Thieme

Zukunft der Laparoskopie und Robotik in der Urologie

The future of laparoscopy and robotics in urology

Autoren

Jens Rassweiler[1], Ali S. Goezen[1], Jan-Thorsten Klein[2], Marie-Claire Rassweiler-Seyfried[3]

Institute

1 SLK-Kliniken Heilbronn GmbH, Urologie, Heilbronn
2 Urologische Universitätsklinik Ulm, Klinik für Urologie, Ulm
3 Urologische Universitätsklinik Mannheim, Klinik für Urologie und Kinderurologie, Mannheim

Schlüsselwörter

chirurgische Roboter, Laparoskopie, Endourologie, robotische flexible Ureteroskopie, robotische TURP

Keywords

surgical robots, laparoscopy, endourology, robotic flexible ureteroscopy, robotic TURP

Bibliografie

DOI https://doi.org/10.1055/a-0741-6692 |
Akt Urol 2018; 49: 488–499
© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 0001-7868

Korrespondenzadresse

Prof. Jens Rassweiler, SLK-Kliniken Heilbronn GmbH, Urologie, Am Gesundbrunnen 20, 74078 Heilbronn
Tel.: +4971314924001
Fax: +497131494724001
jens.rassweiler@slk-kliniken.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die Robotik hat die klassische Laparoskopie in den letzen Jahren etwas an den Rand gedrängt. Dennoch hat sich auch die Laparoskopie und Retroperitoneoskopie in den letzten Jahren technologisch weiterentwickelt mit 4K-Ultra-HD-Videotechnologie, 3D-HD-Videosystemen, miniaturisierten Instrumenten, modernen Schneid- und Koagulationsverfahren, Instrumenten mit 7 Freiheitsgraden und ergnomischen Plattformen Ethos Chair®. Aufgrund der auslaufendenden Patente von Intuitive Surgical wird ab 2019 eine Konkurrenzsituation mit neuen Herstellern von Operationsrobotern existieren. Diese müssen erst belegen, ob sie den hohen Qualitätsstandard der Da-Vinci-Serie (SI, X, XI) bieten können. Dies betrifft die Art der Konsole, Anordnung der Roboterarme, Technologie des 3D-Videosystems und Qualität und Freiheitsgrade der Endeffektoren. Robotersysteme für die Endourologie sind Avicenna Roboflex® für die flexible Ureteroskopie und AquaBeam®-System für die Roboter-assistierte Aquaablation der Prostata. Während Roboflex ähnlich dem Da-Vinci-System die Ergonomie des Eingriffes erleichtert, ersetzt die robotergestützte Aquaablation erstmals den Operateur.

ABSTRACT

The introduction of robotics led to a decrease in the importance of classical laparoscopy. Nevertheless laparoscopy and retroperitoneoscopy underwent significant technological improvements during the last decade, including introduction of 4k Ultra HD video technology, 3D-HD-videosystems, minaturised instruments, advanced sealing devices, instruments with 7 degrees of freedom, and ergonomic platforms Ethos Chair®. The monopoly of robotic surgical devices will end in 2019, because key patents of Intuitive Surgical will expire. This will lead to an interesing competition among new manufacturers of robotic surgical devices, which however have to prove that they meet the high quality standard of the current da Vinci series, such as type of console, arrangement of robotic arms, technology of 3D-videosystem, and quality and degrees of freedom of end effectors. There are also robotic systems used in endourology: Avicenna Roboflex® and the AquaBeam®-System for robot-assisted aquablation therapy of the prostate. While Roboflex improves the ergonomics of flexbile ureteroscopy, AquaBeam may for the first time eliminate the surgeon.

Einleitung

Sicherlich haben Laparoskopie und Robotik in den letzten Jahrzehnten die Urologie entscheidend beeinflusst. Anfänglich eher kritisch belächelt – „a nice operation looking for an indication“ – hat sich die laparoskopische Technik ständig weiterentwickelt [1]. Hinzu kamen die technischen Erleichterungen durch den Einsatz der Master-Slave-Systeme, die inzwischen technisch ausgereift sind [2–5]. Diese haben das Indikationsspektrum und den Anwenderkreis der laparoskopischen Operationstechnik signifiikant erhöht [6]. Gerade hier ist in Kürze mit einigen Neuentwicklungen zu rechnen, da die wesentlichen Patente von Intuitive Surgical im Jahr 2019 auslaufen [4, 5].

Daneben wurden auch Robotersystem für die Endourologie und transurethrale Prostatachirurgie entwickelt, deren klini-

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

scher Einsatz sehr vielversprechend ist [7–10]. Insofern besteht sicher ein Bedarf, diese Entwicklungen näher zu beleuchten und auf ihre Perspektiven hinzuweisen.

Material und Methoden

Basierend auf persönlichen Erfahrungen mit der Laparoskopie seit 1991 und der Roboter-assistierten Chirurgie seit 2001 haben wir die aktuelle Literatur kritisch analysiert. Dabei konnten wir uns auch auf frühere Patentrecherchen zum Thema alter und neuer Robotersysteme stützen [4, 5]. Ergänzend besuchten wir auch die Webseiten von Herstellern zukünftiger robotischer Geräte mit Einsatzmöglichkeiten in der Urologie. Daraus soll die gegenwärtige Situation der Laparoskopie und Robotik skizziert und Perspektiven für die nächsten Jahre aufgezeigt werden.

Historische Aspekte

Die Laparoskopie ist eine logische Weiterentwicklung der Endoskopie, also der Zystokopie im urologischen Bereich. So benutzte Kelling schon 1901 das Zystoskop von Nitze, um bei Tieren eine Peritoneoskopie durchzuführen [11]. Allerdings stellt das laparoskopische Operieren weit höhere technologische Ansprüche. So gelang es dem Gynäkologen Kurt Semm erst 1983, eine laparoskopische Appendektomie durchzuführen, was zu einem enormen Aufruhr auf dem damaligen Chirurgenkongress führte [12]. Entscheidend für den Durchbruch der Laparoskopie waren neben der von Semm entwickelten Insufflatortechnologie die Fortschritte der Videotechnologie. Dies ermöglichte das Video-assistierte Operieren – wie auch bei der Video-TUR. Damit war die Ergonomie des Operateurs entscheidend verbessert und eine kontrollierte Assistenz möglich. Dies führte zum Durchbruch der Laparoskopie in der Chirurgie mit Einführung der Cholezystektomie Ende der 80er-Jahre [13].

In der Urologie berichtete zwar Cortesi schon 1976 über die laparoskopische Exploration bei Kryptorchismus, entscheidend war jedoch die von Clayman 1991 publizierte Nephrektomie [14]. Diese beeinflusste weltweit zahlreiche endoskopisch interessierte Urologen, unter anderem auch uns, dieses technisch anspruchsvolle Verfahren klinisch umzusetzen [15]. Dabei konnten wir auf das schon weit entwickelte Instrumentarium – inklusive Multiclipapplikatoren, drehbare Scheren und Dissektoren, Stapler – zugreifen. Angeregt von Gaur kam 1992 noch die Retroperitoneoskopie als Zugangsvariante hinzu [16, 17]. Allerdings war das Indikationspektrum begrenzt, da anfangs nur benigne Nephropathien operiert wurden. Nächster Meilenstein der Laparoskopie in der Urologie war die erfolgreiche Einführung der radikalen Prostatektomie durch Guillonneau und Vallancien im Jahr 1999, womit endlich eine zahlenmäßig relevante Indikation vorlag [18]. Auch in Deutschland wurde diese Operation von zahlreichen Kliniken erfolgreich eingeführt, wobei dies nicht emotionsfrei gegenüber den klassisch offenen Operateuren ablief [19].

Zwar verbreitete sich die laparoskopische radikale Prostatektomie und es wurden auch erste Serien der partiellen Nierentumorexzision und der radikalen Zystektomie vorgestellt, aber die Schwierigkeiten der Nahttechnik stellten immer noch ein Hemmnis für die weitere Verbreitung dar [20]. Dies änderte sich mit der Einführung der Robotertechnik im Jahr 2001 durch Binder [2, 21]. Gerhard Buess und Marc Schurr konnten schon 1996 erfolgreiche Experimente mit dem am Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelten Master-Slave-System ARTEMIS durchführen und gaben damit Frederick Moll – einem der Erfinder des Da-Vinci-Systems wertvolle Anregungen [22]. 1999 stellten dann die amerikanischen Firmen Computer Motion (ZEUS) und Intuitive Surgical (Da Vinci) erste klinische Erfahrungen auf dem Gebiet der Herzchirurgie vor [23, 24]. Dabei stellte sich das Da-Vinci-System als qualitativ besser heraus mit einer geschlossenen Konsole und 3D-Bild, schlaufengeführten Instrumenten mit 7 Freiheitsgraden und einem Kupplungsmechanismus zur Optimierung der Arbeitsposition der Hände des Operateurs [2]. Die technisch weniger aufwendige Konzeption des ZEUS ermöglichte allerdings eine transatlantatische laparoskopische Cholezytektomie durch Marescaux, damit ließ sich aber keine radikale Prostatektomie klinisch realisieren [25]. Selbst nach den ersten erfolgreichen Serien in Europa im Jahr 2001 konnte erst Mani Menon mit einem subventionierten Trainingsprogramm die Roboter-assistierte radikale Prostatektomie in den USA und später auch weltweit etablieren [26]. Heute sind in Deutschland mehr als 120 Geräte interdisziplinär im Einsatz.

Aktuelle Situation der Laparoskopie

Zwar kann die Entwicklung der Laparoskopie sicherlich nicht mehr losgelöst von der Robotik gesehen werden. Dennoch gibt es auch heute noch etwa 25 % der Kliniken, die nur die Laparoskopie durchführen [27]. Außerdem besteht bei der Laparoskopie der Vorteil, dass technische Innovationen direkt umgesetzt werden können.

Videotechnologie

Die Einführung der digitalen High-Definition (HD)-Videotechnologie kann sicherlich als Quantensprung für die gesamte Endoskopie gesehen werden mit signifikant verbesserter Auflösung, Tiefenschärfe und Helligkeit. Damit hat sich die Laparoskopie dem Dogma der schlechteren Bildqualität als beim offenen Operieren entledigt: Im Gegenteil, durch die Nähe des Laparoskops zum Objekt besteht eine deutlich bessere optische Darstellung der anatomischen Strukturen [1]. Außerdem steht wie in der Unterhaltungsindustrie die 4K-Ultra-HD-Television vor dem breiten klinischen Einsatz mit weiterer Optimierung der Bildqualität mit 8 Millionen Pixel im Vergleich zu 2 Millionen Pixel der HD-Videotechnologie (▶ **Tab. 1**).

Parallel hierzu hat sich auch die Qualität der 3D-HD-Videotechnologie weiter entwickelt. Hier besteht aber ein klarer Vorteil für Robotersysteme mit geschlossener Konsole, da bei offener Konsole und klassischer Laparoskopie immer noch eine Polarisationsbrille getragen werden muss. 3D-Videohelme haben sich wegen der schlechteren Helligkeit der kleinen Bildschirme und den ergonomischen Problemen für den Operateur nicht bewährt [28, 29]. Allerdings können inzwischen sowohl 0°- als auch 30°-Optiken ohne Einschränkung eingesetzt werden (▶ **Tab. 2**)

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

▶ **Tab. 1** Technische Daten aktueller und zukünftiger Videosysteme.

Videosystem	Pixel (N)	Frequenz (Felder/Sek.)	Bildschirmrelation
Standard-Definition TV (SDTV)	640 × 480 640 × 576	60 (NTSC; US/Japan) 50 (PAL; Europa)	4:3 4:3
High-Definition TV (HDTV)	1920 × 1080 1920 × 1080	60 (NTSC; US/Japan) 50 (PAL; Europa)	16:9 16:9
Ultra-High-Definition TV (Ultra HDTV-4K)	4096 × 2160	120	16:9
Ultra-High-Definition TV (Ultra HDTV-8K)	7680 × 4320	120	16:9

▶ **Tab. 2** Entwicklungen der 3D-Videotechnologie für die Laparoskopie.

Technologie	Spezifikation	Grenzen	Kommentar
Ein-Chip-3D	2 Kamerasysteme synchronisiert am Bildschirm durch ein aktives Shutter-system	Schlechte Auflösung Doppelbild auf Bildschirm im OP wegen niedriger Projektionsfrequenz	Nicht für komplexe Eingriffe geeignet
Drei-Chip-CCD-3D	1 Optik (3D-Effekt) wird durch unter-schiedliche Projektionswinkel erzielt. Bilder werden durch Polarisationsbrillen konvertiert.	Starker Helligkeitsverlust 3D-Effekt eingeschränkt	Konnte nicht für 30°-Teleskope umgesetzt werden
Drei-Chip-CCD-3D-Helm	2 Kamerasysteme integriert auf dem Displays des Helms mit je einem Klein-bildschirm für jedes Auge	Kleines Bild mit schlechter Auflösung Helm ist unangenehm für Operateur	Möglichkeit der Überlagerung von anderen Bildinformationen (Augmented Reality)
HD-3D	2 Optiken mit digitalem HD (nicht Full-HD) Fusion der Bilder durch Polarisations-brillen	Doppelbild auf Bildschirm Helligkeitsverlust 3D-Effekt abhängig von Blickwinkel auf Monitor	Zunächst nur für 0°-Optiken
HD-3D mit flexiblem Endoskop	2 Optiken mit integriertem digitalem Full-HD, integriert in der Spitze des flexiblen Laparoskops Fusion mit Polarisationsbrille	Doppelbild auf Bildschirm Helligkeitsverlust	Flexible Spitze erweitert die 0°-Technologie
HD-3D-0°/30°-Endoskop	2 Optiken mit integriertem digitalem Full-HD und wahlweise 0°/30° Fusion mit Polarisationsbrille	Doppelbild auf Bildschirm Keine Drehbarkeit der 30°-Optik Helligkeitsverlust	Neueste Technologien ermögli-chen Drehbarkeit der 30°-Optik. Ultra-HD kann Helligkeitsverlust kompensieren.

Für uns macht die 3D-Videotechnologie nur beim Einsatz von Instrumenten mit 7 Freiheitsgraden Sinn, um die entsprechende Position des Endeffektors zu beurteilen [30].

Basisinstrumentarium

Schon frühzeitig war die Basisausrüstung der Laparoskopie gut entwickelt: Es gab Veress-Nadeln und Einmaltrokare mit Sicherheitsmechanismus, Hasson-Trokare mit Ballonfixation bei offenem Trokarzugang und gut funktionierende CO_2-Insufflatoren [31]. Die klassischen Präparationsinstrumente (Metzenbaumschere, Endodissektor, rechtwinkliger Dissektor, [Darm-]Fasszange) waren von Anfang an frei drehbar mit entsprechenden Scherengriffen mit guter Ergonomie.

Bez. der Art der Sicherheitstrokare haben sich die radial expandierenden stumpfen Trokare als vorteilhaft gegenüber Trokaren mit integriertem Messer oder scharfer Spitze erwiesen mit 3 % vs. 10 % Morbidität [32]. Das AirSeal®-System (SurgiQuest, Orange, USA) ermöglicht als klappenloses Trokarsystem mit entsprechendem Insufflator ein stabiles Pneumoperitoneum auch bei Absaugen mit geringerer CO_2-Absorption. Allerdings wirkt sich dies nicht statistisch signifikant auf die Operationszeit oder den Blutverlust aus [33].

Instrumente zur Blutstillung und Präparation

Entscheidend für die Sicherheit und Effektivität der Laparoskopie war die Einführung bipolarer Koagulationsinstrumente, am besten in der Form eines Dissektors. Parallel hierzu wurden multifunktionelle Instrumente zum Schneiden und Koagulieren entwickelt, basierend auf Ultraschallenergie und Radiofrequenztechnologie [1, 34]. Während Ultraschalldissektoren (Harmonic Scalpel, Ethicon, USA) wegen der Gefahr von Hitzeschädigung umgebender Strukturen in der Kritik stehen, haben

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

▶ **Tab. 3** Übersicht der wichtigsten laparoskopischen Nahtinstrumente.

Technologie	Arbeitsmechanismus	Modifikationen	Kommentar
Lineare Klammernaht (Stapler)	6 Klammernahtreihen (Titan) mit gleichzeitiger Durchtrennung zwischen 3. und 4. Nahtreihe	Magazine mit unterschiedlicher Höhe der Klammern für Gefäße und Darm	Effektiv und sicher für Darmanastomose (Ileum) Nicht für Neoblase wegen Gefahr der Kalzifikation
Zirkuläre Klammernaht (Stapler)	End-zu-End-Anastomose durch zirkuläres Klammern nach einer Tabaksbeutelnaht der beiden Enden (Sigma, Rektum), der aktive Teil des Gerätes wird transanal vorgeschoben	Unterschiedliche Größen je nach Applikation (Rektum, Ösophagus)	Hauptsächlich bei chirurgischen Indikationen Potenziell zur Ansatomose bei Sigma-Neoblase
Endo Stitch	Gerade Nadel mit zentral fixiertem Faden. Die Naht wird von einer Branche zur anderen transportiert.	Flexibles Instrument (SILS-stitch) Motorisiertes Instrument (Autostitch – nur experimentell)	Sinnvoll für fortlaufende Naht (Blase, Darm) Problematisch bei feinen Nähten (Pyeloplastik) wegen Stichtrauma
Suture Assistant	Gerade Nadel mit präformiertem Knoten	Keine	Urologisch bei perkutanem Zugang genutzt (Pyeloplastik)
Endo360°	Vorgeladene, gebogene Nadel, die über einen Mechanismus manuell durch das Gewebe geführt wird	Abwinkelbare Instrumentenspitze	Bisher v. a. bei bariatrischer Chirurgie eingesetzt
Overstitch	Feder-geladene gebogene Nadel mit mittig fixiertem Faden	Entwickelt für NOTES	Einsetzbar für Single-Port Surgery
EndoSew	Naht wie bei Nähmaschine	Nur experimentell	Laparoskopischer Einsatz sehr kompliziert

sich bipolare Systeme mit Impedanz-gesteuerter Kontrolle der Gewebekoagulation (LigaSure, Medtronic, Irland) oder mit limitierter Ultraschallenergie (Thunderbeat, Olympus, Japan) bewährt [35]. Wegen der entsprechend erhöhten Kosten setzen wir diese aber nur selektiv ein bspw. bei der partiellen Nephrektomie zur Freipräparation der Niere [36].

Spezielle Nahtinstrumente

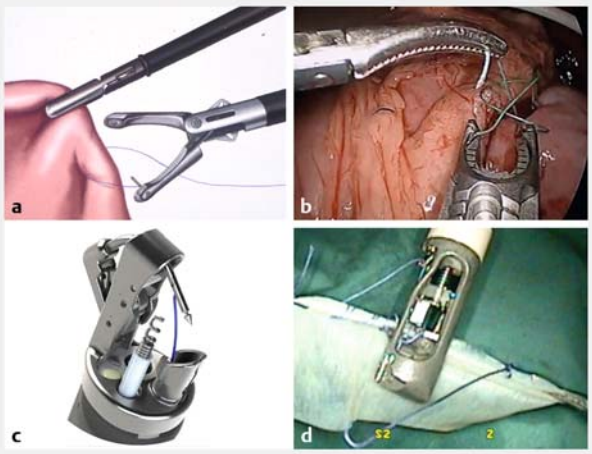
Sicherlich stellt die freihändige laparoskopische Nahttechnik die größte Herausforderung an den Operateur dar. Hier gibt es unterschiedliche Lösungsansätze. Am einfachsten ist der Einsatz des Roboters mit den Instrumenten mit 7 Freiheitsgraden. Für die klassische Laparoskopie sind entsprechende geometrische Grundregeln und Trainingsmodelle entwickelt worden [37]. Unabhängig davon wurden spezielle Nahtinstrumente entwickelt, wie Stapler, endoskopische Nahtgeräte und Nahtmaschinen (▶ **Tab. 3**). Stapler sind laparoskopisch primär zur sicheren und einfachen Unterbindung größerer Gefäßstrukturen (z. B. Vena renalis) eingesetzt worden, können aber mit entsprechenden Magazinen auch zur Ausschaltung von Darmsegmenten (z. B. Ileum-conduit, Ileum-Neoblase) angewendet werden. Hinzu kommen die in der Chirurgie (Sigma-Rektum-Resektion) eingesetzten zirkulären Stapler. Das Nahtgerät Endo Stitch gibt es seit kurzem auch in motorisierter Form als Autostitch und als flexibles Instrument SILS-Stitch [38]. Andere Nahtinstrumente wie Suture lock, Ti-Knot oder Overstitch haben sich nicht klinisch durchgesetzt. Interessant ist das Endo360°, welches schon in der bariatrischen Chirurgie eingesetzt wurde (▶ **Abb. 1**).

Zusammenfassend haben sich Stapler v. a. in der Darmchirurgie und beim Absetzen größere Gefäßbrücken (Zystektomie) und Gefäße (Nierenvene) bewährt, während Endo Stitch und Endo360° nur von wenigen Operateuren eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang spielt es auch eine Rolle, dass sich die Nahttechnik durch den Einsatz von selbsthaltenden Fäden (V-lock, Quill) und den Einsatz von arretierbaren Clips (Hem-o-lock, Absolock) deutlich vereinfacht hat [39, 40]. Die an der TU Aachen entwickelte endoskopische Nähmaschine hat sich als zu kompliziert im Einsatz erwiesen [41].

Instrumente mit 7 Freiheitsgraden

Eine der wesentlichen Einschränkungen der klassischen Laparoskopie ist die Einschränkung der freien Beweglichkeit durch die fixierte Trokarposition, die nur 5 Freiheitsgrade erlaubt: seitlich, horizontal-vertikal, Ein- und Ausführen, Drehung und Aktivierung des Endeffektors. Entscheidender Vorteil der Robotik liegt in der Möglichkeit des Beweglichkeit der Instrumentenspitze, was 2 weitere Freiheitsgrade gewährleistet. Inzwischen gibt es auch unterschiedliche mechanische und elektro-mechanische Lösungsansätze für die klassische Laparoskopie, wie das Radius-System und Cambridge Endo bzw. Kymerax, Dexterité und Human Extension [1]. Die rein mechanischen Geräte nützen die Beweglichkeit des Handgelenks zur Umsetzung des Bewegungen der Instrumentenspitze (▶ **Abb. 2**), während elektromechanische Lösungen dies durch eingebaute Elektromotoren ermöglichen [1, 42]. Aus Anwendersicht ist die motorische Bewegungsunterstützung am sinnvollsten bei der Naht.

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

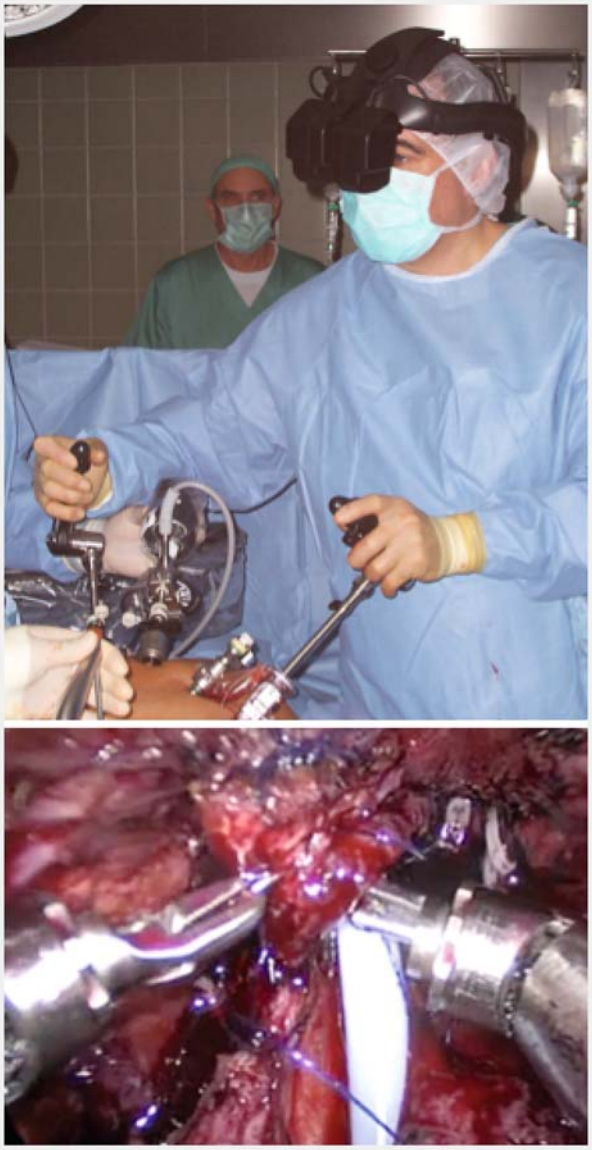


▶ **Abb. 1** Laparoskopische Nahtinstrumente. **a** Endo Stitch mit gerader Nadel und mittigem Faden. Die Nadel wird zwischen den beiden Branchen bewegt. Gut für fortlaufende Naht. **b** Endo360° mit gebogener eingelegter Nadel und endständigem Faden, die mechanisch durch das Gewebe geführt wird. Nur als Einzelknopfnaht. **c** Overstitch mit leicht gebogener Nadel und mittigem Faden. Der Durchstich erfolgt über einen Federmechanismus. V. a. für NOTES entwickelt. **d** EndoSew, die von der TU Aachen entwickelte endoskopische Nähmaschine. Problematisch ist der Gewebetransport während der fortlaufenden Naht.

Halterungssysteme für die Kamera

Schon frühzeitig wurden unterschiedliche Roboter-unterstützte Kamerasteuerungssysteme entwickelt, die den Operateur unabhängig vom Kameraassistenten machen sollten und außerdem letzterem mehr Freiheiten ermöglichten. Die Mehrzahl der Geräte (FIPS-endoarm, LapMan, Vicky, AESOP) sind heute nicht mehr im Einsatz [1]. Die größten Erfahrungen liegen mit dem von Computer Motion entwickleten sprachegesteuerten AESOP vor, der infolge der Übernahme der Firma durch Intuitive Surgical seit 2004 nicht mehr produziert wurde [43]. Von allen technisch realisierten Möglichkeiten der Kamerasteuerung war die Sprachsteuerung im klinischen Einsatz am effektivsten im Gegensatz zur Verwendung von Kopfbewegungen via Headsets, Fusspedalen oder handgeführten Joysticks. Allerdings muss betont werden, dass wir in den letzten Jahren der AESOP-Anwendung meist die integrierte Handführung durch den Operateur zwischen den einzelnen Operationsschritten bevorzugt haben, da robotische Möglichkeiten, wie automatische Rückkehr zur vorherigen Kameraposition, kaum relevant waren.

Insofern werden passive Kamerahalterungssysteme, basierend auf der Weiterentwicklung existierender Systeme (Unitract, EndoBoy, Endobloc), sicherlich bessere Einsatzchancen besitzen [1]. Hier könnte der Einsatz von Elektromotoren gegenüber Systemen mit Druckluftantrieb ergnomische Vorteile besitzen. Wesentlich ist hier auch ein optimales Halterungssystem der Optik mit geringer Traumatisierung des Laparoskops. Ein wesentlicher Vorteil der Kamerahalterungssysteme zeigt sich beim Einsatz der deutlich schwereren 3D-Laparoskope.



▶ **Abb. 2** Radius-System – als Beispiel eines mechanischen Instruments mit 7 Freiheitsgraden. Oben: Die Bewegung im Bereich der Instrumentenspitze wird durch Ab- und Anwinkeln des Ellbogengelenks erzielt. Das zentrale Rad ermöglicht die Rotation des Instruments beim Gewebedurchstich. Hier urethrovesikale Anastomose. Unten: Einsatz des Radius-Systems mit 3D-Videohelm.

Spezielle Plattformen für die Laparoskopie

Ein entscheidender Nachteil der Laparoskopie liegt in der eingeschränkten Arbeitsergonomie des Operateurs, die kein entspanntes Arbeiten ermöglicht, idealerweise mit leicht angewinkelten Armen, leicht gesenktem Blick auf den Monitor in gleicher Richtung wie das Arbeitsfeld. Hinzu kommt noch die einseitige Fußbelastung bei Anwendung der Pedale für Koagulation oder Aktivierung von Ultraschalldissektoren. Hierfür wurde mit dem Ethos Chair eine konzeptionelle Plattform entwickelt, bei der der Operateur im Fall eines Beckeneingriffs (radikale Prostatektomie) über dem Kopf des Patienten sitzen kann [44].

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

Ethos bietet dabei eine adjustierbare Bruststütze, Fuß- und Armstützen. Auf die Fußstützen werden dann die enstprechenden Pedale für Koagulation fixiert. Der Sitz kann elektromotorisch außerdem horizontal und vertikal bewegt werden (▶ **Abb. 3**). Wir setzen das System v. a. bei retroperitoneoskopischen Eingriffen wie der Nierentumorexzision oder Pyeloplastik ein [36, 45]. Interessant kann das System auch bei der Kombinaton mit Instrumenten mit 7 Freiheitsgraden sein, da die Armstützen eine freie Beweglichkeit der Handgelenke ermöglichen [30].

Eine Weiterentwicklung des MIM-Systems stellt das Lapara Surgical dar. Dabei handelt sich um ein komplett mechanisches Assistenzsystem zur Umsetzung der 7 Freiheitsgrade (▶ **Abb. 4**), basierend auf dem Prinzip des Parallelogramms [46]. Es kann mit jedem kommerziellen 3D-Videosystem eingesetzt werden. An einer auch klinisch attraktiven Umsetzung der bisher nur experimentell eingesetzten Pilotgeräte wird intensiv gearbeitet [1].

Zusammenfassend liegen zahlreiche Ansätze zur Verbesserung der Ergonomie der Laparoskopie vor, wie optimierte Videotechnologie, besseres Instrumentarium, Kamerahalterungssysteme und ergonomische Plattformen. Hier lassen sich für die Zukunft auch Hybridsysteme erwarten, die Komponente der Robotik direkt an den Operationstisch bringen. Solche Lösungen wären sicher deutlich kostengünstiger als konsolenbasierte Robotersysteme. Letztere bieten allerdings bisher deutlich bessere Technologien zur Umsetzung rekonstruktiver laparoskopische Techniken an.

▶ **Abb. 3** Ethos Chair – als Beispiel einer ergonomischen Plattform für die Laparoskopie. Der Operateur sitzt bei laparoskopischer radikaler Prostatektomie über dem Kopf des Patienten. Bruststütze und Armlehne erleichtern das Operieren. Gleichzeitig sind 2 Fußstützen mit Pedalen für Koagulation integriert.

▶ **Abb. 4** Lapara Surgical System – eine Plattform, die den Einsatz von Instrumenten mit 7 Freiheitsgraden ermöglicht, basierend auf einer mechanischen Umsetzung und Nutzung des Prinzips des Parallelogramms. Noch keine klinischen Erfahrungen.

Aktuelle Situation der Robotik

Die letzten 15 Jahre waren von der Monopolsituation von Intuitive Surgical nach Übernahme von Computer Motion im Jahr 2003 geprägt [4, 5]. 2019 werden wesentliche Patente bez. klinisch relevanter Systemkomponenten auslaufen, was dazu geführt hat, dass inzwischen zahlreiche Firmen weltweit Konkurenzprodukte zum Da-Vinci-System entwickelt haben [4, 5]. Allerdings werden sich diese Neuentwicklungen am aktuellen Standard von Intuitive Surgical messen müssen.

Da Vinci XI – State of the Art

Basierend auf dem Da Vinci SI mit neuer Konsole wurde das Robotersystem v. a. im Manipulatorbereich weiterentwickelt.

Konsole Die geschlossene Konsole basiert auf dem *SI-System* mit integriertem 3D-full HD-Videosystem von Schölly aus Denzlingen. Sie ermöglicht zusätzlich ein seitengetrenntes Auskuppeln sowie einfaches Umschalten des auf 4 Arme erweiterten Manipulatorsystems. Optional besteht die Möglichkeit einer zweiten Konsole, die allerdings meist nur zum Training genutzt wird. Außerdem können externe Videosignale (Ultraschall, CT) in den Bildschirm der Konsole integriert werden und das Videsystem besitzt die Möglichkeit der Fluoreszenzdiagnostik mit Isocyaningrün.

Manipulator Das komplett überarbeitete Konzept der 4 Roboterarme ermöglicht die Platzierung der 8-mm-Stereooptik von allen 4 Arbeitstrokaren. Die 30°-Optik kann automatisch von der Konsole aus gedreht werden, was sehr hilfreich bei Eingriffen im kleinen Becken ist (z. B. Sakrokolpopexie). Außerdem besteht in Verbindung mit dem OP-Tisch von Trumpf Medical die Möglichkeit, den Tisch intraoperativ bei liegenden Trokaren zu bewegen, was v. a. für chirurgische Indikationen (z. B. Rektumresektion) bedeutsam ist.

Klinische Erfahrungen Unsere eigenen Erfahrungen mit dem Gerät seit November 2017 (N = 163) sind sehr positiv. Inzwischen existiert die abgespeckte Version Da Vinci X mit gleicher Konsole und neuen Roboterarmen, aber ohne die Möglichkeit des selbstadaptierenden OP-Tisches [5].

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

▶ **Abb. 5** Klinisch eingesetzter Roboter für die Laparoskopie. SENHANCE – offene Konsole, 3D-Videobild mit Polarisationsbrille, blickgesteuerte Kameraführung, zur Zeit Instrumente mit 5 Freiheitsgraden und Möglichkeit des taktilen Feedbacks.

Alternative Roboter für die Laparoskopie

In der Zwischenzeit stehen mehrere neu entwickelte Roboter zur Verfügung bzw. kurz vor dem klinischen Einsatz (▶ **Tab. 4**).

SENHANCE: Ursprünglich als Telelap ALF-X mit EU-Fördermitteln von der italienischen Firma Sofar entwickelt, wird das Gerät heute von der amerikanischen Firma Transenterix produziert (▶ **Abb. 5**). SENHANCE besitzt seit 2016 die CE-Zulassung und seit 2017 das FDA-Approval [47].

Konsole Es besteht aus einer offenen Konsole mit einem brillengestützten 3D-HD-Videosystem. Der Operateur sitzt auf einem Stuhl mit Armlehne und direktem Blick auf den 3D-Monitor. Die Kontrolle der Optik erfolgt über die Augen- und Kopfbewegung (Eye-Tracking). Der Chirurg benützt Handgriffe ähnlich wie bei der konventionellen Laparoskopie mit taktilem Feedback. Damit werden in erster Linie laparoskopische Instrumente mit nur 5 Freiheitsgraden eingesetzt. Nadelhalter mit 7 Freiheitsgraden stammen von der Firma Tuebingen Scientific und sind noch im Entwicklungsstadium.

Manipulator 3 Roboterarme sind auf einzelnen Wägen montiert.

Klinische Erfahrungen Erfolgreiche Hysterektomien und Sigmaresektionen mit SENHANCE sind publiziert [4, 5, 46]. Allerdings zeigen Videoaufzeichnungen einer Hernienoperation einige ergonomische Defizite des Systems: Es fehlt offenbar ein effektives Kupplungssystem, um eine ergonomische Handhaltung des Operateurs zu garantieren [5].

REVO-I (Meerecompany): Von Samsung und der Yonsei-Universität in Seoul entwickelt. Ursprünglich mit offener Konsole wurden erste experimentelle Daten 2016 vorgestellt [48]. Das inzwischen klinisch eingesetzte System ähnelt sehr dem Da-Vinci-System.

Konsole Geschlossene Konsole mit Fußpedalen, 3D-HD-Videosystem. Alle Instrumente besitzen 7 Freiheitsgrade, wobei das Design der Endeffektoren noch etwas grob aussieht.

Manipulator 4 Roboterarme sind auf einem Wagen angeordnet.

▶ **Tab. 4** Überblick über die neuen Robotersysteme für die Laparoskopie.

Gerät und Hersteller	Kamera	Konsole	Roboterarme	Kommentar
SENHANCE (Transenterix) basierend auf Telelap ALF-X (Sofar)	3D-HD-Technologie, gesteuert über Augenbewegung	Offene Konsole: 3D-Brille, Armlehne, 2 laparoskopische Handgriffe mit taktilem Feedback	2 Arme und Kamera auf individuellen Wagen Instrumente kabelgeführt	Bisher klinisch nur 4 DOF-Instrumente im Einsatz 5-mm-Nadelhalter in Entwicklung
HUGO (Medtronic) basierend auf MiroSurge (DLR)	3D-Full-HD-Technologie, gesteuert über Handgriffe (Force Dimension)	Offene Konsole: 3D-Monitor mit Brille Handgriffe für Zeigefinger und Daumen (Force Dimension), Fußpedal für Kupplung und Koagulation	3(4) leichte motorisierte Arme (8 mm; Mikromotor) auf individuellen Wägen oder am OP-Tisch	Technologie des taktilen Feedbacks (DLR) nicht integriert
AVATERA (Avateramedical)	3D-Full- HD-Technologie, gesteuert über Handgriffe (Force Dimension)	Geschlossen Konsole: 3D-Inline-Monitor mit 2 Okularen Handgriffe für Zeigefinger und Daumen (Kupplung) Integrierter Sitz mit Fußpedalen für Koagulation	4 Arme, angeordnet auf einem Wagen	Seit 2017 experimenteller Einsatz
REVO-I (Meerecompany) in Kooperation mit Samsung	3D-HD-Technologie (Stereo-endoscope)	Geschlossene Konsole: Monitor mit 2 Handgriffen und Fußpedalen für Kupplung und Koagulation	4-Arm-System, angeordnet auf einem Wagen	2016 erste Tierversuche 2018 Einführung in Korea (Sehr ähnlich dem Da-Vinci-Design)
VERSIUS (CMR Surgical)	3D-HD-Technologie	Offene Konsole: 3D-HD-Monitor Handgriffe für Zeigefinger und Daumen, integrierter Stuhl	3 leichte, motorisierte Arme (5 mm; Mikromotor) auf Einzelwägen	Sehr ähnlich dem Miro-Surge-Design (DLR)

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

Klinische Erfahrungen Seit Ende 2017 wird in Korea eine klinische Zulassungsstudie durchgeführt.

AVATERA (Avateramedical): Entwickelt von Avateramedical in Jena in Kooperation mit Force Dimension [4, 5].

Konsole Geschlossene Konsole, bei der das 3D-HD-Videobild mittels Mikroskoptechnik über 2 Okkulare realisiert wird. Die Konsolensteuerung erfolgt mittels Sigma-7-Technologie von Force Dimension, die Umsetzung der Instrumente mit 7 Freiheitsgraden durch eine Hülsentechnologie. Es besitzt Fußpedale für die Steuerung von Koagulation und ein seitengtrenntes Kupplungssystem, das über die Handschlaufen gesteuert wird.

Manipulator 4 Roboterarme sind auf einem Wagen angeordnet.

Klinische Erfahrungen 2018 erstmals öffenlich am Modell demonstriert.

HUGO (Medtronic): Basierend auf dem 2010 publizierten System MIRO des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrttechnik wurde dieses motorengetriebene Robotersystem seit 2013 von Medtronic nach der Akquise weiterentwickelt [49].

Konsole Offene Konsole mit brillengestützter kommerzieller 3D-Videotechnik. Die Instrumentenbewegungen über Schlaufen werden ebenfalls mit der Sigma-7-Technologie von Force Dimension umgesetzt. Durch den nahezu zeitgleichen Erwerb von Covidien verfügt Medtronic über ein exzellentes Portefeuille laparoskopischer Instrumente und Endeffektoren (z. B. Ligasure).

Manipulator Während bei MiroSurge Roboterarme mit je 7 Gelenken am OP-Tisch angebracht waren, sollen die Roboterarme auf einzelnen Wägen angeordnet werden.

Klinische Erfahrungen Frühestens 2019 sind erste klinische Einsätze geplant.

Weitere Robotersysteme für die Laparoskopie

Japanese Robot (Medicaroid): Kawasaki und Sysmex haben einen Roboter entwickelt [4].

Konsole Halb offene Konsole mit Okulartechnologie.

Manipulator 3 am Operationstisch fixierte Arme.

Klinische Erfahrung Nicht vor 2020 zu erwarten.

Taurus (Verb Surgical): 2015 von Johnson & Johnson und Google Life Science gegründet. Mutmaßlich wird der Taurus Dexterious Robot die Basis dieses System sein, welches das Ergebnis einer früheren Kooperation von Ethicon und SRI International ist. SRI International war auch in die frühe Entwicklung des Da-Vinci-Systems 2000 involviert [5].

Konsole Geschlossene Konsole mit Fußpedalen. Bewegung der Arme mit 7 Freihietsgraden durch Sigma-7-Technologie (Force Dimension)

Manipulator 3 Arme werden am OP-Tisch befestigt.

Klinische Erfahrung Taurus wird gegenwärtig zur Entschärfung von Bomben eingesetzt. Von Google Life Science sollen entsprechende Algorhythmen zur Integration unterschiedlicher Informationssysteme (z. B. Bildgebung, Funktionsdaten, Fehleranalyse) kommen.

VERSIUS (Cambridge Medical Robotics): Basierend auf einer Zusammenarbeit mit Medical Micro Instruments (MMI, Pisa, Italien) wurde ein Robotersystem entwickelt, das im Design an MiroSurge erinnert [5].

Konsole Offene Konsole mit 3D-Brillen-Videotechnologie.

Manipulator 3 leichte Roboterarme, die am OP-Tisch befestigt sind. 5-mm-Instrumente mit Mikromotoren.

Klinische Erfahrung Keine, primär thorakoskopische Anwendung geplant.

Alternative Systeme für die Single-Port-Chirurgie

Auch wenn sich die Single-Port-Chirurgie in der Urologie nicht durchgesetzt hat, könnte das Verfahren für selektive Indikationen (Pyeloplastik) interessant sein [50]. Hier gibt es 2 Systeme mit klinischer Erfahrung.

SP 1098 Platform (Intuitive Surgical): Das System besitzt eine CE-Zulassung, die erste klinische Applikationen in Frankreich ermöglichte [51].

Konsole Die Steuerung der Plattform erfolgt über eine modifizierte geschlossene XI-Konsole mit einem zusätzlichen Fußpedal zur individuellen Kontrolle der Optik. Alle 4 integrierten flexiblen Arme lassen sich mit Handkupplung über die Schlaufen bewegen. Auch hier ist die Aktivierung des vierten Armes einfach möglich. Es wird eine 3D-HD-Videotechnik mit kleinerer Optik eingesetzt.

Manipulator In der Hülse mit 21 mm Außendurchmesser sind 3 teleskopartige Arme mit Gliedergelenken sowie eine Optik integriert.

Klinische Erfahrungen Neben ersten Erfahrungen mit der radikalen Prostatektomie und partiellen Nephrektomie wurde das System in Pilotstudien zur perinealen radikalen Postatektomie eingesetzt. Sicherlich sehr interessant wird das System für Anwendungen in der HNO werden.

SPORT Surgical System (Titan Medical): SPORT wurde erstmals 2016 in Boston auf dem SAGES-Kongress vorgestellt.

Konsole Es wird eine offene Konsole mit 3D-Brillen-Videotechnologie und Fußpedalen eingesetzt. Der Operateur sitzt auf einem integrierten Stuhl mit Armlehne. Steuerung der beiden Instrumente mit Schlaufentechnologie.

Manipulator In der Hülse mit 21 mm Außendurchmesser sind 2 flexible Instrumente und die bewegliche Optik integriert.

Klinische Erfahrungen Nach tierexperimentellen Erfahrungen mit der partiellen Nephrektomie liegen zuletzt auch klinische Erfahrungen mit der radikalen Prostatektomie vor [5]. Hier zeigt sich aber auch relativ weite Arbeitswinkel der flexiblen Instrumente. Außerdem wird ein weiteres laparoskopisches Instrument zur Retraktion benötigt.

Darüber hinaus sind weitere Robotersysteme für die Laparoskopie (Amadeus RSS, SOFIE, Raven, BROCA) und Single-Port-Chirurgie (ARAKNES, IREP, Nebraska-robot, Waseda-robot) erprobt worden, ohne Perspektiven für einen klinischen Einsatz [4].

Roboter für die Endourologie

Sensei-Magellan-System (Hansen Medical): Das Sensei-Magellan-System wurde für kardiologische oder angiografische Interventionen konstruiert (▶ **Abb. 6**). Es ermöglicht eine Steuerung einer Hülse, die als Schiene für einen intravasalen Katheter dient. 2011 haben Desai und Mitarbeiter das System zur Roboter-assistierten flexiblen Ureteroskopie eingesetzt [52].

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

▶ **Abb. 6** Roboter für flexible Ureterorenoskopie. **a** Sensei-Magellan: offene Konsole mit Joystick zur Steuerung der Hülse, in die das Ureteroskop fixiert ist. Kontrollmonitor für Endoskopie und Röntgendurchleuchtung. **b** Sensei-Magellan: Roboterarm, der die eingeführte Hülse im Ureter und Gefäßsystem bewegt. **c** Avicenna Roboflex: Roboterarm mit 210°-Rotation zu jeder Seite, Schablone für 4 verschiedene digitale Ureteroskope erhältlich. Das Gerät wird über eine Schleuse eingeführt, die mittels Stabilisatoren fixiert ist.

Konsole Die Hülse wird über eine offene Konsole kontrolliert, wobei das aktuelle endoskopische/radiologische Bild auf dem zentralen Monitor abgebildet ist. Ein weiterer Bildschirm ermöglicht das Einspielen zusätzlicher Daten (CT, MRT).

Manipulator Ein Joystick zur dreidimensionalen Steuerung der Hülsen. Für die robotische Ureterorenoskopie wurde ein 7,5-Ch-flexibles Ureteroskop in die Hülse eingeführt und dort fixiert. Damit konnte das Instrument passiv bewegt werden.

Klinische Erfahrungen Nach 18 Pilotfällen wurde das Projekt wieder eingestellt, da keine aktive Bewegung des flexiblen Ureteroskops möglich war [14]. Das System wird allerdings weiterhin in der interventionellen Kardiologie und Radiologie eingesetzt.

Avicenna Roboflex (Elmed): Dieses Gerät wurde speziell für die flexible Ureteroskopie entwickelt [7, 8].

Konsole Offene Konsole mit 2 speziell konfigurierten Joysticks. Links horizontaler Joystick für Insertion/Retraktion und Rotation, rechts ein Rad zur Deflexion. Über Touchscreen kann die Laserfaser bewegt und die Spülung aktiviert bzw. graduiert werden. Das endoskopische Bild wird direkt auf einem integrierten 2D-HD-Bildschirm dargestellt. Über Fußschalter lassen sich Laser- bzw. Röntgendurchleuchtung aktivieren.

Manipulator In den robotischen Arm wird das Handstück des flexiblen Ureteroskops eingelegt. Hierfür stehen 4 verschiedene Passformen für die digitalen Instrumente der wesentlichen Hersteller (Karl Storz, Olympus, Wolf, Boston Scientific) zur Verfügung. Das Ureteroskop wird durch 1 oder 2 Stabilisatoren bis zum Meatus fixiert. Der Manipulator setzt alle Bewegungen (horizontal, vertikal, Rotation, Deflexion) um.

Klinische Erfahrungen Wir haben das System bisher bei weit über 250 Patienten erfolgreich eingesetzt. Der Vorteil liegt v. a. in der besseren Ergonomie für den behandelnden Urologen, was sich v. a. bei komplizierten Fällen (Steine über 10 mm, multiplen Steinen) auswirkt.

Außerdem gibt es neue Ansätze, den Monarch-Roboter (Auris Health), der für die Bronchoskopie entwickelt wurde, auch für endourologische Indikationen einzusetzen [53].

Robotische TURP

Schon 1989 hatte die Gruppe um John Wickham einen *Roboter zur Durchführung einer transurethralen Prostataresektion (Probot)* vorgestellt [9]. Hierbei erfolgte die Morcellation der Prostata von innen mittels eines Gewebeverflüssigers. Aufgrund massiver Komplikationen (Kapselperforation, Gefäßverletzung) wurde das Projekt wieder eingestellt.

Aquablation (Procept): 2015 stellte Gilling das Konzept der transurethralen Aquablation der Prostata vor [10]. Inzwischen besitzt das Gerät eine CE-Zulassung. Hierbei handelt es sich nicht um ein Master-Slave-System, sondern die Gewebeverflüssigung erfolgt autonom durch Hydrodissektion mit einem adaptierbaren Wasserstrahl. Hierfür werden die TRUS-Daten zur individuellen Berechnung der Ablation eingesetzt. Das Gerät wird bei 12 Uhr am Blasenhals platziert und kann von dort Prostatagewebe in einem Winkel von maximal 210° abladieren. Die Ablationstiefe reicht bis maximal 3 cm und wird in der Nähe des Kollikels deutlich reduziert. Hiermit sind Ablationsgeschwindigkeiten von bis zu 5 g Prostatagewebe pro Minute möglich [54]. Es liegen inzwischen auch Erfahrungen aus Deutschland bei über 100 Patienten vor [5].

Diskussion

Die Roboter-assistierte Laparoskopie setzt sich zunehmend insbesondere im Rahmen der radikalen Prostatektomie durch [55]. Dies liegt v. a. an der eindeutig besseren Ergonomie für den Chirurgen im Vergleich zur klassischen Laparoskopie, welches eine breite Umsetzung der minimal-invasiven Chirurgie mit den bekannten Vorteilen (Reduktion des Akzesstraumas, geringes Blutungsrisiko) ermöglicht. Hinzu kommt die überlegene Nahttechnik mit praktisch eliminiertem Risiko einer Anastomosenstriktur. Ein weiteres Beispiel ist die erfolgreiche Einführung der Roboter-assistierten Lebendnierenspende [56].

Allerdings gibt es auch weiterhin klare Indikationen für die klassische Laparoskopie, insbesondere was ablative Eingriffe anbelangt. Hinzu kommt die Tatsache, dass auch für die Laparoskopie zahlreiche Entwicklungen zur Verbesserung der Ergonomie vorliegen. Daher setzen wir bei rekonstruktiven Eingriffen an der Niere immer den Ethos Chair mit Erfolg ein [36, 45]. Dies ist auch kostengünstiger. Außerdem besteht bei diesen Indikationen kein „Druck" vom Patienten. In diesem Zusammenhang spielt die 3D-Videotechnolgie nur eine untergeordnete Rolle, da der Helligkeitsverlust immer noch erheblich ist.

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

▶ **Tab. 5** Betrachtung wesentlicher Gerätemodifikationen von Operationsrobotern (nach Rassweiler 2018).

Modifikation	Beschreibung	Kommentar
Konsole ▪ geschlossen	Operateur schaut in ein Fenster/Okkular mit den Handgriffen unterhalb des Bildschirms	Operateur hat das Gefühl im Körper des Patienten zu sein Optimalste Form der 3D-Darstellung Keine 3D-Brille notwendig Zusätzliche Bildinformationen können im Bildschirm integriert werden
Konsole ▪ offen	Operateur sitzt vor dem Bildschirm mit einer 3D-Brille (mit polarsierenden Gläsern)	Bildeindruck ähnlich der klassischen Laparoskopie Besserer Kontakt zum OP-Team Einfache Kombination mit anderen externen Monitoren Einfache Umsetzung/Integration von Neuerungen (3D-Monitore; Ultra-HD-Videotechnologie)
Kamerakontrolle ▪ über Handgriffe und Fußpedal	Operateur akiviert die Kamerabewegungen über Fußpedal und kann dann die Optik mithilfe seiner beiden Handgriffe navigieren	Dadurch wandern die Instrumentenspitzen mit und befinden sich immer seitlich zur Optik. Bei Da Vinci XI kann die 30°-Optik auch von der Konsole durch Touchscreen gedreht werden und die Lage der Instrumente wird angezeigt.
Kamerakontrolle ▪ durch Augenbewegung	Die Kamera wird durch die Augen- und Kopfbewegung der Operateurs navigiert.	Keine Kameraaktivierung nötig Das System kann aber ermüdend sein. (Sprachgesteuerte Kamerabewegung nicht mehr im Handel – AESOP).
Instrumentensteuerung ▪ durch Schlaufen-artige Handgriffe	Operateur arbeitet mit Daumen und Zeigefinger (Pinzettengriff)	Bestmögliche Umsetzung der Handgelenkbewegungen Zusätzlich können an den Handgriffen noch weitere Funktionen (isoliertes Auskuppeln, Scharfstellung der Optik) integriert werden.
Instrumentensteuerung ▪ durch laparoskopische Handgriffe	Der Operateur bewegt die Instrumente mit dem Daumen und Ringfinger (Scherengriff).	Bedienung wie bei der Laparoskopie (Rotation mit dem Zeigefinger) Bisher nur mit diesem Griff haptisches Feedback Einfache Integration von Instrumenten mit 5 Freiheitsgraden

Andererseits kann der Einsatz von Kamerahalterungssystemen gerade in Verbindung mit der Ethos-Plattform vorteilhaft sein [1]. Auch die Möglichkeit des sofortigen Einsatzes miniaturisierter Instrumente und Trokare (2–3 mm) stellt einen Vorteil der Laparoskopie dar [57].

Hohe Investitions- und Unterhaltskosten behinderten in den letzten Jahren die weitere Verbreitung der Da-Vinci-Systeme. Das Auslaufen der Patentrechte im Jahr 2019 hat schon heute zu einer Dynamik auf dem Robotermarkt geführt, obwohl bisher in Europa nur ein Alternativgerät (Senhance) zur Verfügung steht [47]. Dennoch hat Intuitive Surgical die Latte für zukünftige Generation chirurgischer Roboter sehr hoch gelegt. Dies gilt auch für die enorme Belastbarkeit der Da-Vinci-Systeme. Wichtig ist hier, welche Prinzipien (Art der Konsole, Steuerung von Kamera und Instrumenten, Anordnung der Roboterarme) sich langfristig durchsetzten werden (▶ **Tab. 5**).

Wie Intuitive Surgical setzt avateramedical eine geschlossene Konsole mit entsprechender 3D-Inline-Technologie (Okular statt Spiegel) ein, während Medtronic, Transenterix und CMR Surgical eine offene Konsole bevorzugen. Neben der besseren 3D-Bildqualität vermittelt die geschlossene Konsole den Eindruck, im Körper des Patienten zu arbeiten (Immersion). Vorteil der offenen Konsole ist die schnellere Umsetzung neuer Videotechnologien (z. B. Ultra-4K-HD).

Computer Motion setzte bei AESOP und ZEUS eine sprachgesteuerte Kameraführung ein [2, 23, 25], während beim Da-Vinci-System die Kamera durch die Handbewegung des Operateurs gesteuert wird. Letzteres hat den Vorteil, dass die Instrumente damit parallel dem Arbeitsplatzwechsel folgen. Beim Senhance ist die Kamerführung durch Augenbewegung realisiert worden. Aus eigener Erfahrung mit den unterschiedlichen Systemen für die Laparoskopie (▶ **Tab. 5**) wissen wir, dass die indirekte Kameraführung das Risiko einer Fehlfunktion oder ungewollter Kamerabewegungen beinhaltet und auch ergonomisch nicht günstig ist [1].

Intuitive Surgical vertraute seit Beginn einer Schlaufen-kontrollierten Steuerung der Instrumente mit freier Beweglichkeit des Handgelenks (EndoWrist®-Technologie). Die Software hierfür stammt bei allen Master-Slave-Geräten von der schweizer Firma Force Dimension (z. B. Sigma-7-Technologie), die auch von anderen Herstellern (avateramedical, Medtronic, Titan) genutzt wird. Dabei kontrollieren Daumen und Zeigefinger den Endeffektor, was schon 1999 ergonomisch der Chopstick-artigen Instrumentensteuerung des ZEUS überlegen war [1, 23, 25]. Bei Einsatz eines laparoskopischen Scherenhandgriffs wie beim Senhance werden die Endeffektoren durch Daumen und Mittelfinger kontrolliert mit entsprechend eingeschränkter Beweglichkeit im Handgelenk, sodass nur 5 Freiheitsgrade möglich sind. Allerdings ermöglicht dieser Handgriff die Umsetzung des taktilen Feedbacks (▶ **Tab. 2**).

An der Konsole ist die Möglichkeit des Auskuppelns der Arme (Clutch-Mechanismus) entscheidend für ein ergonmisch einwandfreies Arbeiten. Primär war das beim Da Vinci 2000 und dem S-System durch ein Pedal möglich [2]. Bei der SI/XI-

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

Konsole ist jetzt ein individuelles Auskuppeln über den Zeigefinger am Schlaufensystem möglich. Dies ist jetzt auch beim Avatera realisiert. Aus unserer Sicht ist dies allerdings gewöhnungsbedürftig und wird auch von manchen Chirurgen abgeschaltet [4]. Beim Senhance ist der Kupplungsmechanismus nicht in gleichem Umfang realisiert, was an der wenig ergonomischen Handhaltung des Chirurgen während einer laparoskopischen Leistenhernienoperation oder Cholezystektomie zu erkennen ist.

ZEUS, MiroSurge, und Taurus verwende(te)n 3 am Operationstisch montierte Roboterarme. Medtronic hat beim Hugo seine Roboterarme inzwischen wie Senhance und Versius auf einzelnen Wägen arrangiert. Avatera und Revo I verwenden ein 4-Arm-Arrangement auf einem Wagen, was sich im klinischen Einsatz der Da-Vinci-Systeme sehr bewährt hat. Man kann zwar – auch aus Kostengründen – den Port für den vierten Arm mit einem klassischen laparoskopischen Instrument (Retraktor, Fasszange) bestücken, aber gerade die Beweglichkeit des Roboterarms ist hier sehr vorteilhaft und minimiert Kollisionen mit den anderen Armen. Die zusätzliche Einbindung des OP-Tisch von Trumpf Medical ist zwar eine weitere Investition (ca. 120 000 Euro), ermöglicht aber bei angedocktem Roboter die Position des Patienten zu verändern. Dies wird mit inidviduell montierten Roboterarmen nicht möglich sein, die außerdem beim Einsatz von 4 Einheiten an räumliche Grenzen stoßen.

Welche Rolle der Single-Port-Roboter in der Urologie spielen wird, ist unklar. Kaouk und Mitarbeiter konnten die Da Vinci SP 1098 Platform bei einer laparoskopischen und perinealen radikalen Prostatektomie einsetzen und Eric Barret gelang mit dem SPORT eine Single-Port radikale Prostatektomie [5, 51]. Dennoch bestehen hierbei noch signifikante ergonomische Grenzen. Gleiches gilt für eine partielle Nephrektomie in Single-Port-Technik. Der Roboter verbessert zwar die Situation im Vergleich zum VesPA-System von Intuitive Surgical [50], aber weder beim SP 1098 noch dem SPORT kommt man ohne assistierende konventionelle laparoskopische Instrumente aus.

Demgegenüber sehen wir die Perspektiven der robotischen flexiblen Ureterorenoskopie sehr positiv. Sicherlich kann ein erfahrener Endourologe auch ohne Roboter gute Ergebnisse erzielen, ähnlich wie ein guter Laparoskopiker. Dennoch besteht auch bei der flexiblen Ureterorenoskopie ein hoher Bedarf, die Ergonomie des Eingriffs zu verbessern. Der Operateur benötigt eigentlich 3 Hände zur Fixation und Manipulation des Gerätes mit anschließender Aktivierung des Lasers oder Steuerung des Fangkörbchens. Auch die gleichzeitige Bedienung der Röntgendurchleuchtung und Aktivierung des Lasers über Fußpedale ist ergonomisch ungünstig [7, 8]. Das zuerst eingesetzte Sensei-Magellan-System war nicht für die flexible Ureterorenoskopie (FURS) konzipiert und daher auch nicht geeignet [52]. Avicenna Roboflex wurde speziell für den Eingriff entwickelt, indem der Roboterarm nur die Bewegungen des Orginalinstruments steuert. Dies ist inzwischen für 4 flexible digitale Ureteroskope möglich (Karl Storz, Richard Wolf, Olympus, Boston Scientific). Aufgrund unserer Erfahrung seit mehr als 3 Jahren kann das Gerät die ergonomischen Mängel der klassischen FURS voll kompensieren. Allerdings wird der Kaufpreis eine entscheidende Rolle für die Verbreitung des Gerätes spielen.

Während Roboter für Laparoskopie, Single-Port-Chirugie und Endourologie eigentlich Master-Slave-Systeme sind, bieten die Roboter zur TRUS-gesteuerten Behandlung der Prostata (Wasserablation, HIFU) autonome Systeme an [10, 58]. Ihr Einsatzbereich muss zwar vorprogrammiert und auch observiert werden, sie ersetzen aber beim Eingriff den Operateur. Hier könnte der Chirurg erstmals an die Grenzen seiner manuellen und kognitiven Fähigkeit stoßen.

Interessenkonflikt

Jens Rassweiler war in experimentelle und klinische Studien der Firma ELMED involviert. Bei den anderen Autoren besteht kein Interessenkonflikt.

Literatur

[1] Rassweiler JJ, Teber D. Advances in laparoscopic surgery in urology. Nat Rev Urol 2016; 70: 387 – 399

[2] Rassweiler J, Binder J, Frede T. Robotic and telesurgery: will they change our future. Curr Opin Urol 2001; 11: 309 – 320

[3] Teber D, Baumhauer M, Guven EO et al. Robotics and imaging in urological surgery. Curr Opin Urol 2009; 19: 108 – 113

[4] Rassweiler JJ, Autorino R, Klein J et al. Future of robotic surgery in urology. BJU Int 2017; 120: 822 – 841

[5] Rassweiler JJ, Goezen AS, Rassweiler-Seyfried MC et al. Roboter in der Urologie – eine Analyse gegenwärtiger und zukünftiger Gerätegenerationen. Urologe A 2018; 57: 1075 – 1090

[6] Leal Ghezzi T, Campos Corleta O. 30 years of robotic surgery. World J Surg 2016; 40: 2550 – 2557

[7] Saglam R, Muslumanoglu AY, Tokatli Z et al. A new robot for flexible ureteroscopy: Development and early clinical results (IDEAL Stage 1-2b). Eur Urol 2014; 66: 1092 – 110

[8] Rassweiler J, Fiedler M, Charalampogiannis N et al. Robot-assisted flexible ureteroscopy: an update. Urolithisasis 2018; 46: 69 – 77

[9] Harris SJ, Arambula-Cosio F, Mei Q et al. The Probot – an active robot for prostate resection. Proc Inst Mech Eng H 1997; 211 : 317 – 325

[10] Gilling P, Reuther R, Kahokehr A et al. Aquablation – image-guided robot-assisted water-jet ablation. BJU Int 2016; 117: 923 – 929

[11] Kelling G. Über die Oesophagoskopie, Gastroskopie und Koelioskopie. Münch med Wschr 1901; 49: 21 – 24

[12] Semm K. Endoscopic appendicectomy. Endoscopy 1983; 15: 59 – 64

[13] Perissat J, Collet D, Belliard R. Gallstones: laparoscopic treatment – cholecystectomy, cholecystostomy, and lithotripsy. Our own technique. Surg Endoscopy 1990; 4: 1 – 5

[14] Cortesi N, Ferrari P, Zambarda E et al. Diagnosis of bilateral abdominal cryptorchidism by laparoscopy. Endoscopy 1976; 8: 33 – 34

[15] Clayman RV, Kavoussi LR, Soper NJ et al. Laparoscopic nephrectomy: initial case report. J Urol 1991; 146: 278 – 282

[16] Gaur D. Laparoscopic operative retroperitoneoscopy. J Urol 1992; 148: 1137 – 1139

[17] Rassweiler JJ, Henkel TO, Stock Ch et al. Retroperitoneale laparoskopische Nephrektomie (RLN) und andere retroperitoneoskopische Eingriffe – Technik und erste Ergebnisse. Akt Urol 1994; 25: 154 – 166

[18] Guillonneau B, Vallancien G. Laparoscopic radical prostatectomy: The Montsouris technique. J Urol 2000; 163: 1643 – 1649

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.

[19] Rassweiler J, Sentker L, Seemann O et al. Laparoskopische radikale Prostatektomie – Technik und erste Erfahrungen. Akt Urol 2000; 31: 238 – 247

[20] Rassweiler J, Godin K, Goezen AS et al. Radikale Zystektomie – pro laparoskopisch. Urologe A 2012; 51: 671 – 678

[21] Binder J, Kramer W. Robotically assisted radical prostatectomy. BJU Int 2001; 87: 408 – 410

[22] Schurr MO, Buess G, Neisius B et al. Robotics and telemanipulation technologies for endoscopic surgery. A review of the ARTEMIS project. Surg Endosc 2000; 14: 375 – 381

[23] Reichenspurner H, Damiano R, Mack M et al. Use of the voice-controlled surgical system ZEUS for endoscopic coronary bypass grafting. J Thorac Cardiovasc Surg 1999; 118: 11 – 16

[24] Mohr FW, Falk V, Diegeler A et al. Computer-enhanced coronary artery surgery. J Thorac Cardiovasc Surg 1999; 117: 1212 – 1215

[25] Marescaux J, Leroy J, Gagner M et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery. Nature 2001; 413: 379 – 380

[26] Menon M, Shrivastava A, Tewari A et al. Laparoscopic and robot assisted radical prostatectomy: establishment of a structured program and preliminary analysis of outcomes. J Urol 2002; 168: 945 – 949

[27] Imkamp F, Herrmann TR, Stolzenburg JU et al. Development of urologic laparoscopy in Germany, Austria, and Switzerland: a survey among urologists. World J Urol 2014; 32: 1363 – 1374

[28] Cicione A, Autorino R, Laguna MP et al. Three-dimensional Technology Facilitates Surgical Performance of Novice Laparoscopy Surgeons: A Quantitative Assessment on a Porcine Kidney Model. Urology 2015; 85: 1252 – 1256

[29] Bertolo R, Checcucci E, Amparore D et al. Current status of 3D Laparoscopy in urology: An ESUT systematic review and cumulative analysis. J Endourol 2018. [Epub ahead of print] doi:10.1089/end.2018.0374

[30] Tokas T, Goezen AS, Avgeris M et al. Combining of ETHOS operating ergonomic platform, three-dimensional laparoscopic camera and Radius Surgical System manipulators improves ergonomy in urologic laparoscopy: Comparison with conventioneal laparoscopy and da Vinci in a pelvi trainer. Eur Urol Focus 2017; 3: 413 – 420

[31] Rassweiler JJ, Henkel TO, Potempa DM et al. Die Technik der transperitonealen laparoskopischen Nephrektomie (TLN) – experimentelle Grundlagen und erste klinische Erfahrungen. Akt Urol 1992; 23: 220 – 228

[32] Antoniou SA, Antoniou GA, Koch OO et al. Blunt versus bladed trocars in laparoscopic surgery: a systematic review and meta-analysis of randomized trials. Surg Endosc 2013; 27: 2312 – 2320

[33] Horstmann M, Horton K, Kurz M et al. Prospective comparison between the AirSealTm System valve-less trocar and a standard VersaportPlus V2 Tm trocar in robotic-assisted radical prostatectomy. J Endourol 2013; 27: 579 – 582

[34] Gözen AS, Teber D, Rassweiler J. Principles and initial experience of a new device for dissection and hemostasis. Minimally Invasive Therapy 2007; 16: 58 – 65

[35] Fagotti A, Vizzielli G, Fanfani F et al. Randomized study comparing use of Thunderbeat vs standard electrosurgery during laparosopcic radical hysterectomy and pelvic lymphadenectomy for gynecologic cancer. J Minim Invasive Gynecol 2014; 21: 447 – 453

[36] Rassweiler JJ, Klein J, Tschada A et al. Laparoscopic retroperitoneal partial nephrectomy using an ergonomic chair: demonstration of technique and matched-pair analysis. BJU Int 2017; 19: 349 – 357

[37] Frede T, Stock C, Renner C et al. Geometry of laparoscopic suturing and knotting technique. J. Endourol 1999; 13: 191 – 198

[38] Hart S. The benefits of automated suturing devices in gynecologic endoscopic surgeries: the Endo Stitch and SILS Stitch. Surg Technol Int 2012; 22: 159 – 164

[39] Zondervan PJ, Gozen AS, Opondo D et al. Partial nephrectomy: Is there an advantage of self-retaining suture in the perioperative period? A matched case-control comparison World J Urol 2012; 30: 659 – 664

[40] Gözen AS, Tokas T, Akin Y et al. Impact of barbed suture in controlling the dorsal vein complex during laparosopic radical prostatectomy. Minim Invasive Ther Allied Technol 2014; 27: 1 – 6

[41] Roth B, Birkhäuser FD, Thalmann GN et al. Novel prototype sewing device, EndoSew®, for minimally invasive surgery: an extracorporeal construction pilot study in 10 patients. BJU Int 2012; 112: 959 – 964

[42] Frede T, Hammady A, Klein J et al. The Radius Surgical System – a new device for complex minimally invasive procedures in urology? Eur Urol 2007; 51: 1015 – 1022

[43] Wagner AA, Varkarakis M, Link RE et al. Comparison of surgical performance during laparoscopic radical prostatectomy of two robotic camera holders; EndoAssist and AESOP: A pilot study. Urology 2006; 68: 70 – 74

[44] Gözen AS, Tokas T, Tschada A et al. Comparison of operating positions and ETHOS surgical platform for laparoscopic pelvic surgery simulation. J Endourol 2015; 29: 95 – 99

[45] Rassweiler J, Klein J, Goezen AS. Retroperitoneal laparoscopic nondismembered pyeloplasty for uretero-pelvic obstruction due to crossing vessels: A matched-paired analysis and review of the literature. Asian J Urol 2018; 5: 172 – 181

[46] Jaspers JEN, Bentala M, Herder JL et al. Mechanical manipulator for intuitive control of endoscopic instruments with seven degrees of freedom. Min Invas Ther and Allied Technol 2004; 13: 191 – 198

[47] Fanfani F, Restaino S, Rossitto C et al. Total laparoscopic (S-LPS) versus TELELAP ALF-X robotic-assisted hysterectomy: a case control study. J Minim Invasive Gynecol 2016; 23: 933 – 938

[48] Kim DD, Park DW, Rha KH. Robot-assisted partial nephrectomy with the REVO I-robot platform in porcine models. Eur Urol 2016; 69: 541 – 542

[49] Hagn U, Konietschke R, Tobergte A et al. DLR Miro Surge: a versatile system for research in endoscopic telesurgery. Int J Comput Assist Radiol Surg 2010; 5: 183 – 189

[50] Buffi NM, Lughezzani G, Fossati N et al. Robot-assisted, single-site, dismembered pyeloplasty for ureteropelvic junction obstruction with the new da Vinci platform: a stage 2a study. Eur Urol 2015; 67: 151 – 156

[51] Kaouk JH, Haber GP, Autorino R et al. A novel robotic system for single-port urologic surgery: First clinical investigation. Eur Urol 2014; 66: 1033 – 1043

[52] Desai MM, Grover R, Aron M et al. Robotic flexible ureteroscopy for renal calculi: initial clinical experience. J Urol 2011; 186: 563 – 568

[53] https://www.geekfence.com/2018/03/24/monarch-is-a-new-platform-from-surgical-robot-pioneer-frederic-moll/, website visited August 30, 2018

[54] Gilling P, Barber N, Bidair M et al. WATER: A double blind, randomized controlled trial of Aquablation vs transurethral resection of the prostate in benign prostatic hyperplasia. J Urol 2018; 199: 1252 – 1261

[55] Imkamp F, Herrmann TR, Tolkach Y et al. Acceptance, prevalence and indications for robot-assisted laparoscopy – results of a survey among urologists in Germany, Austria and Switzerland. Urol Int 2015; 95: 336 – 345

[56] Breda A, Territo A, Gausa L et al. Robot-assisted kidney transplantation: The European experience. Eur Urol 2018; 73: 273 – 281

[57] Porpiglia F, Autorino R, Rassweiler J et al. Contemporary urologic mini-laparoscopy: Indications, techniques and surgical outcomes in a multi-institutional European cohort. J Endourol 2014; 28: 951 – 957

[58] Valerio M, Ahmed HU, Emberton M et al. The role of focal therapy in the management of localised prostate cancer: a systematic review. Eur Urol 2014; 66: 732 – 751

Heruntergeladen von: University of Massachusetts - Amherst. Urheberrechtlich geschützt.