienten nicht nur über das Telefon zu haben, sondern auch gewisse Vitaldaten oder Bilder des Patienten an den Arzt zu übermitteln, der dann die entsprechende Diagnose stellen und die Therapie bestimmen kann. Z.T. wird die Telemedizin sogar über das Internet abgewickelt, d.h. Arzt und Patient kommunizieren nur über email miteinander. Dies ist sicher für Notfälle nicht anwendbar, stellt aber für nicht zeitkritische Fragen eine Möglichkeit dar, zeiteffizient ohne simultane Anwesenheit beider Parteien zu kommunizieren.

Der Vorteil des Teleconsulting liegt darin, dass der Patient nicht zum Spezialisten gebracht werden muss; dies reduziert bei schweren Verletzungen das Risiko für den Patienten erheblich. Die erforderliche Information erhält der Spezialist vielmehr über die Kommunikationseinrichtung und kann so eine Diagnose stellen, die von dem Arzt beim Patienten in die entsprechende Therapie umgesetzt werden kann.

Die Telechirurgie schließlich ermöglicht es dem Chirurgen, unter Einsatz einer Telemanipulations-einrichtung exakt und sicher zu arbeiten und ggf. chirurgische Eingriffe patientenschonend vorzunehmen.

Auch unter sozio-ökonomischen Aspekten erscheint die Anwen-

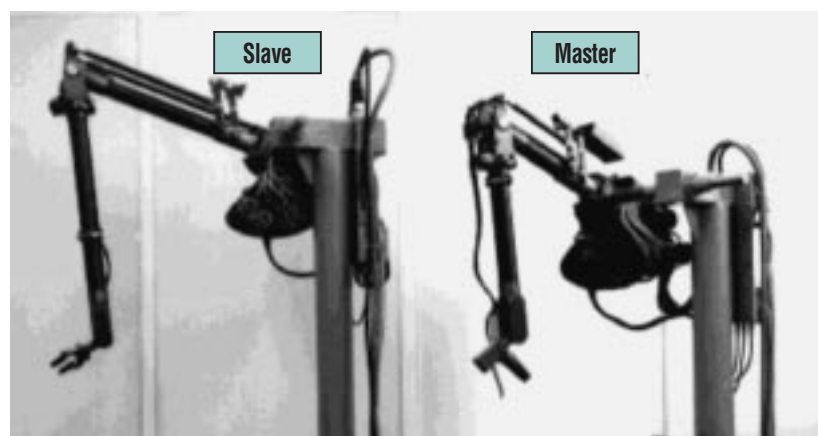
dung von Teletechniken in den meisten Fällen als vorteilhaft. Zeit- und Geld-Aufwand für die Fahrten zum Arzt können entfallen bzw. reduziert werden, die Behandlung kann eher einsetzen, der Patient kann schneller gesunden und in den Arbeitsprozess reintegriert werden.

Der Einsatz von Teletechniken erfordert andererseits ein Umdenken und auch ein Einarbeiten in diese Techniken. Der Arzt muss sich ein entsprechendes technisches Verständnis aneignen, im Operationssaal ist nicht nur medizinisches Personal, sondern auch technisches Personal erforderlich. Dabei ist jedoch eine Akzeptanzschwelle zu überwinden, wenn der Kontakt zwischen Arzt und Patienten nicht mehr direkt, sondern nur über Telekommunikationseinrichtungen erfolgt. Ebenso kann eine psychologische Hemmschwelle auftreten, wenn nicht mehr der Arzt, sondern ein Roboter bzw. ein Telemanipulator am Operationstisch steht und den Eingriff vornehmen soll. Dem Patienten muss einerseits verständlich gemacht wer-

den, welche Vorteile für ihn mit dem Einsatz einer solchen Technik verbunden sind, und andererseits muss er darauf vertrauen können, dass trotz Maschine auch ein Arzt am Operationstisch zugegen ist.

## Technische Randbedingungen

Normalerweise wird zur Steuerung von Manipulatoren, wie in Abbildung 2 für einen Industriemanipulator gezeigt, ein sogenannter Master-Manipulator eingesetzt. An der Silhouettendarstellung erkennt man, dass der Master als Bedieneinheit mit dem Slave (Arbeitsarm) kinematisch übereinstimmt. Jede Bewegung, die am Master vorgeben wird, wird vom Slave nachvollzogen, d. h. wir haben in diesem Fall eine 1:1 Abbildung der Gelenkbewegung. Auf diese Weise wird sich jedoch nur in Ausnahmefällen ein intuitives und ergonomisches Arbeiten, wie es für die minimal invasive Chirurgie gewünscht wird, ermöglichen lassen. Z. B. zeigt die Geschicklichkeit der jüngeren Generation beim Umgang mit



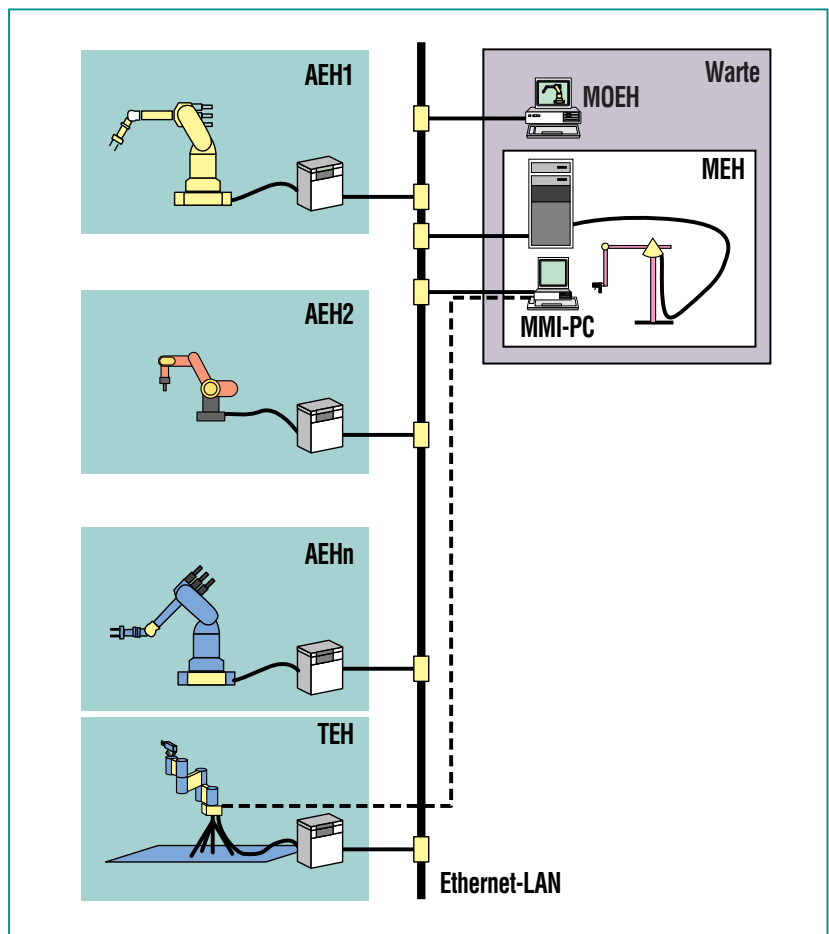
**Abb. 2: Master/Slave-Manipulator-System für industrielle Anwendungen.**

dem Joystick („Nintendo-Generation“), dass intuitives Arbeiten nicht notwendig an eine Ähnlichkeit zwischen Eingabegerät und Arbeitsgerät gekoppelt ist. Bereits Mitte der 80er Jahre hatten vor allem die Amerikaner begonnen, darüber nachzudenken, wie man beim Umgang mit Master/Slave-Manipulatoren mehr in Richtung intuitives Arbeiten kommen könne, und haben das Konzept des sog. Universalmasters geprägt. Dabei entstand ein Gerät, mit dem man im Prinzip unterschiedlichste Arbeitssysteme steuern kann, vom Hubschrauber bis zum Telemanipulator. Das Konzept des Universalmasters basiert darauf, dass über einen Handgriff Position und Orientierung des Effektors des Slavemanipulators oder Arbeitssystems, in unserem Falle des chirurgischen Effektors, präzise vorgegeben werden können. Dies ist bereits mit sehr klein bauenden Geräten, die auf dem Bedienpult untergebracht werden, möglich. Dadurch lassen sich diese Geräte auch in den chirurgischen Arbeitsplatz eines künftigen Operationssystems leicht integrieren. Allerdings erfordert das Universalmaster-Konzept eine höhere Rechenleistung des Steuerungssystems, da Positions- und Orientierungsvorgaben schritthaltend in Realzeit in Koordinaten des Zielsystems umgerechnet werden müssen [1].

Dem Umstand der räumlichen Verteilung eines Telemanipulatorsystems einerseits und der Verschiedenheit der Kinematiken von Arbeitseinheiten und Bedieneinheiten andererseits trägt das im Forschungszentrum Karlsruhe ur-

sprünglich für die konventionelle Telemanipulation entwickelte MONSUN-Steuerungskonzept Rechnung (**Manipulator cONtrol system Using Network technology**) [2]. Wesentliches Merkmal dieser Entwicklung ist, dass die Telemanipulation unter Verwendung standardisierter Schnittstellen über schnelle Kommunikationsmedien, z.B. lokale Netze (LAN) oder Breitbandkommunikationsnetze, z. B. auf ATM-Basis, erfolgt. Abbildung 3 zeigt eine typische MONSUN-Konfiguration, bei der mehrere ver-

teilt und entfernt installierte Arbeitseinheiten (AEH) und eine Video-Überwachungseinheit (TEH) über LAN von einem zentralen Leitstand aus mit einer Master-einheit (MEH) bedient werden können. Die Standardisierung der Schnittstellen umfasst nicht nur die Verwendung von Kommunikationsstandards, sondern regelt auch den Austausch der auf kartesische Koordinatensysteme bezogenen Soll- und Istwerte für die Effektor-Positionierung und -Orientierung. Den verteilten Steuerungskompo-



**Abb. 3: MONSUN-Konfiguration für industrielle Anwendungen: Steuerung mehrerer Manipulatoren/Roboter als Arbeitseinheiten (AEH) und einer Beobachtungseinheit (Trackingeinheit TEH) über eine Warte mit universeller Mastereinheit (MEH) und mit Mensch-Maschine-Interface (MMI) sowie Monitoring-einheit (MOEH).**

nenten obliegt dabei die Berechnung der inversen Kinematik in Realzeit. Ebenfalls in Realzeit sind die aus den Messwerten an den Arbeitseinheiten resultierenden gelenkbezogenen Momente an der Mastereinheit für die Kraftreflexion zu berechnen.

Die Realisierbarkeit der Systemsteuerung als „verteiltes System“ gestattet in Verbindung mit dem Universalmaster grundsätzlich den telechirurgischen Einsatz von Operationsmanipulatoren. Die technischen Grenzen sind dabei jedoch schon eng gesteckt: die bei der Übertragung von multimedialen Informationen und Steuersignalen zwischen Operationsmanipulatoren und chirurgischem Arbeitsplatz (und umgekehrt) zulässigen Übertragungsverzögerungen bewegen sich allenfalls in der Größenordnung von 100 msec, wenn ein präzises, sicheres Arbeiten unter Sichtkontrolle gewährleistet werden soll. Bei Krafrückführung vom Operationsmanipulator auf das Eingabegerät (Master) am chirurgischen Arbeitsplatz dürfen die Totzeiten nur wenige Millisekunden betragen, wenn instabiles Verhalten und damit ein Aufschaukeln der Manipulatorbewegung vermieden werden soll. Damit scheidet die Satellitenübertragung als Kommunikationslösung aus. Wie vom Forschungszentrum Karlsruhe bereits 1994 durchgeführte Experimente ergaben, liegt die Verzögerung audiovisueller Daten bei der Übertragung über Satellit bei über drei Sekunden. Dies zeigt, dass neben den reinen Signallaufzeiten vor allem auch die für die Bilddaten-Kompression und -Dekom-

pression benötigten Zeiten und der Overhead für die Datenpaketvermittlung in die Berechnung der Verzögerungszeiten eingehen. Wie Modellrechnungen ergaben, liegt bei der Übertragung von Videosignalen im PAL-Format, für die bei einem Kompressionsfaktor von 1:18 immer noch ein Bandbreite von 34 Mbit/s benötigt wird, die maximal vertretbare Übertragungsentfernung zwischen 1200 und 3000 km, je nach Leistungsfähigkeit der verwendeten ATM-Vermittlungsknoten und -Signalrepeater [3].

Neben technischen Randbedingungen setzen natürlich ethische und soziologische Aspekte dem Einsatz der Telechirurgie enge Grenzen. Allenfalls in Gebieten extremer medizinischer Unterversorgung oder in stark gefährdeten Gebieten (z.B. Kriegsgebiete, radioaktiv- oder giftgas-verseuchte Gebiete) lässt sich der Teleeinsatz von Chirurgiemanipulatoren z. B. in transportablen Rettungscontainern rechtfertigen.

In der klinischen OP-Umgebung ermöglicht jedoch die Kombination von Teletechniken und chirurgischer Robotik die Schaffung zentraler chirurgischer Arbeitsplätze mit Sichtkontakt zum Patienten. Die nicht zwingend notwendig im sterilen Bereich zu installierenden Steuerkonsolen können so effizient genutzt und variabel zugeordnet werden.

### Anforderungen an Team und Raum

Robotik- und Manipulatorsysteme für den Einsatz in der Chirurgie stellen besondere Anforderungen an die Integration in die

statischen und dynamischen Strukturen der Operationssäle in den Kliniken. Hierzu wurden bereits zahlreiche Konzepte entwickelt, die den gesamten Bereich von Anforderungen, von der Aufrüstung bereits existierender Einrichtungen bis hin zur speziell an die Möglichkeiten und Bedürfnisse des Robotereinsatzes angepassten Neueinrichtung abdecken. Auf einige Anforderungen soll im folgenden eingegangen werden.

Bauliche Voraussetzungen sind neben ausreichend Platz für die schnelle und leichte Ankopplung des Manipulatorsystems an den Operationstisch ggf. auch ein erschütterungsfreier Boden und/oder eine Möglichkeit der Deckenaufhängung. Die Aufstellung der Bedieneinheit muss unter dem Gesichtspunkt erfolgen können, dass bei Bedarf eine direkte Sicht auf den Patienten und das Manipulatorsystem wie auch die sonstigen Informationen (Anästhesiedaten etc.) gegeben ist.

Das OP-Team muss entweder eine spezielle Einführung in die Handhabung der Geräte und die Behebung der während des Betriebs möglicherweise auftretenden Probleme erhalten. Darüber hinaus ist die Anwesenheit eines Technikers erforderlich, damit ein bestimmungsgemäßer Aufbau und Einsatz des Systems erfolgt und auftretende Probleme rechtzeitig richtig erkannt und behoben werden können. Die Interdisziplinarität im OP-Team wird erhöht und das Technik-Verständnis des Chirurgen ist gefordert. Der Chirurg muss sich einem ausgiebigen Training unterzie-

hen, um die sich von der herkömmlichen Operation unterscheidende Bedienung der Mastereinheit bzw. des gesamten Telemanipulationssystems und die zusätzliche Funktionalität zu erlernen. Die Bedieneinheit sollte zwar intuitiv bedienbar sein, aber verschiedene Einstellmöglichkeiten, die sonst nicht gegeben sind (z. B. Selektion des Koordinatensystems, der Skalierung, der Gerätezuordnung), erfordern ein Sich-vertraut-machen, um auch in kritischen Situationen korrekt, sicher und schnell handeln zu können. Dies macht den Bedarf für Simulatoren und Trainer ersichtlich: ähnlich wie bei Flugsimulatoren erscheint es sinnvoll, Trainings- und Simulationssysteme für die Telechirurgie einzusetzen, an denen die Chirurgen fortlaufend geschult werden können.

## ARTEMIS

### Projektdefinition

Im Jahre 1992 wurde als einer der Demonstratoren im Projekt Mikrosystemtechnik mit ARTEMIS (**A**dvanced **R**obotics and **T**elemanipulator System for **M**inimally **I**nvasive **S**urgery) der erste experimentelle Telemanipulator für die minimal invasive Chirurgie definiert. Der Übergang von der herkömmlichen offenen Chirurgie zur minimal invasiven Chirurgie ist zwar für den Patienten mit Vorteilen verbunden (kleinere Wunden, kürzere Genesungszeit, geringere Schmerzen), für den Chirurgen bedeutet es aber eine Reihe von Nachteilen [4]:

- die räumliche Sicht geht verloren, der direkte Blick auf das Operationsgebiet ist nicht mehr möglich,
- die Bewegungsmöglichkeiten sind eingeschränkt, statt mit kurzen Instrumenten und großen Effektoren wird mit langen, starren Instrumenten mit kleinen Effektoren durch kleine Körperöffnungen operiert; die Handhabung der Instrumente ist zunächst ungewohnt und wenig intuitiv; die Effektororientierung ist beschränkt.
- das direkte Arbeiten, Tasten und Fühlen mit den Fingern ist nicht mehr möglich, die Diagnose durch Palpation entfällt.

Gemeinsam mit der Universitätsklinik Tübingen als chirurgischem Partner wurde im Forschungszentrum Karlsruhe in Kooperation von HIT, HVT und IAI ein System entworfen und realisiert, das nicht nur einen Teil dieser Nachteile beseitigen, sondern zusätzlich die Ergonomie bei der Operation verbessern soll. Damit soll die Qualität und die Sicherheit einer Operation erhöht werden, was wiederum dem Patienten zugute kommt. Ziel der Entwicklungen war ein System, das aus einem ergonomischen Chirurgen-Arbeitsplatz, einem 3-D-Endoskop-Führungssystem und flexiblen chirurgischen Instrumenten besteht und nach dem Prinzip eines Telemanipulationssystems aufgebaut ist [5].

Über eine entsprechende Schnittstelle soll auf einem Monitor Information von einem bildgebenden System (z.B. Computertomogra-

fie, Magnetresonanztomografie, Ultraschall) zur Verfügung stehen, die von einem graphischen Simulator aufbereitet ist und zur Planung wie zum Training der Operation genutzt werden kann.

Das Steuerungssystem soll beliebige Verbindungen von Bedieneinheiten und Arbeitseinheiten ermöglichen, wobei Funktionalitäten wie Indexing (d.h. die Positionierung des Bedienerhandgriffs in eine beliebige, ergonomisch günstige Arbeitsposition, ohne dass die Arbeitseinheit bewegt wird) und Skalierung (d.h. die Vergrößerung oder Verkleinerung) von Bewegungen und Kräften Bestandteil sein sollen. Die Kraftreflexion soll ebenfalls Teil des Systems sein, der Bediener soll eine Rückmeldung über die von ihm ausgeübten Kräfte erhalten.

### Demonstrator

1995 konnte die erste Ausbaustufe von ARTEMIS erfolgreich demonstriert werden [6]. Live wurde das zweihändige Arbeiten mit ARTEMIS an einem Darmsegment gezeigt.

Die Struktur von ARTEMIS ist aus Abbildung 4 ersichtlich. Es besteht aus den drei Hauptkomponenten

- Chirurgenarbeitsplatz mit den Bedieneinheiten
- Arbeitssystem mit den Arbeitseinheiten
- Steuerungs- und Kommunikationssystem als verbindender Teil.

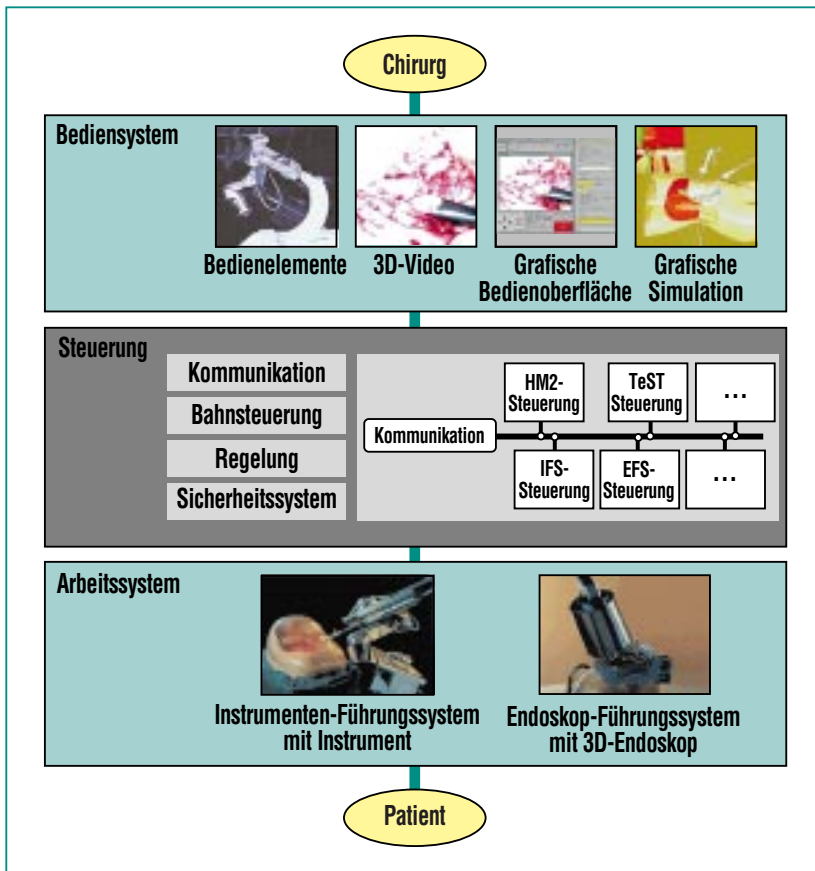


Abb. 4: Schematischer Aufbau von ARTEMIS mit Bediensystem, Steuerung und Arbeitssystem. Die wesentlichen Teilkomponenten des Bediensystems auf Seiten des Chirurgen sind die Bedienelemente (auch Eingabegeräte, Mastermanipulatoren, etc.), das 3-D-Bild des Operationsfeldes, die grafische Bedienoberfläche und die grafische Simulation; die Teilkomponenten des Arbeitssystems auf der Patientenseite sind das Instrumentenführungssystem und das Endoskopführungssystem. Die dazwischenliegende Steuerung beinhaltet neben der Bahnsteuerung und Regelung auch die Kommunikation und das Sicherheitssystem.

### Chirurgenarbeitsplatz

Der Chirurgenarbeitsplatz besteht aus mehreren Bedieneinheiten und Informationseinheiten (vgl. Abbildung 5):

- den Telemanipulator-Bedieneinheiten (Spezialmaster HM2 und Universalmaster TeSt), mit denen der Chirurg die Instrumente steuert
- einem Pedal zur Steuerung des Endoskops
- einem Audiosystem zur alternativen Steuerung des Endoskops
- einem 3-D-Videoschirm für das Endoskopbild



Abb. 5: Experimenteller Aufbau von ARTEMIS mit Chirurgenarbeitsplatz im Vordergrund und Arbeitseinheiten am OP-Tisch im Hintergrund.

- einem grafischen Bedieninterface für die Steuerung des Gesamtsystems sowie für die Information über den Status des Systems
- dem grafischen Simulationssystem KISMET [7] für die Planung und das Training der Operation.

Diese einzelnen Bestandteile des Chirurgenarbeitsplatzes sind in eine Bedienkonsole integriert, die etwas abgesetzt vom Operationstisch aufgestellt ist, aber dem Chirurgen immer noch den direkten Blick auf den Patienten erlaubt.

Insgesamt bietet dieser Aufbau die Möglichkeit, mit verschiedenen Mastern und unterschiedlichen Steuerungsverfahren zu experimentieren, ohne langwierige Umbauten vornehmen zu müssen.

Die Bedienung der Instrumente geschieht über Telemanipulator-Master. Zwei verschiedene Master sind eingesetzt worden:

- HM2, der kinematisch weitgehend identisch mit der Arbeitseinheit TISKA (s.u.) ist, wodurch die intuitive Bedienung unterstützt wird,
- TeSt, einem Universalmaster, der als zusätzliche Funktionalität die Reibungs- und Gewichtskompensation besitzt sowie eine Skalierung und die Indexierung erlaubt, wodurch die ergonomische Bedienung verbessert wird. Weiterhin ist mit TeSt eine Kraftreflexion möglich (die hier allerdings nicht realisiert werden konnte, da auf der Arbeitsseite keine passenden Kraft-Momenten-

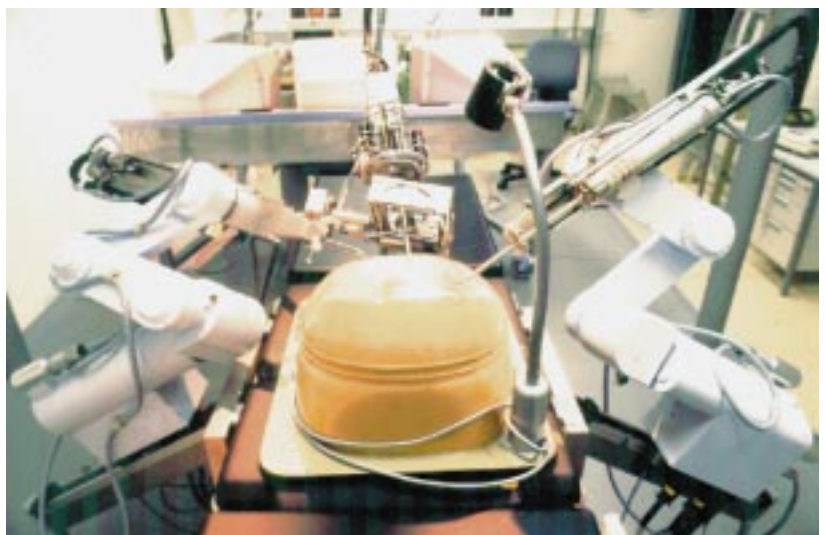
Sensoren eingebaut werden konnten) sowie die Definition von Arbeitsbereichen, die nicht verlassen werden dürfen. Die Grenzen der Arbeitsbereiche sind softwaretechnisch realisiert und führen über die in TeSt eingebauten Motoren zu einer Bewegungsbeschränkung.

Das Endoskop kann über ein Endoskop-Führungssystem per Hand, Fuß oder Sprache bedient werden, oder es kann ein automatisches Tracking eingestellt werden, so dass das Endoskop immer der Instrumentenspitze folgt.

Neben der Darstellung des Operationsfeldes auf dem 3-D-Endoskop-Bildschirm kann auf einer großen Projektionswand zusätzlich entweder auch das 3-D-Endoskopbild gezeigt werden oder ein von einer weiteren Kamera aufgenommenes Umfeldbild.

### Arbeitssystem

Auf der Arbeitsseite von ARTEMIS sind am Operationstisch das **Endoskop-Führungssystem** (EFS) und zwei **Instrumentenführungssysteme** (IFS) installiert (vgl. Abbildung 6). Als Endoskop-Führungssystem wurden wechselweise die beiden im Forschungszentrum entwickelten Systeme FIPS und ROBOX eingesetzt. FIPS konnte mit einer Handsteuerung bedient werden, während für ROBOX zusätzlich noch die Fuß-, die Sprachsteuerung und das Tracking möglich waren. Beide Systeme sind vom mechanischen Aufbau so konzipiert, dass sie den sogenannten Bauchdurchstichpunkt als invarianten Punkt garantieren. In die EFS kann alternativ ein 2-D- oder ein 3-D-Endoskop eingebaut werden. Als Instrumentenführungssysteme wurden zwei identische TISKAs (Trokarhülsen- und Instrumentenführungssystem Karlsruhe) eingesetzt, eine am HIT entwickelte Spezialkinematik



**Abb. 6: Experimenteller Aufbau der ARTEMIS-Arbeitseinheiten am Kunstbauch.**



zur Ankopplung der Trokarhülsen und zur Aufnahme des flexiblen Instruments.

Wie die EFS so garantieren auch die IFS den invarianten Punkt auf mechanische Weise. In die IFS wurden steuerbare, flexible Instrumente eingebaut, mit denen es möglich ist, Organe und Gefäße zu umfahren und die Nadel so zu führen, dass eine ideale Stichrichtung erreicht werden kann. Außerdem kann das Operationsgebiet einfacher erreicht werden. Neben den vier Freiheitsgraden des IFS standen somit zwei weitere des Instruments zur Verfügung (Abwinkelung und Effektorrotation).

#### Steuerungssystem

Das Steuerungssystem stellt den verbindenden Teil zwischen dem Chirurgenarbeitsplatz als Bediensystem und dem Arbeitssystem her. Es besteht aus den Steuerungssystemen für die verschiedenen Master- und Slave-Einheiten des Telemanipulationssystems. Im Rahmen von ARTEMIS wurden zwei verschiedene Steuerungsansätze realisiert. Zum einen wurden TISKA und HM2 über eine kompakte Steuerung miteinander verbunden, die den Anforderungen der direkten Kopplung von kinematisch identischen Master- und Slave-Einheiten genügt. Zum anderen wurde eine offene Steuerung auf der Basis von MONSUN eingebunden, die die Kopplung von TISKA mit dem Spezialmaster HM2 oder einem Universalmaster erlaubt, ebenso wie die Kopplung der Master mit einem Endoskop-Führungssystem.

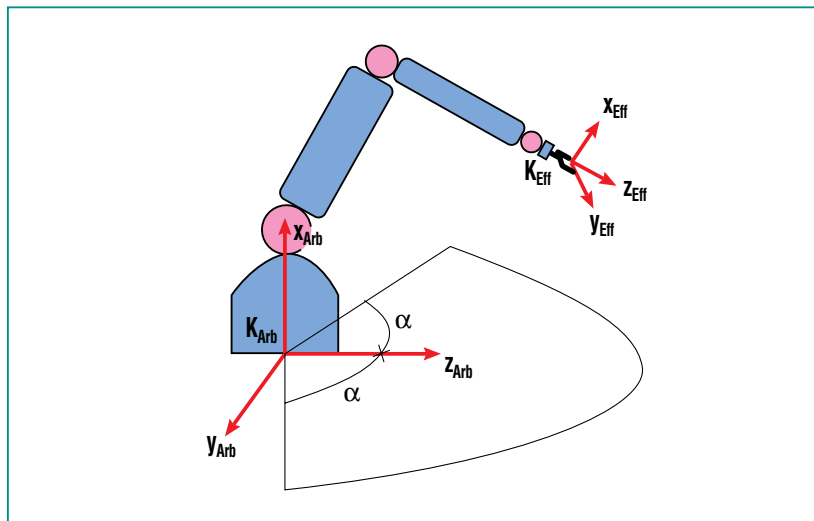
Neben verschiedenen Sicherungsebenen beinhaltet das Steuerungssystem auch die Möglichkeit, auf der Basis von unterschiedlichen Koordinatensystemen zu arbeiten [1]. So kann das Instrument in Bildschirmkoordinaten bewegt werden (Bewegung der Bedieneinheit nach rechts bewirkt, dass sich das Instrument auf dem Bildschirm nach rechts bewegt), in Instrumentenkoordinaten (Bewegung der Bedieneinheit nach rechts bewirkt, dass sich das Instrument bezogen auf sein eigenes Koordinatensystem nach rechts bewegt) oder auch in Weltkoordinaten (Bewegung der Bedieneinheit nach rechts bewirkt, dass sich das Instrument bezogen auf die Weltkoordinaten bzw. den OP-Tisch nach rechts bewegt). Je nach Vorstellungsvermögen und Belieben des Chir-

urgen bzw. nach Einsatzgebiet können hier unterschiedliche Einstellungen sinnvoll sein.

In MONSUN ist eine Reihe von Steuerungsverfahren möglich, wie die Bedienerbewegungen in die Arbeitsbewegung transformiert wird. Bezeichnen wir mit  $K_{\text{Bed}}$  das Koordinatensystem, das seinen Ursprung in der Bedienerhand hat, mit  $K_{\text{Eff}}$  das Koordinatensystem mit dem Ursprung im Effektor des Arbeitssystems, mit  $K_{\text{Arb}}$  das Koordinatensystem mit dem Ursprung im Zentrum der Basis des Arbeitssystems sowie mit  $K_{\text{Kam}}$  das Koordinatensystem in der Endoskopspitze, so können wir die Zuordnung der Steuerungsverfahren, unterschieden für translatorische und rotatorische Bewegungen, folgendermaßen beschreiben (vgl. Tab. 2):

Steuerungsverfahren	translatorische Bewegung des Effektors	rotatorische Bewegung des Effektors
WW	$K_{\text{Arb}}$	$K_{\text{Arb}}$
WJ	$K_{\text{Arb}}$	Map
WT	$K_{\text{Arb}}$	$K_{\text{Eff}}$
SS	$K_{\text{Kam}}$	$K_{\text{Kam}}$
SJ	$K_{\text{Kam}}$	Map
ST	$K_{\text{Kam}}$	$K_{\text{Eff}}$
JJ	Map	Map
TT	$K_{\text{Eff}}$	$K_{\text{Eff}}$

**Tab. 2: Zuordnung der Effektorbewegungen zu verschiedenen Steuerungsverfahren (W: world; S: screen; J: joint; T: tool; K: Koordinatensystem; Arb: Arbeitssystem; Kam: Kamera; Eff: Effektor; Map: Mapping).**



**Abb. 7: Standardisiertes MONSUN Basis-Koordinatensystem  $K_{Arb}$  im Zentrum der Basis von der Arbeitseinheit und Effektorkoordinatensystem  $K_{Eff}$ .**

Die Zuordnung der Koordinatensysteme  $K_{Arb}$  als MONSUN Basis-Koordinatensystem im Zentrum der Arbeitsstation und  $K_{Eff}$  als Koordinatensystem des Effektors ist aus Abbildung 7 ersichtlich.

Die Bewegung von  $K_{Bed}$  wird z. B. bei Steuerungsverfahren WT in eine Bewegung von  $K_{Eff}$  umgesetzt, bei der der Ursprung von  $K_{Eff}$  bezogen auf  $K_{Arb}$  und die Orientierung von  $K_{Eff}$  bezogen auf  $K_{Eff}$  selbst bewegt wird. In der Tabelle 2 bedeutet Map, dass ein direktes Mapping der Gelenke am Handgriff der Bedienstation auf die Gelenke des Effektors an der Arbeitsstation erfolgt. Innerhalb von ARTEMIS ist jedes der acht genannten Steuerungsverfahren, für die die entsprechenden Transformationsberechnungen integriert sind, wählbar.

#### Erweiterungen

In der Folgezeit wurden noch einige Erweiterungen an ARTEMIS vorgenommen. So wurde der Universalmaster TeSt als Bedieneinheit für beide Arbeitseinheiten integriert. Damit ist ein beidhändiges Arbeiten mit dem Spezialmaster HM2 oder dem Universalmaster TeSt möglich. Eine zweite Chirurgenarbeitsplatz wurde eingerichtet, der abgesetzt in einem anderen Raum als das Arbeitssystem aufgestellt wurde, um so den Tele-Aspekt der Telemanipulation augenfälliger demonstrieren zu können.

Weiterhin wurden Erweiterungen zum Tracking gemacht. Bei Einsatz eines mit Sensorik ausgestatteten Endoskop-Führungssystems (z. B. ROBOX oder das um ein Magnetsensorsystem erweiterte FIPS) kann das Endoskop automatisch der Instrumentenspitze folgen, so dass sich diese immer im Bildmittelpunkt befindet [8].

#### Evaluierung

Im Rahmen einer Evaluierung wurde ARTEMIS einer extensiven Testreihe unterzogen [9]. Vier Aufgaben wurden definiert, die chirurgischen Basisaufgaben entsprechen, und zwar Nähen (zwei verschiedene Aufgabenstellungen), Unterfahren und Hochbinden sowie Katheterisierung. Die Aufgaben wurden technisch abstrahiert auf einem rotierenden Testparcour nachgebildet, der die identische Wiederholung der Tests ermöglicht, ohne dass die Trokar- und Kamerapositionen verändert werden mussten. Um die gefährlichen Bereiche zu simulieren, die während einer normalen Operation nicht berührt werden sollten, wurden zusätzlich einige Flächen in elektrisch leitendem Material realisiert, so dass die Berührungen von einem Zähler als Fehler registriert werden konnten.

Zehn Testpersonen mit unterschiedlicher Vorbildung wurden für die Versuche ausgewählt: sowohl Techniker, vorwiegend mit Telemanipulatorerfahrung, als auch Mediziner mit Operationserfahrung in der minimal invasiven Chirurgie.

Insgesamt sechs verschiedene Versuchsszenarien waren zu durchlaufen: neben der herkömmlichen offenen Chirurgie und der minimal invasiven Chirurgie, die zu Vergleichszwecken ohne Telemanipulation durchgeführt wurden, gab es vier Versuchsreihen mit ARTEMIS. Es wurde einerseits mit starren Instrumenten und mit flexiblen Instrumenten gearbeitet, und es

wurde der kinematisch der Arbeitseinheit entsprechende Master HM2 und der Universalmaster TeSt auf der Bedienseite eingesetzt. Damit ergaben sich die folgenden Testszenarien:

- offene Chirurgie
- minimal invasive Chirurgie
- Telemanipulation mit starrem Instrument und Master HM2
- Telemanipulation mit flexiblem Instrument und Master HM2
- Telemanipulation mit starrem Instrument und Master TeSt
- Telemanipulation mit flexiblem Instrument und Master TeSt

Die einzelnen Versuche wurden von den Versuchspersonen in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt, um so u.a. die Aus-

wirkungen des Lerneffektes auszugleichen. Jede Aufgabenstellung wurde mindestens zehn Mal wiederholt, um auch hier den Effekt einer Lernkurve weitgehend auszuschließen. Somit wurden insgesamt über 2.400 Versuche (10 Testpersonen, 10 Versuche, 4 Aufgaben, 6 Randbedingungen) im Laufe eines Jahres bearbeitet, davon 2/3 mit ARTEMIS.

Vor der Versuchsserie wurden die Testpersonen mit den Tests, dem ARTEMIS-System und den einzelnen Aufgabenstellungen vertraut gemacht. Während der Versuche wurden unterschiedliche Informationen gesammelt: die Zeit, die der Proband für die jeweilige Aufgabenstellung benötigte, und die Zahl der gemachten Fehler (Berührung der gefährlichen Bereiche) wurden protokolliert. Ebenso wurden Kommentare, die der Proband während der Versuche äußerte, sowie Probleme

mit dem System vom Protokollanten erfasst. Nach Abschluss der Versuchsserie konnte der Proband eine persönliche Bewertung über seine Versuche und die Randbedingungen abgeben.

Die Auswertung der Versuchsprotokolle ergab u.a. die folgenden Ergebnisse: Ein Vergleich der Zeit-Mittelwerte für die einzelnen Randbedingungen bei den verschiedenen Testpersonen zeigte gewisse Ähnlichkeiten auf (s. Abbildung 8). D.h. der relative Vergleich zwischen den einzelnen Testbedingungen ist unabhängig von der Aufgabenstellung.

Wie zu erwarten war, ist die offene Chirurgie die schnellste, gefolgt von der minimal invasiven Chirurgie, die etwa viermal langsamer ist. Die vier Telemanipulatorszenarien sind im Vergleich dazu erwartungsgemäß noch einmal um den Faktor 3-4 langsamer. Eine

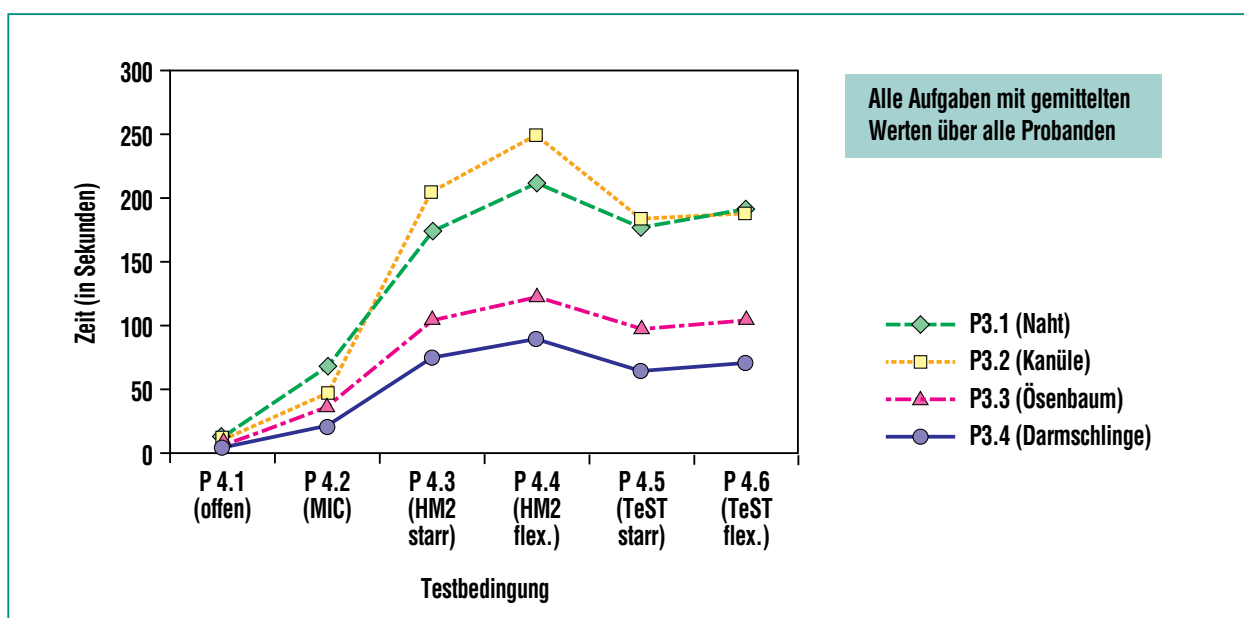


Abb. 8: Mittlere Ausführungszeiten für verschiedene Aufgaben (P3.i) und unter verschiedenen Testbedingungen (P4.i).

detailliertere Zeitanalyse ergab, dass ein erheblicher Anteil an dieser Mehrzeit auf das Konto des Effektors geht, der bei dem Versuchsaufbau aus verschiedenen Gründen sehr langsam zu öffnen und zu schließen war. Bereinigt man diese Zeiten entsprechend, so sind die Telemanipulatorversuche nur noch etwa um den Faktor 2 langsamer als die MIC-Versuche. Die vier Telemanipulator-szenarien lagen relativ dicht beieinander, wobei die Handhabung der starren Instrumente etwas schneller ging und der Universalmaster leichte Vorteile gegenüber dem Spezialmaster zeigte.

Die größten Unterschiede zwischen den einzelnen Testpersonen zeigten sich bei Verwendung des Universalmasters TeSt mit flexiblen Instrumenten: einige Testpersonen konnten wesentlich sicherer und schneller damit

arbeiten als mit dem starren Instrument, bei anderen war es umgekehrt.

Bei der Analyse der Fehler zeigte sich ein etwas anderes Bild. Zwar war wiederum die offene Chirurgie am fehlerärmsten, da hier mit kurzen Instrumenten und direkter Sicht sehr sicher gearbeitet werden kann, aber die minimal invasive Chirurgie schnitt schlechter ab als die telemanipulatorunterstützte Chirurgie mit starren Instrumenten (vgl. Abbildung 9). Dies lag z. T. an den Techniker-Versuchspersonen, die mit der minimal invasiven Chirurgie noch nicht vertraut waren, aber wohl auch an der einfacheren Handhabung der telemanipulatorgeführten Instrumente. Während bei der MIC die langen starren Instrumente nicht intuitiv zu bedienen sind, wird bei der Telemanipulation mit ARTEMIS das Instrument

an der Spitze geführt und kann damit viel zielsicherer geführt werden als lange starre Instrumente, die sich um den Einstichpunkt drehen. Die Handhabung des flexiblen Instruments resultierte in einer höheren Fehlerzahl, was sich z.T. mit der schlechteren Kontrolle der Abwinkelung erklären lässt: das starre Instrument berührt weniger leicht die kritischen Bereiche, während man mit dem abgewinkelten flexiblen Instrument schon leichter anstößt.

Nicht nur bei der Analyse der Zeit- und Fehlerprotokolle zeigte sich, dass der Universalmaster etwas besser lag als der Spezialmaster, sondern auch in der persönlichen Beurteilung wurde der Universalmaster besser bewertet (vgl. Tabelle 3). Die Vorteile von HM2 lagen zwar in der mehr intuitiven Bedienung, d.h. durch die

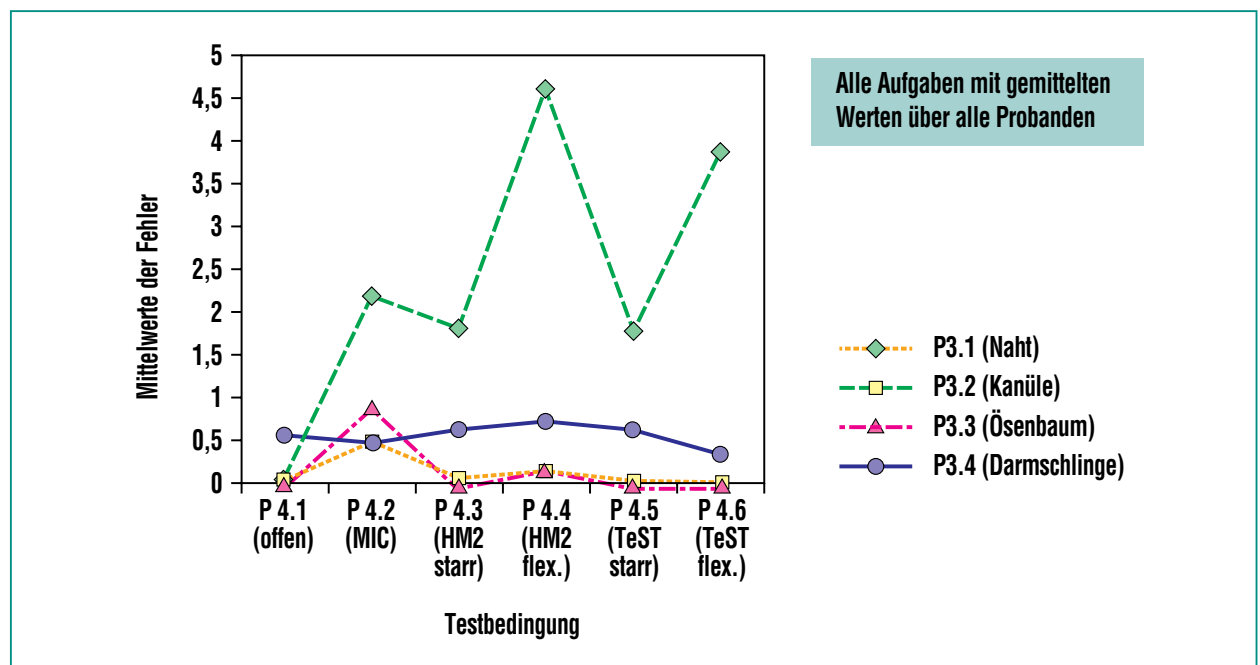


Abb. 9: Mittlere Fehlerzahlen für verschiedene Aufgaben (P3.i) und unter verschiedenen Testbedingungen (P4.i).

	HM2	TeSt
Intuitives Arbeiten	+	-
Hand-/Arm-Position	-	+
Gewichtskompensation	-	+
Handgriff	-	+
Ermüdung	-	+

**Tab. 3: Subjektive qualitative Bewertung von Spezialmaster HM2 und Universalmaster TeSt.**

kinematische Ähnlichkeit von Master und Slave wusste der Bediener aufgrund seiner eigenen Handstellung auch die Stellung und Abwinklung des flexiblen Instruments, aber der Universalmaster TeSt besitzt einen Gewichtsausgleich, war dadurch leichter zu bedienen, und die bisweilen bei HM2 erforderliche unergonomische Hand-/Arm-Haltung konnte vermieden werden, da durch das Indexing immer eine ergonomisch günstige Position ausgewählt werden konnte (allerdings unter Zeitverlust). So konnte mit TeSt auch ermüdungsfreier gearbeitet werden.

Allgemein wurde die offene Chirurgie als die einfachste Testbedingung beurteilt, da hier eine direkte Sicht vorlag, also sowohl räumliches 3-D-Sehen möglich war als auch der Blick auf die Hände und nicht auf den Bildschirm gerichtet war. Außerdem wurde mit kurzen, leicht zu handhabbaren Instrumenten gearbeitet. Das Arbeiten mit dem Univer-

salmaster TeSt und flexiblen Instrumenten wurde als leichter und besser erachtet als die normale MIC, Master HM2 mit flexiblem Instrument folgte in der Skala, und die Telemanipulation mit den starren Instrumenten und TeSt sowie HM2 rangierten an letzter Stelle.

Die Aufgabenstellung, bei der die meisten Fehler gemacht wurden, war die Naht-Aufgabe, während die wenigsten Fehler bei der Kanülen-Aufgabe auftraten. Die meiste Zeit wurde für die Kanülen-Aufgabe, die wenigste für die Darmumschlingung benötigt. Unter den Telemanipulationsbedingungen schnitt die Kombination Universalmaster TeSt mit starrem Instrument bzgl. Zeit und Fehlerzahl am besten ab, während die Kombination HM2 und flexibles Instrument am schlechtesten lagen.

Es hat sich somit gezeigt, dass der Universalmaster TeSt etwas besser war als der Spezialmaster HM2, und dass die starren Instru-

mente einfacher zu handhaben waren als die flexiblen. Die Telemanipulation führte zu einer besseren Ergonomie bei der Operation. Insgesamt gab es aber einige Unterschiede zwischen den gemessenen Werten (Zeit, Fehler) und der persönlichen Bewertung (u.a. Stress, Ergonomie).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Durchführung dieser umfangreichen Testserie gezeigt hat, dass die Telemanipulation in der minimal invasiven Chirurgie einsetzbar ist, dass einige der Konzepte, die innerhalb von ARTEMIS realisiert worden sind, ihre Bewährungsprobe bestanden haben, Stärken und Schwächen sichtbar wurden, und dass eine Weiterentwicklung mit einer stärkeren Ausrichtung auf die Einsatzgebiete sinnvoll und notwendig erscheint.

### Weitere Systeme

ROBODOC von Integrated Surgical Systems, USA, ist 1992 vorgestellt worden. Mit ROBODOC wird im Rahmen einer Hüftoperation der Oberschenkel ausgefräst, um eine vorher selektierte Prothese aufzunehmen. Dieses System beinhaltet neben dem eigentlichen Roboter auch ein Planungssystem, mit dem die entsprechende Prothese ausgewählt und die Lage der Prothese berechnet wird. Mit ROBODOC sind bislang über 4000 Operationen erfolgt, die meisten davon in Deutschland. Während in den Anfängen jeweils in einer ersten Operation der Oberschenkelknochen mit Schrauben markiert werden musste, um eine exakte Vorberechnung wie auch eine on-

line Überwachung während der eigentlichen Roboter-Fräsarbeiten zu ermöglichen, wird in dem neuen System auf diese Markierung verzichtet, was u. a. zu einer geringeren Belastung für den Patienten führt.

CASPAR von ortoMaquet ist ein in Deutschland seit 1996 entwickeltes System, das in der Aufgabenstellung und der Funktionalität weitgehend dem ROBODOC-System entspricht. Neben der Hüftgelenksoperation zählt inzwischen auch die Kniegelenkoperation zum Zielgebiet für CASPAR.

DaVinci von Intuitive Surgical, USA, ist ein für die Herzchirurgie entwickeltes Telemanipulationssystem, dessen Entwicklung 1995 begann und das seit 1999 die ersten klinischen Einsätze in Deutschland hat und inzwischen nach Leipzig auch in Berlin, Dresden, Frankfurt und München sowie weltweit an sechs weiteren Orten installiert ist und benutzt wird. Mit diesem System werden u.a. Herzklappenoperationen und Bypass-Operationen durchgeführt, aber auch allgemeinchirurgische Operationen. Der Chirurg sitzt an einer maximal 8 m abgesetzten Konsole, hat über Bildschirme ein 3-D-Bild vom Operationsgebiet und kann über zwei Eingabegeräte zwei flexible Instrumente bedienen. DaVinci ist ein geschlossenes, integriertes System, das nur in seiner Gesamtheit genutzt werden kann.

Im Gegensatz dazu ist ZEUS von Computer Motion, USA, zu sehen. Dieses System besteht aus mehreren Komponenten, die z. T.

auch einzeln einsetzbar sind. So ist das Endoskop-Führungssystem AESOP, das 1994 auf den Markt kam, ein eigenständiges System, das auch in der normalen minimal invasiven Chirurgie schon seit längerer Zeit eingesetzt wird. Über 70.000 Operationen wurden bereits unter Verwendung von AESOP weltweit durchgeführt. Mit ZEUS kommt die Instrumentenführung dazu: zwei modulare Systeme, die auf Instrumentenführung ausgelegt und überarbeitete AESOP-Systeme sind, mit entsprechendem Bedieninterface ergänzen das Endoskopführungssystem. 1999 waren mehr als sieben derartiger ZEUS-Systeme weltweit im Einsatz, und zwar für unterschiedlichste Anwendungsbereiche: von Gynäkologie bis Herzchirurgie. Ergänzt wird ZEUS durch HERMES, ein OP-Bedienkonzept, bei dem alle im OP verfügbaren Geräte und Systeme (u.a. OP-Tisch, Beleuchtung, HF-Koagulation, Insufflator, Videokonferenzsystem) über eine Sprachsteuerung bedient und gesteuert werden können.

In dieser Aufzählung stellen die Systeme ROBODOC und CASPAR reine Roboterlösungen dar, während daVinci und ZEUS wie ARTEMIS Telemanipulationssysteme sind.

ARTEMIS war 1995 das erste Telemanipulationssystem für die minimal invasive Chirurgie, das in der Öffentlichkeit vorgestellt wurde und eine umfassende Funktionalität anbot. Mitarbeiter von ortoMaquet, Intuitive Surgical und Computer Motion zählten neben etlichen weiteren Firmen zu den

zahlreichen Besuchern von ARTEMIS, bevor sie mit eigenen Systemen an die Öffentlichkeit traten. Leider hat sich aber die deutsche Industrie nicht bereit gefunden, innovations- und risikobereit in die Umsetzung von ARTEMIS in ein vermarktbares Produkt einzusteigen. Dies ist umso bedauerlicher, als selbst die US-amerikanischen Firmen sich Deutschland als erstes Einsatzgebiet für ihre Systeme ausgesucht haben, was sicherlich nicht nur an der gegenüber der amerikanischen FDA-Genehmigung leichter zu erhaltenden europäischen CE-Genehmigung liegt. Vielleicht ist es uns daher zumindest gelungen, durch ARTEMIS, die umfangreichen Publikationen darüber sowie die zahllosen Besucher-Demonstrationen bei den Ärzten und Patienten den Weg für derartige Systeme zu bereiten.

### Zukünftige Ausrichtung

Die Entwicklung des Demonstrators ARTEMIS und seine langjährige Erprobung wie auch die inzwischen eingesetzten kommerziellen chirurgischen Telemanipulatoren und Roboter haben gezeigt, dass durch den Einsatz von Teletechniken im Operationssaal eine Reihe von Vorteilen erzielt werden können. Dazu zählen

- die bessere Bildqualität durch den Einsatz von Endoskop-Führungssystemen
- die bessere Operationsqualität durch die exaktere Instrumentenführung mit Hilfe der Telemanipulationssysteme

- die bessere Operationsqualität durch eine ermüdungsfreiere, ergonomischere Arbeitshaltung
- die bessere Operationsqualität durch die Integration eines 3-D-Sichtsystems.

Aber es bleiben noch weitere wichtige Ziele für die künftigen Entwicklungen:

- ein modularer und flexibler Systemaufbau
- flexible und leichter wechselbare Instrumente bzw. Multifunktionsinstrumente
- bedarfsorientierte Anpassung an die Erfordernisse der Telechirurgie
- vielseitige Einsatzmöglichkeit in allen relevanten chirurgischen Disziplinen.

Die Modularität des Systems wird sich nicht nur auf die Mechanik-Komponenten beziehen, sondern auch im Software-Aufbau niederschlagen. So wird unter Einsatz von MoMo [10], einer verteilten, objektorientierten Realzeitarchitektur, diese Modularität in dem Softwaresystem umgesetzt. Multi-Agenten-Systeme werden software- und hardwaremäßig realisiert, ebenso eine offene Systemstruktur, die in Analogie zu MONSUN die Integration von unterschiedli-

chen Master- und Slave-Systemen zulässt. Neben der eigentlichen Telemanipulation werden auch weitere Teletechniken in das Telepräsenzsystem eingebunden, so dass u.a. auch Teleconsulting und Teleplanung unterstützt werden. Die Anwendbarkeit in unterschiedlichen Disziplinen ist weiterhin eine Voraussetzung für eine wirtschaftliche Akzeptanz eines solchen Systems.

Der Einsatz von Teletechniken in der Chirurgie wird immer weitere Kreise ziehen. Nicht in allen Bereichen, in denen der Einsatz erprobt wird, wird er sich auch etablieren. Oft wird es nur eine Operation geben (nach dem Motto der Presseinformationen: „Chirurg A hat als erster die Operation B mit Hilfe des Robotiksystems C durchgeführt.“ Nachfolger gibt es nicht, da die Durchführung einer derartigen Operation B mit einem Robotiksystem eher Nachteile als Vorteile bringt) oder noch eine lange Zeit dauern, bis sich derartige Operationen durchsetzen. Einige Kliniken werden in den nächsten Jahren noch die Vorreiter sein müssen und die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der Telechirurgie ergründen. Bis zu einem flächendeckenden Einsatz derartiger Systeme wird es wohl noch zehn Jahre dauern. Nicht nur der Preis (oft über 1 Mill. DM) ist ein Hinderungsgrund, sondern auch die Funktionalität gilt es noch zu verbessern.

## Danksagung

An der Definition, Herstellung und Erprobung von ARTEMIS haben neben Kollegen vom Institut für Angewandte Informatik auch Mitarbeiter von der Hauptabteilung Ingenieurtechnik (jetzt Institut für Medizintechnik und Biophysik), der Hauptabteilung Versuchstechnik sowie der Universitätsklinik Tübingen mitgewirkt, denen allen ein entsprechender Dank gebührt.

## Literatur

- [1] H. Breitwieser;  
*IARP 2nd Workshop on Medical Robotics.*  
Forschungszentrum Karlsruhe,  
1997, S. 175-189.
- [2] E. Holler, W. Weber;  
*1st IARP Workshop on Micro Robotics and Systems,*  
Karlsruhe, June 15-16, 1993,  
Proc. S. 111-120,  
Karlsruhe: KfK, 1993.
- [3] I. Stolte;  
*Diplomarbeit Universität Hildesheim,* 1996.
- [4] U. Voges, M. Schmitt;  
*Kernforschungszentrum Karlsruhe* 1994.
- [5] E. Holler, M. Englert, B. Neisius,  
R. Trapp;  
*KI 3/1994,* S. 33-41.
- [6] U. Voges, P. Dautzenberg,  
U. Kühnapfel, B. Neisius,  
M. Schmitt, R. Trapp, T. Vollmer;  
*2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik,*  
Karlsruhe, 28.-29. November  
1995.  
*Wissenschaftliche Berichte,*  
*FZKA-5670 (November 1995)*  
S.106-111.
- [7] U. Kühnapfel, C. Kuhn,  
M. Hübner, H. Krumm,  
B. Neisius;  
*Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe,* 28 (1996)  
S.117-123.
- [8] H. Breitwieser, R. Oberle;  
*IARP 2nd Workshop on Medical Robotics.*  
Forschungszentrum Karlsruhe,  
1997, S. 165-174.
- [9] U. Voges, E. Holler, B. Neisius,  
M. Schurr, T. Vollmer;  
*IARP 2nd Workshop on Medical Robotics,*  
Forschungszentrum Karlsruhe,  
1997, S.137-48.
- [10] S. Hepper, R. Oberle;  
*FZKA-6029 (Dezember 1997)*