

Leistungsfähigkeit, Risiken und Vorteile des Einsatzes der Robotik in medizinisch-operativen Disziplinen

Hintergrund

Die interventionellen Disziplinen in der Medizin sind breit gefächert und reichen von der klassischen Allgemeinchirurgie über die Subdisziplinen bis hin zur operativen Endoskopie und Radiologie. So unterschiedlich die einzelnen medizinisch-operativen Bereiche sind, ist dennoch in allen Disziplinen der Trend zu immer weniger invasiven Vorgehensweisen erkennbar. Ebenso gilt für alle Anwendungsgebiete, dass heute noch bestehende methodische Grenzen nur durch weitere innovative Technologien überwunden werden können. Neben verbesserten Therapieplanungsmöglichkeiten, der intraoperativen Navigation und innovativen Instrumenten gilt auch der Einsatz der Robotik als vielversprechende Option, um derzeitige Limitationen zu überwinden.

Mit Robotern ist eine unübertroffene Präzision chirurgischer Manipulationen auf kleinstem Raum möglich. Die einzelnen Bewegungsabläufe können mit einer Genauigkeit ausgeführt werden, die rein manuell nie zu erreichen ist, da die Geschwindigkeit beliebig skaliert werden kann und Tremor ausgefiltert wird. Zudem ist eine ausgezeichnete Visualisierung möglich.

Im Gegensatz zum menschlichen Operateur spielen Ermüdungserscheinungen auch bei stundenlangen Eingriffen keine Rolle. Abgesehen davon ergeben sich durch die Verwendung von Robotiksystemen in der Regel erhebliche ergonomische Vorteile für den Chirurgen. Entsprechend hoch waren von Anwenderseite – den Chirurgen – die Erwartungen, die

mit der Einführung dieser neuen Technologie verbunden waren.

Die Bezeichnung „Roboter“ beziehungsweise „Robotik“ wird in der medizinischen Literatur im Allgemeinen recht großzügig verwendet, da sich eine allgemein akzeptierte Definition von medizinischen Robotern bisher noch nicht durchgesetzt hat. Die Definitionen der Robotik nach der VDI-Richtlinie 2860 und dem Robot Institute of America (RIA) beziehen sich auf Industrieroboter und beschreiben Bewegungsautomaten beziehungsweise Mehrzweckhandhabungsgeräte, die für das Bewegen und den Einsatz unterschiedlicher Objekte geeignet sind. Die kennzeichnenden Merkmale sind somit die freie Programmierbarkeit und die darauffolgende autonome Ausführung der Aktion.

Demgegenüber werden derzeit in der medizinischen Literatur die Begriffe „Roboter“ und „Robotik“ für eine Vielzahl unterschiedlicher mechatronischer Supportsysteme benutzt, die meist diesen Definitionen nicht in allen Punkten entsprechen. Der Übersichtlichkeit halber sollen deshalb die in der Medizin verwendeten Systeme in die folgenden drei Klassen eingeteilt werden:

1. programmierbare Automaten,
2. (teilautonome) Führungs- und Unterstützungssysteme,
3. Master-Slave-Systeme.

Wenn man diese Konzepte in einer erweiterten Roboter-Klassifikation einordnen will, kommt dazu am ehesten die Definition der Japan Robot Association (JARA) in Betracht (<http://www.jara.jp>).

Die sogenannten programmierbaren Automaten entsprechen dem Numerical Control Robot der JARA, während die Master-Slave-Systeme nach dieser Klassifikation den Manual Manipulators entsprechen. Führungs- und Unterstützungssysteme, die zumindest teilautonom sind, würden der Klasse der Intelligent Robots zugeordnet werden können.

Mittlerweile wurden Robotiksysteme fast in allen interventionellen Disziplinen eingesetzt. Es liegen hinreichend Erfahrungen und Ergebnisse vor, um eine erste Bilanzierung des klinischen Einsatzes unter den unterschiedlichen Indikationen vorzunehmen.

Programmierbare Automaten

Eine Vorreiterrolle in der Entwicklung der medizinischen Robotik hatten die Systeme zum hochpräzisen Bohren und Fräsen in der orthopädischen Chirurgie. Die Voraussetzung für den Einsatz dieser meist von Industrierobotern abgeleiteten Operationshilfen sind in der Chirurgie des Binde- und Stützgewebes besonders günstig: Der Knochen ist eine rigide, sehr stabile anatomische Struktur, die sich zudem mit der überall auch intraoperativ verfügbaren Röntgendiagnostik sehr gut darstellen lässt.

Bald war nachgewiesen, dass unterschiedliche Bohr- und Fräsvorgänge tatsächlich mit unübertroffener Genauigkeit ausgeführt werden konnten. Das erste Gerät dieser Klasse war der Robodoc. Robodoc ist ein Schwenkarmroboter, der als modifizierter Industrieroboter eine große Steifigkeit und aus Sicherheits-

Tab. 1 Zusammenstellung der programmierbaren Automaten

System	Institution	Land	Einsatzgebiet
Robodoc	Integrated Surgical System	USA	Orthopädie
Caspar	URS-ortho	Deutschland	Orthopädie
Neuromate	Immi Medical Robots	Frankreich	Neurochirurgie
Evolution 1	Universal Robot Systems	Deutschland	Orthopädie

Tab. 2 Zusammenstellung der Kameraführungssysteme

System	Institution	Land	Einsatzgebiet
AESOP	Computer Motion	USA	Laparoskopie
EndoAssist	Armstrong Healthcare	England	Laparoskopie
LapMan	Medsys	Belgien	Laparoskopie
Freehand	Prosurgics	England	Laparoskopie
ViKY	Endocontrol Medical	Frankreich	Laparoskopie
Naviot	Hitachi	Japan	Laparoskopie

Tab. 3 Zusammenstellung der Master-Slave-Systeme

System	Institution	Land	Einsatzgebiet
Zeus	Computer Motion	USA	Laparoskopie
Laprotek	Endo Via Medical	USA	Minimal-invasive Chirurgie
Acrobot	Acrobot Ltd	England	Orthopädie
DaVinci	Intuitive Surgical	USA	Laparoskopie

gründen eine relativ geringe Verfahrensgeschwindigkeit aufweist. Dieser SCARA (selective compliance assembly robot arm)-Roboter mit sechs Freiheitsgraden besteht aus einem Arm mit zwei horizontal schwenkbaren Segmenten, einer vertikal verschieb- und drehbaren Einheit und an deren Ende zwei weiteren rotatorischen Achsen. Der Arbeitsraum ist prismatisch mit einer Grundfläche ähnlich einem Halbkreisringsektor. Der maximale Radius des Robodoc-Armes beträgt zirka 80 cm, und der minimale Radius wird durch die mögliche Knickung bestimmt [1]. Für diesen computergestützten Fräsroboter steht die Planungseinheit Orthodoc zur Verfügung. Die präoperativ aufgenommenen CT-Daten werden durch das Orthodoc-System bearbeitet, und der geplante Operationsverlauf wird anschließend mit dem Roboter durchgeführt [2].

Bis etwa 2002 kamen weitere Entwicklungen wie etwa der OrthoMaquet hinzu, wie auch der klinische Einsatz breiter wurde (■ **Tab. 1**).

Allerdings gab es von Anfang an auch massive Kritik. Vor allem wurde infrage gestellt, dass die werkzeugmaschinenähnliche Präzision auch biologisch wirklich so vorteilhaft ist, wie es bei einer rein mechanistischen Betrachtung erscheint [3].

Nachdem bereits mehrere tausend Hüften implantiert worden waren, kam es im Jahr 2003 zu heftiger Kritik auch in der Tagespresse, sodass der Einsatz praktisch über Nacht nicht mehr infrage kam. Obwohl sorgfältige Untersuchungen ergaben, dass viele Vorwürfe medizinisch nicht gerechtfertigt waren, werden programmierbare Automaten bis heute, abgesehen von einzelnen wissenschaftlichen Arbeitsgruppen [4], nicht mehr eingesetzt. Dazu hat sicher auch beigetragen, dass eine Überlegenheit der robotergestützten Eingriffe bisher nicht nachgewiesen werden konnte [5].

Ähnliche Arbeitsbedingungen wie in der orthopädischen Chirurgie liegen auch im Bereich der HNO-ärztlichen Chirurgie beziehungsweise der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie und der Neurochirurgie vor. Für diese Disziplinen wurden dedizierte Systeme entwickelt. Für die Neurochirurgie wurde beispielsweise der Neuromate entwickelt. Dieser PUMA- (Knickarm-)Roboter mit sechs Freiheitsgraden wurde verwendet, um eine Biopsienadel zu positionieren, die anschließend durch den Operateur manuell in einer vordefinierten Bahn eingeführt wurde. Das System besteht aus einem Roboterarm und einer PC-basierten Navigationseinheit, die anhand der präoperativ aufgenom-

menen 3D-Daten programmiert werden. Das System muss vor jedem Eingriff kalibriert werden [1, 6, 7].

Für transsphenoidale Eingriffe an der Schädelbasis wurde ein Hexapodsystem verwendet [8].

Keines der Systeme hat einen kommerziellen Erfolg erzielen können. Einschlägige wissenschaftliche Publikationen sind in den letzten Jahren eher selten geworden.

(Teilautonome) Führungs- und Unterstützungssysteme

Bei der Kameraführung in der minimal-invasiven Chirurgie handelt es sich um eine konzentrationszehrende, ermüdende Tätigkeit in unergonomischer Körperhaltung, was ebenso zu einer Beeinträchtigung der Visualisierung des Operationsgebietes führt wie die Tatsache, dass ein Vorgang von zwei Handelnden ausgeführt wird. Zudem scheint, abgesehen von didaktischen Motiven, die Kameraführung durch ärztliches Personal vor dem Hintergrund steigender Eingriffszahlen, des erheblichen Kostendrucks und Ärztemangels unwirtschaftlich.

Das erste Kameraführungssystem wurde mit der Bezeichnung AESOP (Automated Endoscope System for Optimal Positioning) zu Beginn der laparoskopischen Chirurgie vorgestellt.

Das FDA-zertifizierte Kameraführungssystem AESOP ist ein Horizontalarm mit drei aktiven und zwei passiven Gelenken. Für die Kameraführung kann das Gerät durch den Chirurgen mittels Handsteuerung, Fußpedal oder Sprachsteuerung in seinen drei Freiheitsgraden gesteuert werden. Das AESOP-System besteht aus einem Manipulatorarm nach dem SCARA-Prinzip, einer Kontrolleinheit mit den verfügbaren Eingabemodalitäten und einem Transportwagen. Der Manipulatorarm kann entweder an den OP-Tisch montiert oder auf dem Transportwagen eingesetzt werden. Für die Sprachsteuerung muss ein an die Kommandos (zum Beispiel left-right, up-down, forward-backward) des jeweiligen Chirurgen trainierte Sprachsteuerkarte, die sogenannte „Personal Voice Card“, erstellt werden. Das System bietet die Möglichkeit, drei Positionen zu speichern, die

automatisch angesteuert werden können [9, 10].

Während der AESOP kontinuierlich verbessert wurde, erschienen bald auch Konkurrenzsysteme am Markt (■ **Tab. 2**).

Ende der 1990er-Jahre wurde dann die Brücke zu den „intelligent robots“ durch die Einführung der teilautonomen Kameraführung geschlagen; beispielhaft ist das auf Farbtracking basierende Kameraführungsprinzip: Die räumliche Position der farbmarkierten Spitze des dominanten Instruments wurde bei laparoskopischen Eingriffen kontinuierlich erfasst und die Kamera durch das Führungssystem so nachgerichtet, dass sich die Spitze des Instruments stets im Zentrum des Bildes und im definierten Abstand zur Optik befindet.

Obwohl auch diese hoch entwickelten Funktionssysteme durchaus erfolgreich klinisch eingesetzt wurden [11], haben sich Kameraführungssysteme nicht durchsetzen können.

Das stabile Kamerabild und die hohe Präzision in der Nachführung werden nicht nur mit den erwähnten hohen Investitionskosten bei den Geräten der ersten Generation, sondern auch mit einer deutlich verlängerten Operationszeit und aufwendigen Steuerungsmanövern erkauft [12, 13]. Als weitere Aspekte, die gegen den Einsatz von Telemanipulatoren sprechen, werden der große Platzbedarf, die eingeschränkte Ausbildungsmöglichkeit des chirurgischen Nachwuchses und die mangelnde Flexibilität genannt [12, 13, 14, 15].

Die Kameraführungssysteme der ersten Generation werden praktisch ausnahmslos nicht mehr angeboten.

In anderen Disziplinen war die Entwicklung ähnlich, sofern auch hier Kameraführungssysteme eingesetzt wurden.

Master-Slave-Systeme

Etwa gleichzeitig kamen vor etwas mehr als zehn Jahren die Systeme DaVinci und ZEUS auf den Markt. Später kamen noch einige ähnliche Systeme hinzu (■ **Tab. 3**). Durch einen Firmenaufkauf wurde das DaVinci-System das einzige Master-Slave-System, das noch verbreitet im Einsatz ist.

Das DaVinci-System besteht aus zwei Einheiten: einerseits aus der Steuerkonsole mit einem Stereobildschirm, mit den beiden Steuergriffen, der Bedienoberfläche für den Operateur und dem Steuerrechner und andererseits aus dem patientenseitigen Manipulatorsystem mit drei Armen, an denen die auswechselbaren und autoklavierbaren EndoWrist-Instrumente und das Teleskop befestigt werden. Die maximal zehnmal einsetzbaren EndoWrist-Instrumente besitzen drei Freiheitsgrade, die den eingeschränkten Handlungsbereich erweitern. Die Endeffektoren können damit (einschließlich der Schließfunktion) in ihren sieben Freiheitsgraden im Bauchraum positioniert werden. Die Steuerung des Teleskops erfolgt über die Betätigung eines Fußpedals und einer der beiden Steuergriffe. Die Integration eines Tremor-Filters und die Skalierung der Manipulationen erlauben eine einfache und präzise Ausführung diffiziler Operationsschritte ([16], ■ **Abb. 1**).

Master-Slave-Systeme in der Kardiochirurgie

Zunächst war als interessanteste Disziplin für den Einsatz von Master-Slave-Systemen die Herzchirurgie in Betracht gezogen worden. Theoretisch ist hier besonders gut zu begründen, dass ein Apparatesystem, das eine exzellente Visualisierung und eine hochpräzise Manipulation gestattet, Vorteile bringt – insbesondere bei der Gefäßanastomosierung. In entspannter Körperposition kann sich der Chirurg ganz auf die Nahtführung konzentrieren, wobei der Situs dreidimensional abgebildet ist. Zudem reicht der vom System vorgegebene Arbeitsraum für herzchirurgische Eingriffe völlig aus.

In praxi wurden die anfangs hoch gespannten Erwartungen nicht erfüllt [17], sodass zumindest in den USA die Nutzung der vorhandenen Systeme eher wieder nachließ (■ **Abb. 2**). In einer Umfrage wurde angegeben, dass 65% aller Herzzentren, die einen Roboter besaßen, ihn nicht einsetzten [18]. Hierfür waren in erster Linie der hohe Aufwand und die beträchtlichen Mehrkosten ohne eine wirklich überzeugende Verbes-

Zusammenfassung · Abstract

Bundesgesundheitsbl 2010 · 53:831–838
DOI 10.1007/s00103-010-1095-y
© Springer-Verlag 2010

H. Feußner · S. Can · A. Fiolka · A. Schneider · D. Wilhelm

Leistungsfähigkeit, Risiken und Vorteile des Einsatzes der Robotik in medizinisch-operativen Disziplinen

Zusammenfassung

Im vergangenen Jahrzehnt wurden erstmals Robotiksysteme in fast allen operativen medizinischen Disziplinen evaluiert. Von wenigen Ausnahmen abgesehen (radikale Prostatektomie) haben mechatronische Supportsysteme in keinem Einsatzbereich einen echten therapeutischen Durchbruch erzielen können. Gerätesysteme der zweiten Generation mit besserer Integration von Komplementärsystemen (präoperative Therapieplanung, intraoperative Diagnostik, Navigation und so weiter) und verbesserter Funktionalität stehen heute vor der klinischen Einführung und versprechen eine bessere Nutzbarmachung der spezifischen Vorteile von Robotiksystemen in der klinischen Praxis. Für neuere Entwicklungen in der operativen Therapie („narbenloses Operieren“) stellt die Robotik eine Schlüsseltechnologie dar.

Schlüsselwörter

Robotik · Mechatronische Supportsysteme · Master-Slave-Roboter · Navigation

Efficiency, risks, and advantages of using robotic support systems in interventional medicine

Abstract

During the past decade, robotic systems were evaluated for the first time in practically all surgical disciplines. With only a few exceptions (radical prostatectomy), mechatronic systems did not achieve a breakthrough in any field of application. Second generation robotic devices with better integration of complementary technologies (preoperative therapy planning, intraoperative diagnostic work-up, navigation, etc.) and augmented functionality are now ready to be introduced into clinical practice. It is hoped that the specific advantages of robotics will result in increased use compared to previous systems. Robotics is a key technology if new surgical strategies (“scarless surgery”) are to succeed.

Keywords

Robotics · Mechatronic support systems · Master-slave robots · Navigation



Abb. 1 ▲ Das Master-Slave-System DaVinci: **a** Bedienkonsole; **b** Slave-Element am Patienten; **c** Turm mit Peripheriegeräten

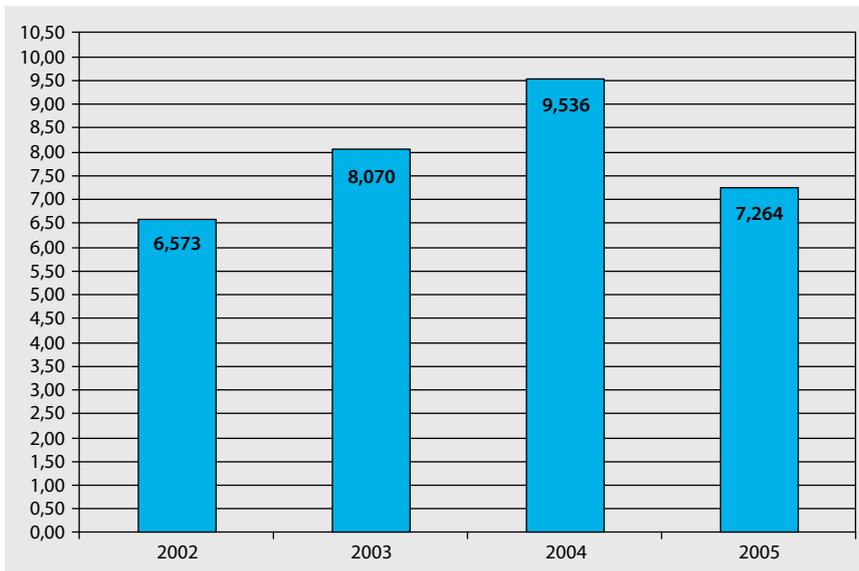


Abb. 2 ▲ Durchschnittliche jährliche Auslastung mit herzchirurgischen Fällen pro Jahr und Roboter-einheit in den USA [18]

serung der Ergebnisqualität verantwortlich. Aufgrund der heute immer noch vorhandenen Limitationen wird die Bedeutung der Robotik in der Kardiochirurgie wahrscheinlich nur allmählich zunehmen [19].

ZEUS und DaVinci in der Viszeralchirurgie

Auch hier wurden Anfang des neuen Jahrhunderts durch die Einführung der Master-Slave-Systeme DaVinci und ZEUS große Erwartungen geweckt. In rascher Folge erschienen Publikationen, die nachwiesen, dass praktisch alle laparoskopischen Eingriffe auch mit Master-Slave-Systemen durchführbar waren.

pischen Eingriffe auch mit Master-Slave-Systemen durchführbar waren.

Bald darauf wurden von zahlreichen Arbeitsgruppen die besonderen Stärken und die Nachteile systematisch evaluiert. Trotz einiger Vorzüge waren die Ergebnisse des „Roboter“-Einsatzes nicht so überzeugend, dass die Verwendung der heutigen Systeme in der Viszeralchirurgie empfohlen werden kann [20].

Der mangelnde Erfolg mechatronischer Assistenzsysteme beziehungsweise die Einstellung ihres Einsatzes erklären sich in erster Linie durch die hohen Anschaffungs- und Betriebskosten [14, 15]. Diese Kosten sind in der klinischen Routine nicht zu rechtfertigen, da – und dies ist das zweithäufigste Argument gegen die roboterunterstützte Chirurgie – die „echten“ Indikationen fehlen. Momentan gibt es keinen operativen Eingriff, der nicht auch auf konventionellem Wege mit gleichem, wenn nicht sogar mit besserem Ergebnis durchgeführt werden könnte [21, 22, 23].

DaVinci in der Urologie

Recht überraschend hat der Einsatz des DaVinci neuerdings in der Urologie Furore gemacht: Ausgehend von den USA,

wird weltweit ein deutlicher Trend beobachtet, Prostataktomien bevorzugt mit dem Roboter zu propagieren. Als wesentliches Argument wird dabei angeführt, dass sich insbesondere die Anastomosierung der Harnröhre sehr viel übersichtlicher und damit auch besser als beim konventionell-offenen oder laparoskopischen Vorgehen ausführen lässt. Bisher fehlt noch jegliche Evidenz, dass die Prozess- und Ergebnisqualität dadurch wirklich verbessert werden können. Aber offensichtlich spielt zumindest auch der Marketingaspekt eine so wichtige Rolle, dass weltweit der Einsatz der DaVinci-Eingriffe fast exponentiell zugenommen hat (Abb. 3).

DaVinci in weiteren operativen Disziplinen

In der Gynäkologie ist derzeit die Durchführung der Hysterektomie mittels Robotik ein aktuelles Thema. Die Datenlage zur Sinnhaftigkeit ist noch dürftiger als bei der urologischen Applikation, da bei einer Entfernung der Gebärmutter an sich keine außergewöhnlich feinen Präparations- und Anastomosierungsschritte erforderlich sind. Dessen ungeachtet scheint die Einsatzhäufigkeit auch hier zuzunehmen (Abb. 4).

Auch die Neurochirurgen haben das Master-Slave-System entdeckt. Hier wurden experimentelle Arbeiten über einen transoralen Zugang am kraniozervikalen Übergang [24] und andere Eingriffe [25] durchgeführt. HNO-ärztlicherseits wurde unter anderem über die Resektion von Tumoren am Zungengrund [26] oder die radikale transorale Tonsillektomie beim Plattenepithelkarzinom [27] berichtet, ohne dass diese Untersuchungen über reine Machbarkeitsstudien hinausgingen [28]. Abgesehen von diesen vereinzelt Anwendungen kann derzeit aber von einer wirklich breiten Anwendung noch in keiner Disziplin die Rede sein.

Anforderungen an eine neue Generation von Telemanipulatoren

Etwa ein Jahrzehnt nach der fast euphorischen Einführung von „Robotersystemen“ in die operative Medizin herrscht

Abb. 3 ▶ Zunahme der weltweit durchgeführten DaVinci-Prostataktomien. (Aus: Intuitive Surgical investor presentation 4/09)

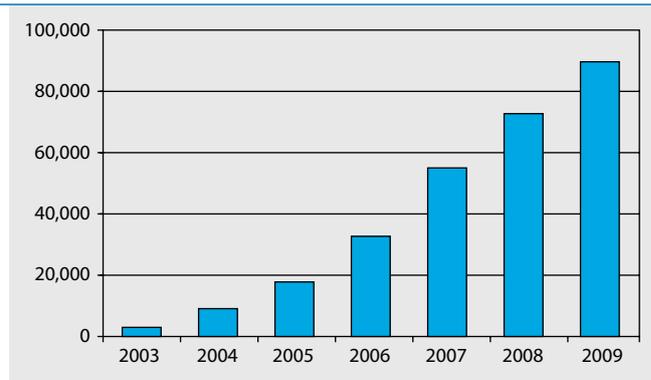
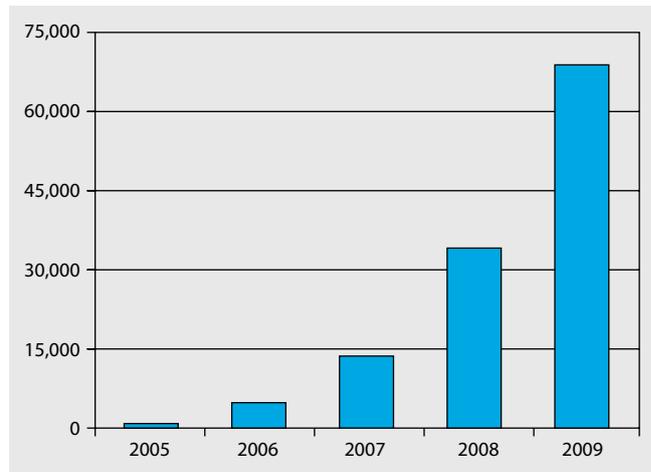


Abb. 4 ▶ Hysterektomien mit dem DaVinci-System: Zunahme seit 2005. (Aus: Intuitive Surgical investor presentation 4/09)



derzeit eher Ernüchterung – außer vielleicht in der Urologie. Auch entschiedene Protagonisten des Robotikeinsatzes in der Medizin räumen ein, dass noch erhebliche prinzipielle Verbesserungen erzielt werden müssen, bevor mechatronische Supportsysteme in der klinischen Versorgung eine relevante Rolle spielen. Die Anforderungen sind zwar je nach Einsatzgebiet graduell unterschiedlich, umfassen aber zumindest die nachfolgend vorgestellten Aspekte, die implizit auch in einem vielbeachteten Konsensusartikel formuliert wurden [29].

Flexibilität

Telemanipulatoren der neuen Generation sollten über einen uneingeschränkten Bewegungsumfang verfügen, sodass der jeweilige Endeffektor, ganz gleich ob chirurgisches Instrument oder Kamera, an jedem Ort der Abdominalhöhle positioniert werden kann, ohne dass dafür Umbaumaßnahmen am Trägersystem notwendig sind.

Der uneingeschränkte Bewegungsumfang gewährleistet die hohe Flexibilität bei

der Operation und überwindet die Limitierung der bisherigen Systeme auf meist nur einen Quadranten der Abdominalhöhle. Die erweiterte diagnostische Laparoskopie (beispielsweise mit Inspektion der gesamten Abdominalhöhle und der Bauchdecke) und notwendigen Präparationen beziehungsweise Biopsien im Bereich des kleinen Netzes sowie im kleinen Becken werden dadurch solochirurgisch und computerassistent durchführbar. Technisch aufwendige gastrointestinale Rekonstruktionen mit ständigem Wechsel zwischen raumgreifenden Manövern und vorsichtigen Präparationen werden erst durch einen größeren Bewegungsraum möglich.

Kompakte Bauweise, Miniaturisierung

Der Raum im Operationsaal, insbesondere nahe am Patienten, ist begrenzt. Besonders gravierend macht sich dies in der minimal-invasiven Chirurgie aufgrund der Vielzahl an notwendigen Zusatzgeräten und entsprechenden Schlauch- und Kabelverbindungen bemerkbar. Die Bau-



Abb. 5 ▲ Kameraführungssystem der 2. Generation: SoloAssist: Das Leichtbaugerät kann problemlos von einer Assistenzperson montiert/demontiert werden. Es werden nur fluidische Antriebe verwendet, sodass keine störenden elektromagnetischen Felder aufgebaut werden. Die intraoperative Fluoroskopie ist möglich

weise eines Telemanipulators der neuen Generation sollte daher so kompakt wie möglich gehalten werden, um im Operationsgebiet die Kollisionsgefahr zu verringern und den Zugang des Operators zum Patienten zu verbessern. Durch eine kompakte Bauweise des Telemanipulators wird die Stellfläche optimal ausgenutzt, und der Transport und die Positionierung werden erleichtert. Ein weiterer wichtiger Faktor ist neben der Dimension das Gewicht des Systems, da es bei routinemäßigem Einsatz und vor allem bei Notfallsituationen mit der Notwendigkeit einer Konversion einen maßgeblichen Einfluss auf die Auf- und Abbauzeit hat.

Assistenzsysteme der neuen Generation müssen direkt oder indirekt mit dem Operationstisch gekoppelt sein. Nur dadurch werden rasche Positionsänderungen des OP-Tisches möglich, die bei

den meisten laparoskopischen Eingriffen erforderlich sind.

Kompatibilität

Assistenzsysteme für die Navigation und auch die intraoperative bildgebende Diagnostik mittels C-Bogen, Computertomographie oder auch Magnetresonanztomographie werden voraussichtlich eine immer größere Rolle bei chirurgischen Eingriffen spielen. Die verwendeten Materialien für die Supportsysteme sollten daher röntgendurchlässig, amagnetisch und frei von elektromagnetischen Störfeldern sein. Die Antriebe der Systeme sind zurzeit mit Elektromotoren realisiert; künftige Assistenzsysteme müssen deshalb wahrscheinlich andere Antriebe besitzen.

Mensch-Maschine-Schnittstelle

Von entscheidender Bedeutung für die klinische Einsetzbarkeit von Telemanipulatoren ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle. Um die Arbeit des Chirurgen tatsächlich zu erleichtern, muss das System intuitiv und mit wenig Aufwand steuerbar sein. Das Nebeneinander unterschiedlicher Steuerungselemente (Handcontroller, Knöpfe, Pedale und so weiter) muss durch einfache Bedienungseinheiten abgelöst werden.

Sicherheitsaspekte

Um ungewollte Ereignisse oder sogar Personenschäden weitestgehend auszuschließen, müssen mehrstufige, intelligente Sicherheitssysteme in die Telemanipulatoren implementiert werden. Eine Kraftrückkopplung oder auch optische Kollisionserkennung verhindert die iatrogene Verletzung von intraabdominellen Strukturen durch die Endeffektoren. Zudem müssen der Zeitbedarf und der Aufwand für die notfallmäßige Demontage bei Konversionen erheblich optimiert werden.

„Intelligente Systeme“

Zusätzliche Funktionalitäten des Robotiksystems müssen den Operateur stärker als bisher entlasten. So könnte die Automatisierung der Kameranachführung den Chirurgen bei der Durchführung eines

solochirurgischen Eingriffes endlich von zusätzlichen Steuerungsaufgaben entbinden. Die Automatisierung komplexerer Teilabläufe, wie zum Beispiel des intrakorporalen Knotens oder auch einer fortlaufenden Gewebenaht, wird durch eine deutliche Verkürzung der Operationszeit und unter Umständen auch durch Verbesserung der Qualität die klinische Bedeutung der roboterunterstützten Chirurgie steigern.

Integration in den Gesamtworkflow

Wahrscheinlich wird das mechatronische Unterstützungssystem nicht mehr wie heute ein Stand-alone-System bleiben, sondern integriert sein in die intraoperative Diagnostik und Navigation und in das Kontrollsystem. Dabei ist auch eine Kontextsensitivität erforderlich: Es muss die sogenannte „situation awareness“ vorhanden sein, die es dem System erlaubt, der jeweiligen Situation angemessen zu reagieren.

Kosten-Nutzen-Verhältnis

Selbst das ausgereifteste chirurgische Assistenzsystem wird sich nicht auf Dauer durchsetzen, wenn es unter ökonomischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll eingesetzt werden kann [20]. Der zu erwartende Nutzen und der öffentlichkeitswirksame positive Effekt der Verwendung einer neuen Technologie müssen in einem realistischen Verhältnis zu den Anschaffungs- und Betriebskosten stehen.

Erfreulicherweise ist der noch erhebliche Entwicklungsbedarf erkannt worden, sodass sich bereits zahlreiche neue, vielversprechende Ansätze abzeichnen. Neue Kameraführungssysteme wie der SoloAssist (■ **Abb. 5**) oder mechatronische Unterstützungssysteme wie der SpineAssist [30] berücksichtigen bereits viele der oben genannten Anforderungen. Eindrucksvoll ist auch die kontinuierliche Verbesserung des DaVinci-Konzepts.

Es spricht vieles dafür, dass auch die Einführung von Robotiksystemen in die Medizin dem bekannten Lebenszyklus für technologische Innovationen folgt (■ **Abb. 6**): Demnach befinden wir uns heute nach der Phase der überzogenen

Erwartungen in der Phase der Desillusionierung. Wie an den oben genannten Beispielen gezeigt, scheint aber jetzt die Phase der Ausreifung zu beginnen.

Ausblick

Es steht wohl außer Frage, dass die operativen Robotiksysteme der ersten Generation trotz vieler innovativer Ansätze keinen echten Durchbruch in der klinischen Anwendung geschafft haben – wenn man vom derzeit schwer einzuschätzenden Boom in der Urologie (und vielleicht auch in der Gynäkologie) abieht. Obwohl der inzwischen etablierte DaVinci kontinuierlich funktionell verbessert und erweitert wird (zum Beispiel durch die Verwendung weiterer Arme, zusätzlicher Gelenke und haptischem Feedback) und weitere prototypischen neuen Lösungen in der Entwicklung sind, wird zumindest kurz- und mittelfristig die Operationsrobotik keine wirklich relevante Rolle spielen.

Ein echter neuer Impuls für die Operationsrobotik wird nur dann kommen, wenn seitens der medizinischen Anwender innovative Interventionen entwickelt werden, die den Einsatz geeigneter mechatronischer Unterstützungssysteme zwingend voraussetzen und die ohne mechatronische Hilfe überhaupt nicht verwirklicht werden könnten. Beispielhaft kann dies an der Entwicklung der sogenannten „narbenlosen Chirurgie“ verdeutlicht werden.

In der zweiten Hälfte unseres neuen Jahrzehnts wurde das Konzept der „natural orifice transluminal endoscopic surgery“ (NOTES) entwickelt und von den viszeralmedizinischen Disziplinen (Chirurgie, interventionelle Gastroenterologie) begeistert aufgenommen. Die grundlegende Idee von NOTES ist es, das operative Trauma im Vergleich zur laparoskopischen Vorgehensweise noch einmal zu reduzieren. Dazu werden flexible Operationsendoskope über den Mund, das Rektum, die Vagina oder die Blase – unter Vermeidung von Einschnitten in die äußere Körperoberfläche – in den Bauchraum eingeführt und der jeweilige Eingriff dort vorgenommen. Abgesehen vom entscheidenden kosmetischen Vorteil erwartet man dadurch eine weitere

Verkürzung der Behandlungsdauer, eine noch geringere Schmerzbelastung der Patienten und eine weitere Zunahme der ambulanten Behandlungsmöglichkeiten. Sehr rasch wurde aber bei der praktischen präklinischen Evaluation eine ganze Reihe praktischer Barrieren identifiziert, die einen umfassenden klinischen NOTES-Einsatz noch verhindern. Unter den zahlreichen noch zu lösenden Problemen, die dezidiert in dem dazu erschienenen „white paper“ der amerikanischen Noscarg-Gruppe aufgeführt sind [31], wird das Fehlen einer geeigneten Operationsplattform an zentraler Stelle genannt. Damit sind mechatronische Unterstützungssysteme gemeint, die alle Kriterien der Robotik erfüllen. Hier besteht jetzt von Anwenderseite ein konkreter Bedarf an einer hochinteressanten Applikation, die – wie jetzt bereits erkennbar ist – Forschung und Entwicklung gewaltig stimulieren wird, da ein taugliches System sofort auf ein breites Anwendungsfeld stoßen wird. Damit unterscheidet sich die Situation heute von den Rahmenbedingungen, unter denen die ersten Master-Slave-Systeme erstmals eingeführt wurden: Während sich die Technik damals eine geeignete Indikation erst suchen musste, nimmt die Robotik heute die Stelle einer Schlüsseltechnologie ein, ohne die NOTES in der Klinik nicht realisiert werden kann.

Es ist wahrscheinlich, dass analoge „Paradigmenwechsel“ auch in den anderen operativen Disziplinen aufkommen werden und auch dort der Robotik eine echte Schlüsselstellung geben.

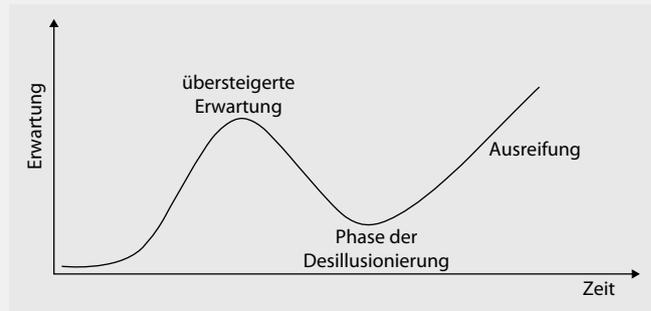


Abb. 6 ▲ Viele technologische Innovationen folgen dem bekannten Innovationszyklus, der mit übersteigter Erwartung beginnt. Nach einem kurzzeitigen „Hype“ folgt eine Phase der Ernüchterung. Erst allmählich setzt sich dann die Innovation bei kontinuierlicher Verbesserung durch

Fazit

Etwa zehn bis 15 Jahre nach der mit überzogenen Erwartungen verbundenen Einführung mechatronischer Assistenzsysteme in die operativen medizinischen Disziplinen ist klar, das dadurch – vielleicht von wenigen Ausnahmen abgesehen – keine signifikante Verbreiterung des therapeutischen Spektrums erreicht wurde und das Aufwand-Nutzen-Verhältnis insgesamt unbefriedigend ausgefallen ist. Die zweifellos vorhandenen besonderen Vorteile dieser Systeme reichten nicht aus, dass die überwältigende Mehrheit der Anwender die immer deutlicher werdenden spezifischen Nachteile akzeptierte. Allerdings wurden in dieser ersten Phase der Optimierungsbedarf und das Optimierungspotenzial der neuen Technologie erkannt, sodass heute eine zweite Generation mechatronischer Systemlösungen entwickelt wird, von der wirksame Impulse für die operative Therapie erwartet werden können.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. H. Feußner

Chirurgische Klinik und Poliklinik, Klinikum rechts der Isar der TU München
Ismaninger Str. 22, 81675 München
feussner@chir.med.tu-muenchen.de

Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

1. Pott P, Schwarz M (2002) Robotik, Navigation, Telechirurgie: Stand der Technik und Marktübersicht. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 140:218–231
2. Börner M, Bauer A, Lahmer A (1997) Rechnerunterstützter Robotereinsatz in der Hüftendoprothetik. *Orthopäde* 26:215–257
3. Honl M, Dierk O, Gauck C et al (2003) Comparison of robotic-assisted and manual implantation of a primary total hip replacement. A prospective study. *J Bone Joint Surg Am* 85-A(8):1470–1478
4. Mantwill F, Schulz AP, Faber A et al (2005) Robotic systems in total hip arthroplasty – is the time ripe for a new approach? *Int J Med Robot* 1(4):8–19
5. Schröder P (2005) Consequence of evidence-based medicine and individual case appraisal of the Robodoc method for the MDK, and the malpractice management of insurance funds and the principles of managing innovations. *Gesundheitswesen* 67(6):389–395
6. Benabid AL, Lavallee S, Hoffmann D (1992) Potential use of robots in endoscopic neurosurgery. *Acta Neurochir Suppl (Wien)* 54:93–97
7. Rizun PR, McBeth PB, Louw DF, Sutherland GR (2004) Robot-assisted neurosurgery. *Surg Innov* 11:99
8. Nimsy C, Rachinger J, Iro H, Fahlbusch R (2004) Adaption of a hexapod-based robotic system for extended endoscope-assisted transphenoidal skull base surgery. *Minim Invasive Neurosurg* 47:41–46
9. Mettler L, Ibrahim M, Jonat W (1998) One year experience working with the aid of a robotic assistant (the voice-controlled optic holder AESOP) in gynaecological endoscopic surgery. *Hum Reprod* 13:2748
10. Sackier JM, Wang Y (1994) Robotically assisted laparoscopic surgery. *Surg Endosc* 8:63–66
11. Omote K, Feußner H, Ungeheuer A et al (1999) Self-guided robotic camera control for laparoscopic surgery compared with human camera control. *Am J Surg* 177(4):321–324
12. Kraft BM, Jäger C, Kraft K et al (2004) The AESOP robot system in laparoscopic surgery: increased risk or advantage for surgeon and patient? *Surg Endosc* 18:1216–1223
13. Taylor GW, Jayne DG (2007) Robotic applications in abdominal surgery: their limitations and future developments. *Int J Med Robot* 3:3–9
14. Hanly EJ, Talamini MA (2004) Robotic abdominal surgery. *Am J Surg* 188:195–265
15. Marohn MR, Hanly EJ (2004) Twenty-first century surgery using twenty-first century technology: surgical robotics. *Curr Surg* 61:466–473
16. Guthart GS, Salisbury JK (2000) The Intuitive™ telesurgery system: overview and application. *IEEE Int Conf Robot Autom* 1:618–621
17. Damiano RJ Jr (2007) Robotics in cardiac surgery: the emperor's new clothes. *J Thorac Cardiovasc Surg* 134(3):559–561
18. Robicsek F (2008) Robotic cardiac surgery: Time told! *J Thorac Cardiovasc Surg* 135(2):243–246
19. Modi P, Rodriguez E, Chitwood R Jr (2009) Robot-assisted cardiac surgery. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 9:500–505
20. Wexner SD, Bergamaschi R, Lacy A et al (2009) The current status of robotic pelvic surgery: results of a multinational interdisciplinary consensus conference. *Surg Endosc* 23:438–443
21. Ballantyne GH (2007) Telerobotic gastrointestinal surgery: phase 2 – safety and efficacy. *Surg Endosc* 21:1054–1062
22. Ballantyne GH (2002) Robotic surgery, telerobotic surgery, telepresence and telementoring. Review of early clinical results. *Surg Endosc* 16:1389–1402
23. Gutt CN, Oniu T, Mehrabi A et al (2004) Robot-assisted abdominal surgery. *Br J Surg* 91:1390–1397
24. Lee JY, O'Malley BW, Newman JG et al (2010) Transoral robotic surgery of craniocervical junction and atlantoaxial spine: a cadaveric study. *J Neurosurg Spine* 12(1):13–18
25. Ponnusamy K, Chewning S, Mohr C (2009) Robotic approaches to the posterior spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 34(19):2104–2109
26. O'Malley BW Jr, Weinstein GS, Snyder W, Hockstein NG (2006) Transoral robotic surgery (TORS) for base of tongue neoplasms. *Laryngoscope* 116:1465–1472
27. Weinstein GS, O'Malley BW Jr, Snyder W et al (2007) Transoral robotic surgery: radical tonsillectomy. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 133:1220–1226
28. Parmar A, Grant DG, Loizou P (2010) Robotic surgery in ear nose and throat. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 267(4):625–633
29. Herron DM, Marohn M, The SAGES-MIRA Robotic Surgery Consensus Group (2008) A consensus document on robotic surgery. *Surg Endosc* 22:313–325
30. Barzilay Y, Liebergall M, Fridlander A, Knoller N (2006) Miniature robotic guidance for spine surgery – introduction of a novel system and analysis of challenges encountered during the clinical development phase at two spine centres. *Int J Med Robot Comput Assist Surg* 2:146–153
31. Rattner D, Kalloo A (2006) ASGE/SAGES working group on natural orifice transluminal endoscopic surgery. *Surg Endosc* 20:329–333

Neue Erkenntnisse in der Bakterienforschung zur Verbesserung von Implantaten

Implantate werden nach der Operation oft infektionsbedingt abgestoßen. Bei bis zu 67 Prozent der verwendeten Implantate treten bakterielle Probleme auf. Trotz sorgfältiger Sterilisationsprozesse scheitern so viele medizinische Implantate, weil sich einige Bakterienarten als Biofilm an das Implantat heften und so Infektionen hervorrufen. Forscher der Swinburne University of Technology haben eine Entdeckung gemacht, die nachhaltig dazu beitragen könnte, die Erfolgsrate künstlicher Implantate zu erhöhen und das Risiko bakterieller Infektionen in Krankenhäusern zu verringern. Bisher waren Wissenschaftler der Meinung, dass Bakterien leichter auf rauen Oberflächen haften. Einige Hersteller haben sogar nanoglatte Implantate produziert, um Bakterien keinen Schutz bei Sterilisationsmaßnahmen zu gewähren. Mithilfe mikrobiologischer Analysetechniken und Untersuchungen mit nanoglattem Titan widerlegten die Swinburne Forscher diese Theorie. Sie konnten zeigen, dass glatte Oberflächen einige problematische Bakterien stärker anziehen. Die Bakterien haften auf diesen Oberflächen, indem sie ein klebriges Sekret aus Zucker und Proteinen absondern und sich so einfacher an der Oberfläche festhalten können. Zum ersten Mal konnte nun gezeigt werden, dass die Produktion dieses Sekrets weitaus höher ist, wenn die Bakterien mit nanoglatten Flächen in Berührung kommen. Die Swinburne Untersuchung zeigt, dass Krankenhäuser ihre Desinfektionstechniken überdenken müssen. Hersteller von Implantaten müssen womöglich neue Desinfektionsmittel entwickeln und ihre Produktionsmethoden überprüfen.

Literatur:
 Ivanoca EP, Truong VK, Wang JY et al (2010). Impact of nanoscale roughness of titanium thin film surfaces on bacterial retention. *Langmuir* 26(3):1973–82

Quelle:
**Institut Ranke-Heinemann /
 Australisch-Neuseeländischer
 Hochschulverbund,
 www.ranke-heinemann.de**