

50 Jahre Minimal-invasive Chirurgie in der Urologie

50 years of minimally invasive surgery in Urology

Autoren

Jens J. Rassweiler¹, Goezen Ali Serdar¹, Jan Klein², Marie-Claire Rassweiler-Seyfried³

Institute

- 1 Klinik für Urologie und Kinderurologie der SLK Kliniken Heilbronn, Akademisches Lehrkrankenhaus der Universität Heidelberg (Ärztl. Dir.: Prof. Dr. med. J. Rassweiler)
- 2 Urologische Klinik der Universität Ulm, Ulm (Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. med. C. Bolenz)
- 3 Urologische Klinik Univeristätsklinikum Mannheim, Mannheim (Ärztl. Dir.: Prof. Dr. med. M-S. Michel)

Schlüsselwörter

minimal invasive Chirurgie, chirurgische Roboter, Laparoskopie, Endourologie, Navigation, Master-Slave Systeme, Roboter-assistierte Chirurgie, Robotische flexible Ureterskopie, Robotische TURP, Aquablation der Prostata, TUR Prostata, Laser Enucleation

Keywords

minimally invasive surgery, surgical robots, laparoscopy, endourology, Navigation, master-slave systems, robot-assisted surgery, robotic flexible ureteroscopy, robotic TURP, aquablation of the prostate, TUR prostate, laser enucleation

Bibliografie

DOI <https://doi.org/10.1055/a-0970-6982> |
 Online-Publikation: 9.10.2019 | Akt Urol 2019; 50: 593–605
 © Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
 ISSN 0001-7868

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. med. Dr. hc. mult. Jens Rassweiler, Klinik für Urologie und Kinderurologie, SLK Kliniken Heilbronn, Am Gesundbrunnen 20-24, 74074 Heilbronn
 Tel.: 07131-4924001
 Fax: 07131-494724001
jens.rassweiler@slk-kliniken.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung der Minimal-invasiven Chirurgie (MIC) in der Urologie umfasst die Teilbereiche transurethrale Techniken, Endourologie und Extrakorporale Stosswellenlithotripsie, Uroradiologie sowie Laparoskopie und Robotische Chirurgie. Basierend auf persönlichen Erfahrungen mit der Entwicklung minimal-invasiver Verfahren seit Ende der 70iger Jahren präsentieren wir eine historische Analyse der

Literatur mit dem Ziel, die wesentlichen Meilensteine der Minimal-Invasiven Therapie in der Urologie herauszuarbeiten.

Motor der rasanten Entwicklung der MIC in der Urologie war die Einführung der digitalen Videotechnologie, Lasertechnologie, Fortschritte der Elektrochirurgie begleitet von den Glanzleistungen vor allem Deutscher Technologiefirmen mit zunehmender Miniaturisierung des Instrumentariums. Bedeutsam war auch die gute Kooperation zwischen Urologen, Ingenieuren und Radiologen.

Die Laparoskopie wird trotz zahlreicher Weiterentwicklungen (3D-Prismentechnologie, ETHOS-chair) zunehmend von der Robotik ersetzt. Auf Grund der auslaufenden Patenten von Intuitive Surgical existiert seit diesem Jahr eine Konkurrenzsituation mit neuen Herstellern von Operationsrobotern. Allerdings müssen diese erst belegen, ob sie den hohen Qualitätsstandard der aktuellen Da Vinci-serie bieten können. Robotersysteme für die Endourologie werden zukünftig eine Rolle spielen, wie Avicenna Roboflex[®] für die flexible Ureterskopie und AquaBeam[®] für die roboter-assistierte Aquablation der Prostata. Während Roboflex[®] ähnlich dem Da Vinci-system die Ergonomie des Eingriffes erleichtert, ersetzt die robotergestützte Aquablation erstmals den Operateur.

ABSTRACT

The development of minimally invasive surgery (MIS) in Urology includes transurethral techniques, endourology and extracorporeal shock wave lithotripsy, uroradiology as well as laparoscopy and robot-assisted surgery. Based on personal experiences with the introduction of minimal-invasive procedures since the late seventies we present a historical analysis of the literature aiming to work out the most important milestones of MIS in Urology.

The drastic development of MIS in Urology was promoted by the introduction of digital videotechnology, laser technology, advances in electronic surgery together with the excellent performance of mainly German manufacturers of medical devices and instruments. In this scenario, the good cooperation between urologists, engineers, and interventional radiologists was of utmost importance.

The introduction of Robotics led to a decrease of importance of classical laparoscopy. Nevertheless laparoscopy and retroperitoneoscopy underwent significant technological improvements during the last decade including introduction 3D-HD-videosystems and ergonomic platforms

(ETHOS-chair[®]). The monopoly of robotic surgical devices will end this year, because key-patents of Intuitive Surgical will expire. This will lead to an interesting competition in 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. 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 flexible ureteroscopy, AquaBeam[®] may for the first time eliminate the surgeon.

Einleitung

Die letzten 50 Jahre der urologischen Forschung waren entscheidend von der Entwicklung und Etablierung der minimalinvasiven Therapie geprägt. Es begann mit der Weiterentwicklung der transurethralen Techniken sowie der Applikation radiologischer Technologie zur Nierenembolisation und einem perkutanen Zugang zur Niere in den 70er Jahren bis hin zur Einführung der Endourologie und Extrakorporalen Stosswellenlithotripsie in den 80er Jahren. In den 90er Jahren stand die Laparoskopie und Lasertechnologie im Vordergrund, was nach dem

Millenium direkt in die Etablierung der Roboter-assistierten Laparoskopie mündete. Im letzten Jahrzehnt wurden auch Robotersystem für die Endourologie und transurethrale Prostatachirurgie entwickelt, deren klinischer Einsatz sehr vielversprechend ist. Außerdem wird der Stellenwert der Virtuellen Realität zur Optimierung und Planung urologischer Eingriffe getestet (► **Tab. 1**).

► **Tab. 1** Die wesentlichen Entwicklungen in der transurethralen Therapie, Endourologie und Uro-radiologie

Verfahren	Entwicklungsschritt	Autor	Effekt
Transurethrale Resektion der Prostata und Blase (TURP/B)	Niederdrucktrokar	Reuter 1974	Weniger Blutverlust
	Dauerspülresektoskop	Iglesias 1975	Geringeres Risiko der Einschwemmung
	Video-TUR	Faul 1993	Bessere Ergonomie und Training
	Bipolare TUR	Rassweiler 2007	Kein TUR-Syndrom
	En-bloc TUR B	Kramer/Herrmann 2015	Besseres Staging
	Laserenukleation	Gilling/Kuntz 2004	Weniger Blutverlust und OP-Zeit
	Robotische Aqua-ablation	Gilling/Bach 2016	Automatisierte TUR
Ureterorenoskopie (URS) Retrograde Intrarenale Chirurgie (RIRS)	Ureterskopie	Lyon 1979	Diagnostik
	Semi-rigides URS	Perez-Castro / Reuter	Effektive Steinbehandlung
	Flexible URS	Aso/Bagley/Fuchs	Steinbehandlung in der Niere
	Robotische URS	Saglam/Rassweiler	Bessere Ergonomie
Perkutane Nephrolithotomie (PCNL)	Teleskop-Set	Alken 1981	Stufendilatation des Zugangs
	Ultraschallbohrer	Alken 1981	Steindeintegration und-absaugung
	Elektrohydraulische Lithotripsie	Wickham / Reuter 1981	Effektive Steindeintegration
	Mini-PNL	Lahme / Desai 2001	Geringeres Zugangstrauma
Extrakorporale Stosswellenlithotripsie	HM1-Lithotriptor	Chaussy 1989	Erste Behandlung am Menschen
	HM3-Lithotriptor	Eisenberger/Fuchs 1984	Erstes Seriengerät
	ESWL und PCNL	Miller 1985	Erweiterung der Indikationen
	ESWL für distalen Ureterstein	Rassweiler/Miller 1986	Erweiterung der Indikationen
Embolisation	Nierenembolisation	Kauffmann/Richter/Sommerkamp 1984	Palliative Nierentumorembolisation
	Supraselektive Nierenembolisation	Gianturco / Wallace 1981	Präoperative Nierentumorembolisation Behandlung von AV-Fisteln

Material und Methoden

Basierend auf persönlichen Erfahrungen mit minimalinvasiven Verfahren in der Urologie seit Ende der 70er Jahre haben wir eine historische Analyse der Literatur durchgeführt mit dem Ziel, die wesentlichen Meilensteine der Minimal-Invasiven Therapie in der Urologie herauszuarbeiten. Daraus soll die gegenwärtige Situation der Minimal-invasiven Therapie in der Urologie skizziert und Perspektiven für die nächsten Jahre aufgezeigt werden.

Transurethrale Techniken

Die Weiterentwicklung der transurethralen Techniken umfasste drei Aspekte: (i) die Verbesserung der Hochfrequenzgeneratoren, (ii) die Entwicklung der Niederdruckresektion und -resektoskope sowie (iii) die Einführung der Video-TUR bis hin zur heutigen HD- oder Ultra-HD-technologie (► **Abb. 1**).

Verbesserung der Hochfrequenzgeneratoren

In den 70er Jahren wurde die Resektoskope und vor allem die Hochfrequenzgeneratoren durch den Einsatz der Transistortechnologie gegenüber der vorherigen Röhrentechnologie entscheidend verbessert, da nun eine automatische Regulierung des Stromflusses ermöglicht wurde (z. B. Autocon 360, Karl Storz, Tuttlingen) [1]. Anfang des Millenniums kam die Entwicklung der die bipolare HF-technik hinzu [2]. Die monopolare Elektresektion erfolgt mit hochfrequenten Schneidestrom bei einer Leistung von maximal 200 Watt. Dies wird durch einen Mikroprozessor während der Aktivierung der Schlinge im Gewebe gesteuert, wofür eine nicht-leitende hoch-ohmige Spülflüssigkeit (z. B. Glycin-Mannit-Gemisch; Purisole, Kabi-Fresenius) benötigt wird [1, 3]. Dadurch kommt es zu einem direkten Eintritt der Stromenergie ins Gewebe mit Ableitung über die Elektrode. Bei der bipolaren Technik ist initial eine höhere Leistung erforderlich (bis zu 400W), da hier bei der Passage durch die leitende Spüllösung (0,9% NaCl) ein Lichtbogen mit entsprechender Vaporisation (Plasma) entstehen muss. Erst dann kann die Schlinge in das Gewebe eindringen. Sobald die Schlinge schneidet wird die HF-Leistung auf Werte zwischen 90 und 120W heruntergeregelte [2, 3]. Neueste HF-Generatoren erreichen dies so, dass der Urologe dies nicht mehr als Verzögerung wahrnimmt. Entscheidender Vorteil der bipolaren Technik ist das Vermeiden des klassischen TUR Syndroms mit hypertoner Hyperhydratation [4, 5].

Entwicklung der Niederdruckresektion

Bis heute kann man noch die Anwendung der Hochdruckresektion bei älteren Urologen beobachten: Die Resektion erfolgt unter Spülstrom bis die Blase voll ist und keine guten Sichtverhältnisse mehr gegeben sind. Naturgemäß führt dies zu einem hohen Anstieg des intravesikalen Druckes, was mit einem höheren Risiko der Einschwemmung von Spülflüssigkeit (TUR-Syndrom) assoziiert ist. Schon Ende der 60er Jahre wurde von Reuter ein suprapubisches Trokarsystem vorgestellt, was eine Resektion unter konstanten Druckverhältnissen ermöglichte [6]. Igelesias hat Anfang der 70er Jahre dann das Niederdruck-Re-

sektoskop mit kontinuierlichem Spülstrom publiziert, was sich inzwischen durchgesetzt hat [7].

Entwicklung der Video-TUR und Video-technologie

Schon früh hatten Reuter und Mauer Mayer zu Schulungszwecken Kamerasysteme auf die Optik des Resektoskops gesetzt, was die Handhabung des Instruments aber stark beeinträchtigte [6, 8]. Dies war auch bei den üblicherweise zur Schulung aufgesetzten Gliederoptiken der Fall. Mit Verbesserung der Video-technologie – insbesondere im Rahmen der Einführung der Laparoskopie – gelang es Faul ein praktikables System zur Video-TUR vorzustellen [9]. Inzwischen hat sich die Video-technologie im gesamten Bereich der Endourologie durchgesetzt. Hier kommt in den letzten Jahren die Einführung der HD-technologie hinzu [10]. Dies ermöglicht eine bessere Auflösung und Vergrößerung des Operationsfelds bis hin zu einem quasi-3D-effekt. Der Operateur arbeitet vor einem 28-zoll-HD-Flachbildschirm mit Wide View (16:9) im Vergleich zu den früher üblichen 13-zoll-Röhrenmonitoren (4:3), was bei besserer Bildschärfe einer Vergrößerung um den Faktor 4 entspricht (► **Abb. 1**).

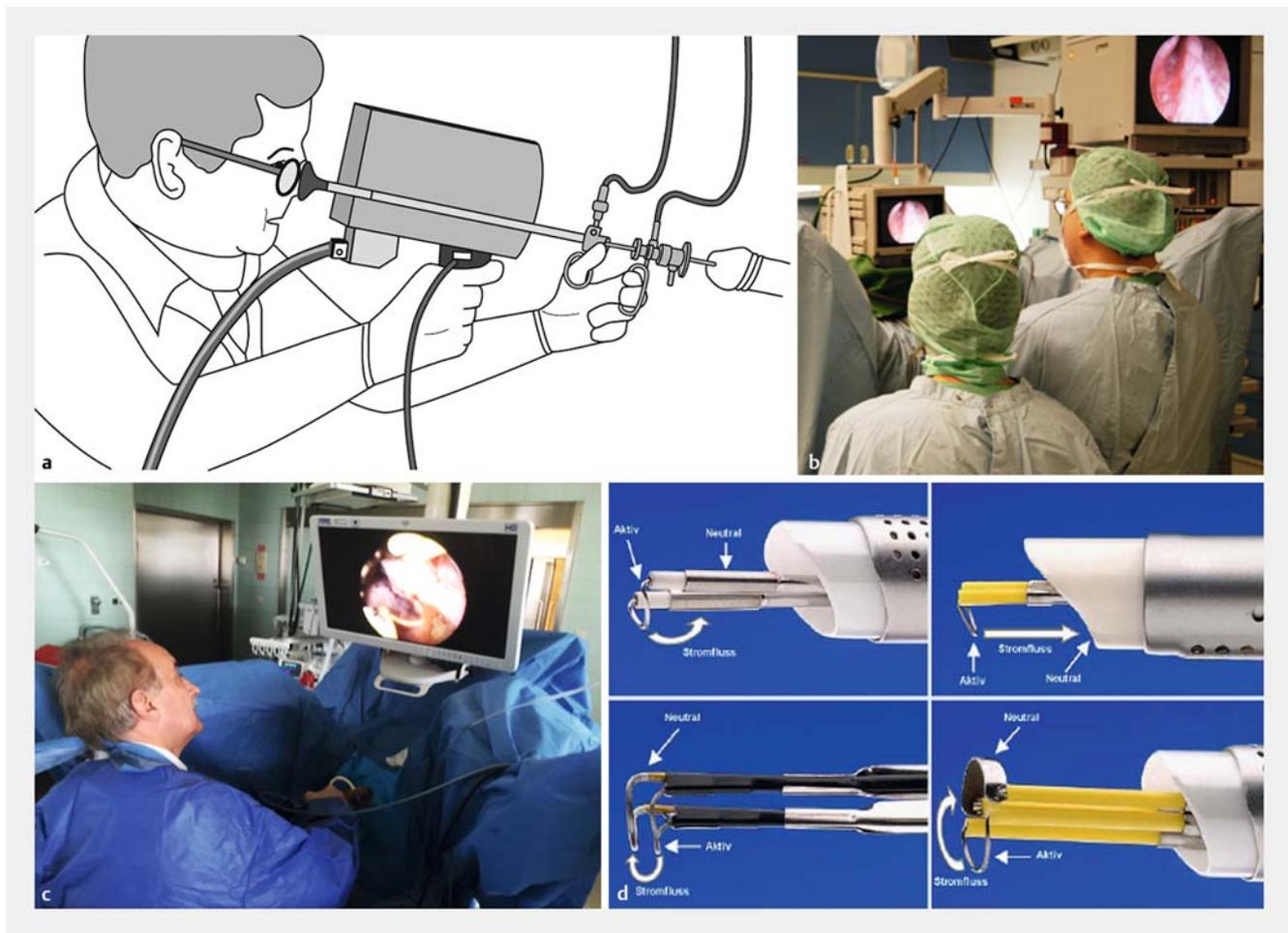
Aktuelle Situation der transurethralen Therapie

Die bipolare Resektionstechnik setzt sich zunehmend durch, insbesondere wegen des niedrigeren Risikos eines TUR-Syndroms. Allerdings haben sich die Resektionstechniken weiterentwickelt. Einseits wird für oberflächliche Blasen Tumoren zunehmend die sogenannte en-bloc Resektion des Tumors durchgeführt, wofür sich eine abgewinkelte Schlinge sehr gut eignet. Wesentlicher Vorteil ist dabei, die bessere Definition der Resektionstiefe. Theoretisch sollte auch das Risiko einer Tumorzellverschleppung erniedrigt werden. En-bloc Resektionen können auch mittels Laser oder hydraulischer Ablationstechnik (Waterjet) durchgeführt werden [11, 12].

Eine weitere Ergänzung der Resektionstechnik ist die bipolare Enukleation des Prostata-adenoms analog zur Laserenukleation mit dem Holmium-YAG oder Thulium-YAG-laser [13, 14]. Dafür werden keilförmige Resektionskissen verwendet, die sowohl mechanisch als auch elektrothermisch zur Ausschälung des Adenoms nutzbar sind. Anschließend wird das Präparat in der Blase mittels modifizierter Arthroskopie-shaver morcelliert. Die transurethrale Enukleation ist dabei, bei größeren Prostaten die TURP zu ersetzen. Im wesentlichen wegen der kürzeren Operationszeiten und dem niedrigen Blutverlust [13].

Roboter in der transurethralen Therapie

Schon 1989 hatte die Gruppe um John Wickham einen Roboter zur Durchführung einer transurethralen Prostataresektion vorgestellt [15]. Hierbei erfolgte die Morcellation der Prostata von innen mittels eines Gewebeverflüssigers. Auf Grund massiver Komplikationen (Kapselperforation, Gefäßverletzung) wurde das Projekt eingestellt. 2015 stellte Gilling das Konzept der transurethralen Aquaablation der Prostata vor [16]. 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 einge-



► **Abb. 1** Entwicklungsschritte der transurethralen Therapie [rerif] **a** Einsatz der Videokamera (Kinematographie) zu Lehrzwecken (modifiziert nach Reuter). **b** Video-TUR nach Faul mit kleinem Satelliten-Monitor über dem Patienten. **c** HD-Video-TUR mit 26 Zoll-Monitor über dem Patienten. **d** Unterschiedliche Modifikationen für eine bipolare TUR (Quelle: Rassweiler J, Schulze M, Stock C et al. Bipolar transurethral resection of the prostate - technical modifications and early clinical experience. *Minim Invasive Ther Allied Technol.* 2007; 16: 11–21; © SMIT – Society for Minimally Invasive Therapy, reprinted by permission of Taylor & Francis Ltd, <http://www.tandfonline.com> on behalf of SMIT – Society for Minimally Invasive Therapy).

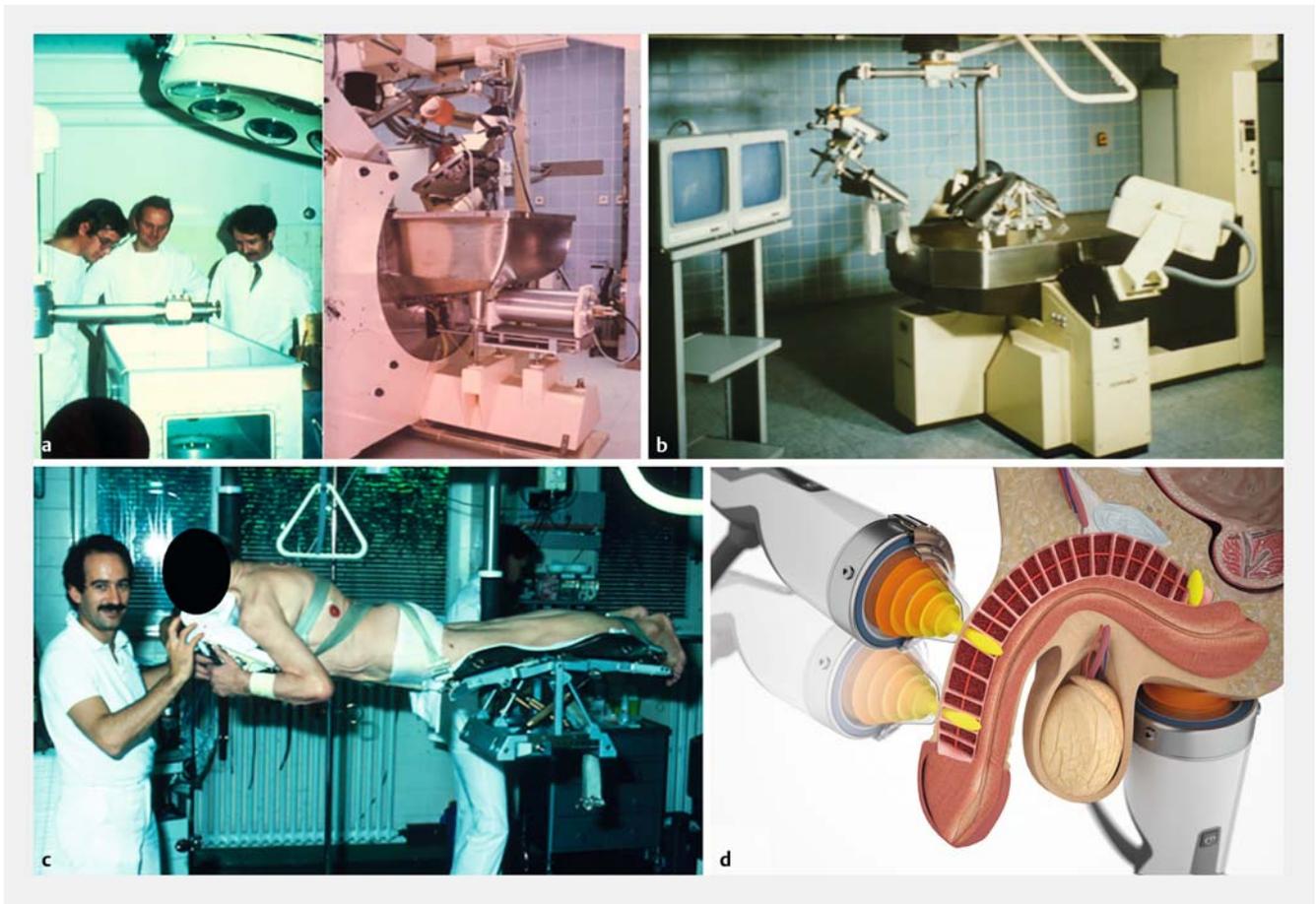
setzt. Das Gerät wird bei 12 Uhr am Blasenhalz plziert und kann von dort Prostatagewebe in einem Winkel von maximal 210° hydrodissezieren. Die Ablationstiefe reicht bis maximal 3 cm und wird in der Nähe des Kollikels deutlich reduziert. Hiermit sind Ablationsraten von bis zu 5 g Prostatagewebe pro Minute möglich [17, 18]. Bach et al. haben inzwischen auch Erfahrungen aus Deutschland bei über 100 Patienten publiziert [17]. Außerdem bestehen erste experimentelle Ansätze mittels Master-Slave-Systemen eine transurethrale Resektion von Blasen-tumoren durchzuführen [19]. Allerdings sind diese Systeme noch nicht ausgereift.

Interventionelle Uro-Radiologie

Das Ende der siebziger Jahre war außerdem geprägt von einer intensiven Kooperation zwischen Radiologen und Urologen auf dem Gebiet der interventionellen Uro-Radiologie. Als Beispiele sind die Nierentumorembolisation (präoperativ oder palliativ), die superselektive Nierenarterienembolisation aber auch die

perkutane Nierenzystenpunktion und perkutane Nephrostomie zu nennen [20, 22]. In dieser Zeit waren zahlreiche Urologen ebenfalls versiert in der Nierenangiografie, die beispielsweise beim Nierentrauma zu diagnostischen Zwecken eingesetzt wurde [23]. Operativ wurden Ballonkatheter zur In-situ-perfusion der Niere vor komplizierter Steinchirurgie eingesetzt [24].

Während die perkutanen Techniken nahezu komplett von den Deutschen Urologen mittel Ultraschall und Röntgendurchleuchtung übernommen wurden [25], blieb die Embolisation in den Händen der Radiologen. Ansätze einer kapillären Embolisation zur transarteriellen Nephrektomie auch bei benignen Erkrankungen wurden von der laparoskopischen Nephrektomie überholt [26–28]. Die Chemo-embolisation von Nierentumoren hat sich ebenfalls nicht durchgesetzt [29, 30], wird aber inzwischen beim hepatozellären Karzinom erfolgreich angewandt. Demgegenüber hat die superselektive Nierenarterienembolisation insbesondere bei Blutungskomplikationen nach perkutaner und laparoskopischer Nierenchirurgie immer noch einen hohen Stellenwert [31–33]. In jüngster Zeit ist die Pros-



► **Abb. 2** Historie der Extrakorporalen Stosswellenlithotripsie (ESWL) **a** In vitro-Versuche am Unterwassermodell (Chaussy, Eisenberger, Forssmann) und der erste klinisch eingesetzte Lithotriktor Dornier HM1 **b** Erstes Serienmodell Dornier HM3 **c** Bauchlagerung zur Behandlung von mittleren und distalen Harnleitersteinen (J.R.) **d** Extrakorporale niederenergetische Stosswellentherapie (ESWT) zur Behandlung von Induratio penis plastica (IPP) und Erektile Dysfunktion (Quelle: STORZ MEDICAL AG, Tägerwil, Schweiz)

tataembolisation zur Behandlung der benignen Prostataobstruktion hinzugekommen [34]. Außerdem spielt die CT-gesteuerte Radiofrequenzablation kleinere Nierentumore eine zunehmende Rolle bei der Behandlung von Nierenzellkarzinomen im Stadium T1a [35].

Endourologie

Die 80er Jahre waren vor allem durch die revolutionäre Änderung der Steintherapie mit Etablierung der Endourologie geprägt. Parallel wurden zum einen radiologische Techniken (Seldinger-Technik) zum perkutanen Zugang zum Nierenhohlsystem eingesetzt, die endoskopische Exploration des oberen Harntraktes durch entsprechende Miniaturisierung des Instrumentariums vorangetrieben, aber auch das Prinzip der berührungsfreien Nierensteinzertrümmerung zur klinischen Reife gebracht. Viele dieser Entwicklungen gingen von Deutschland aus: Alken standardisierte den perkutanen Zugang [25], Reuter bot Perez-Castro die Möglichkeit zur Ureterorenoskopie [36, 37], und Chaussy behandelte in München die ersten Steinpapienten am Dornier HM3 mit ESWL [38].

Die Geschichte der ESWL

Bereits Anfang der 70er Jahre führte die Arbeitsgruppe um Häusler erste in-vitro-Versuche zur Nierensteinzertrümmerung unter Verwendung eines piezo-elektrischen Systems in Homburg durch die aber wegen fehlender Unterstützung durch CE Alken abgebrochen wurden [39]. Basierend auf Erfahrungen aus der Luftfahrttechnik entwickelte Dornier Systems nahezu parallel eine Leichtgaskanone mit der eine in-vitro Zertrümmerung von Nierensteinen gelang. Dies führte zu einer langfristigen Kooperation mit der Ludwig-Maximilian Universität München. Hier führte die Arbeitsgruppe um Chaussy und Eisenberger zahlreiche experimentelle Untersuchungen zu biologischen Wirkung der Stosswelle bis hin zur erfolgreichen Destruktion implantierter Nierensteine im Hundemodell durch [40, 41]. Am 7. Februar 1980 wurde der erste Patient am Klinikum Grosshadern erfolgreich mit ESWL behandelt [38].

Erst im Oktober 1983 wurde in der Urologischen Klinik des Katharinenhospitals Stuttgart der zweite Lithotriktor installiert [42]. Die folgenden Jahre waren vom Siegeszug der ESWL weitestgehend geprägt, während zunächst die endoskopischen Alternativen (URS, PCNL) in den Hintergrund traten (► **Abb. 2**), umso

mehr als auch Harnleitersteine erfolgreich behandelt werden konnten [43–45]. Allerdings wurde schon früh die Kombination von ESWL und Endourologie insbesondere für die komplizierte Nephrolithiasis propagiert, wodurch die offene Steinchirurgie weiter zurück gedrängt wurde [46–48].

Die nächste „Entwicklungsstufe“ der ESWL umfasste in den 90 iger Jahren die Einführung neuer Geräte (Lithotriptoren der 2. und 3. Generation). Durch den Ersatz des Wasserbad durch Koppelballonsysteme wurde die Integration der ESWL in multifunktionelle endourologische Arbeitsplätze ermöglicht, teilweise auch mit zusätzlicher Ultraschallortung [49]. Die größeren Aperturen der Stosswellengeneratoren (elektromagnetisch, piezoelektrisch) ermöglichten eine schmerzärmere Applikation (z. B. in Analgesie). Allerdings führte dies langfristig zu schlechteren Desintegrationsergebnissen und einer etwa 20% höheren Wiederbehandlungsrate [50, 51].

Aktuelle Situation der ESWL

Das sich ändernde Spektrum der Steinpatienten mit einer extremen Steigerung der symptomatischen Harnleitersteine führte zu einem kontinuierlichem Abfall der ESWL-Behandlungszahlen [52]. Ureterkonkremente werden überwiegend mittels Einlage einer DJ-Schiene notfallmäßig behandelt. Bei Entfernung der Schiene kann dann der Stein mittel URS entfernt werden. Bei kleineren Nierensteinen ermöglicht die flexible Ureterorenoskopie eine Desintegration des Konkrements mittels Laserlithotripsie (intrakorporale Stosswellenlithotripsie = LISL) unter Sicht. Trotz jüngster Entwicklungen zur Verbesserung der Ankopplungstechnik und experimenteller Testung von Burst-Stosswellen, konnte dieser Abwärtstrend der ESWL bisher nicht aufgehalten werden [53, 54]. Die Stosswellentechnologie wird allerdings zunehmend zur Extrakorporalen Stosswellentherapie bei Induratio penis plastica (IPP) oder Erektile Dysfunktion (ED) eingesetzt [55, 56] (► **Abb. 2 d**).

Geschichte der Endourologie

Basierend auf ersten klinischen Versuchen der Nephroskopie über offen-operativ gelegte Nephrostomiekanäle und einer intensiven Kooperation mit dem Radiologen Rolf Günther entwickelte Peter Alken eine sichere und effektive perkutane Zugangstechnik zur Niere [25] (► **Abb. 3**). Auch John Wickham in Zusammenarbeit mit dem Radiologen Michael Kellet gelang eine ähnliche Technik [57]. Miller und Eisenberger erweiterten das Spektrum der PCNL durch die Kombination mit der ESWL, was erstmals die erfolgreiche minimalinvasive Behandlung von kompletten Ausgußsteinen ermöglichte [46, 47].

Nächste Schritte waren Anfang dieses Millenniums die zunehmende Miniaturisierung des PCNL-Instrumentariums bis hin zur Mikro-PCNL mit der sehenden Punktionsnadel („seeing needle“) von Mahesh Desai vorgestellt [58–61]. Gegenwärtig werden unterschiedliche Methoden eines navigierten Zugangs zur Niere evaluiert. Zwar hat sich vor allem die Kombination von Ultraschall und Röntgenortung klinisch bewährt [33]. Das Verfahren kann aber manchmal recht anspruchsvoll sein. Roboter-assistierte Verfahren mittels Durchleuchtungs-/CT-geführtem Arm haben sich nicht durchgesetzt. [62, 63]. Hier bietet sich inzwischen die Virtuelle Realität mit Ihren unterschiedlichen Na-

vigationstechniken an [59, 64]. Markerbasiert kann die Nierenanatomie mit dem iPad dargestellt werden [65, 66] und das Dyna-CT ermöglicht quasi in Echtzeit eine dreidimensionale Darstellung des Hohlsystems als Basis einer laser-assistierten Punktion [67]. Am vielversprechendsten scheint hier die Elektromagnetische Navigation der Punktionsnadel über einen mit dem flexiblen Ureteroskop eingebrachten Sensors zu sein. Damit ist eine exakte Punktion des gewünschten Kelchs möglich [68]. Dieses Verfahren ist kurz vor der klinischen Einführung.

Zeitgleich entwickelte sich auch die Ureterorenoskopie (URS). Hatten die ersten Ureteroskope noch eine Außendurchmesser von 12–14 Ch, so wurde bald schon das 9.5 Ch-messende semi-rigide Ureteroskop von Perez-Castro vorgestellt [37]. Grundlage des erfolgreichen Einsatzes des miniaturisierten Instrumentariums war die Implementierung der Lasertechnologie zur intrakorporalen Lithotripsie. Hier hat sich der Holmium-YAG-Laser gegenüber zahlreichen anderen Laserarten (Dye-Laser +/- Steinerkennung, fokussierender Neodym-YAG-Laser, Alexandritlaser) durchgesetzt [69–71].

Aktuelle Situation der Endourologie

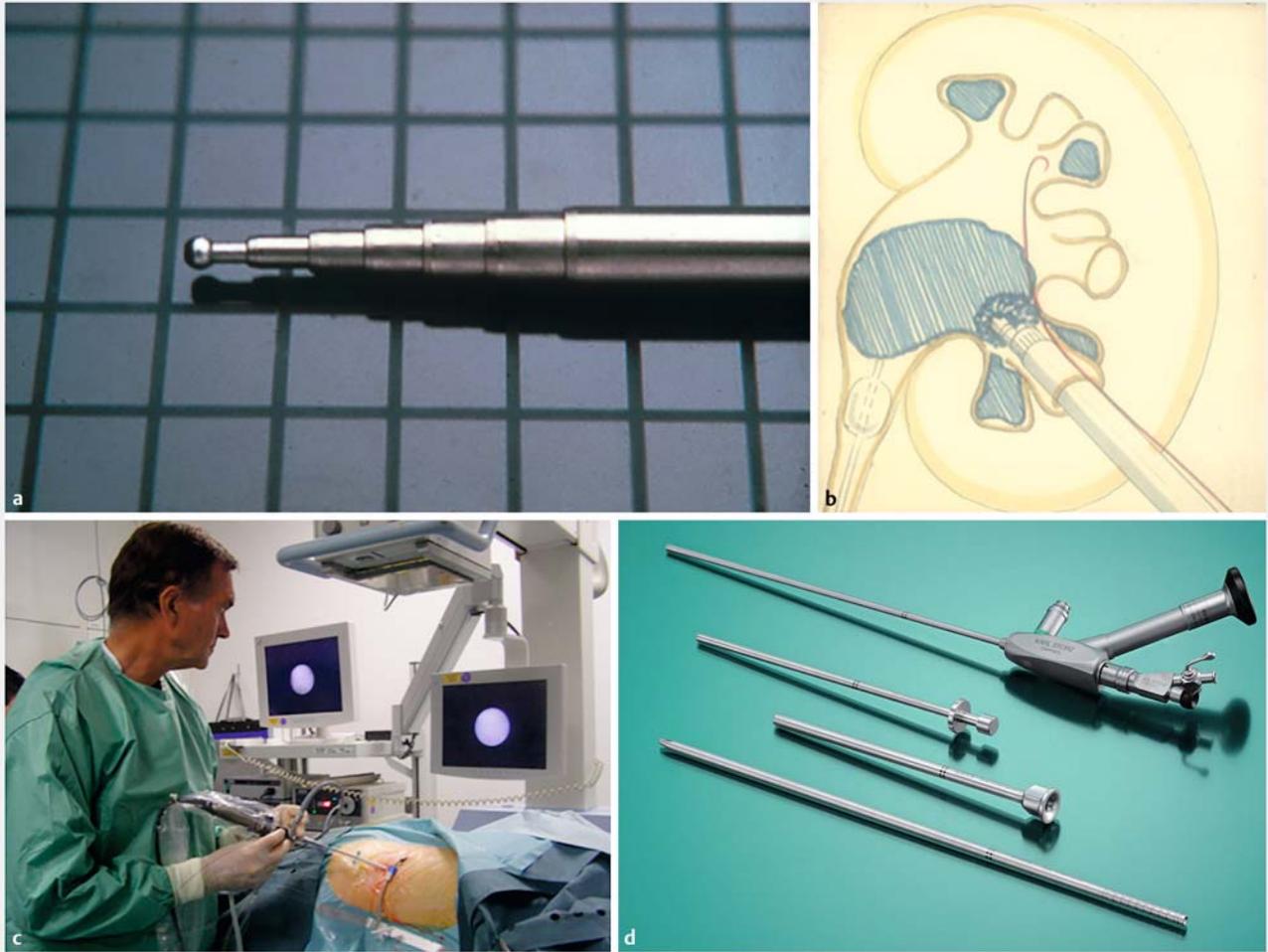
Im letzten Jahrzehnt hat die Miniaturisierung und die digitale Videotechnologie zur Dominanz der endourologischen Techniken über die ESWL geführt [52, 72, 73]. Auch mit flexiblen Ureterorenoskopen kann heutzutage unter optimaler Bildqualität der Stein lokalisiert und entsprechend behandelt werden [74]. Hier hat sich auch die Lasertechnik entscheidend weiterentwickelt: Anders als beim früheren „Smash&Go“ wird eine steinadaptierte Laserbehandlung durchgeführt bestehend aus der oberflächlichen Pulverisierung („dusting“), der systematischen Desintegration in extrahierbare Fragmente oder einer intrakorporalen Lithotripsie unter Nutzung des Jacuzzi- oder Whirlpool-effekts mit Verwirbelung der Desintegrate vor der Spitze der Laserfaser („Popcorning“). Hier ist auch die Weiterentwicklung der akkessorischen Instrumente wie Harnleiterschleuse oder Fangkörbchen aus Nitinol zu erwähnen [75].

Roboter für die Endourologie

Zuletzt kam für die flexible URS noch der Einsatz von Master-Slave Robotersystemen hinzu.

Das Sensei-Magellan-System wurde für kardiologische oder angiografische Interventionen konstruiert. Es ermöglicht die Steuerung einer Hülse, die als Schiene für einen intravasalen Katheter dient. 2011 haben Desai und Mitarbeiter das System zur roboter-assistierten flexiblen Ureterorenoskopie eingesetzt [76]. 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. Nach 18 Pilotfällen wurde das Projekt wieder eingestellt, da keine aktive Bewegung des flexiblen Ureteroskops möglich war.

Avicenna Roboflex (Elmed) wurde speziell für die flexible Ureterorenoskopie entwickelt [77, 78]. Über eine offene Konsole mit zwei speziell konfigurierten Joy-sticks wird das Endoskop gesteuert. Über Touchscreen kann auch die Laserfaser bewegt und die Spülung aktiviert bzw. graduiert werden. Das endoskopische Bild wird direkt auf integriertem 2D-HD-Bildschirm dargestellt. In den robotischen Arm wird das Handstück des flexi-



► **Abb. 3** Entwicklungsschritte der perkutanen Nephrolithotomie (PCNL) **a** Teleskopbougie-set nach Alken. **b** Perkutane Ultraschall-lithotripsie (modifiziert nach Eisenberger, Miller, Rassweiler). **c** Mini-PCNL unter Verwendung eines Kompakt-ureterskops (Peter Alken). **d** Mini-PCNL-Set (KARL STORZ SE & Co. KG).

blen Ureterskops eingelegt. Hierfür stehen vier verschiedene Passformen für die digitalen Instrumente der wesentlichen Hersteller zur Verfügung. Das Ureterskop wird durch Stabilisatoren bis zum Meatus fixiert. Der Manipulator setzt alle Bewegungen (Horizontal, vertikal, Rotation, Deflexion) um. Wir haben das System bisher bei weit über 250 Patienten erfolgreich eingesetzt. Der Vorteil liegt vor allem in der besseren Ergonomie für den behandelnden Urologen, was sich vor allem 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 [79, 80]. Hierfür wird speziell ein robotisches Ureterskop entwickelt. Gleichzeitig soll mit dem Gerät auch ein perkutaner Zugang zur Niere möglich werden.

Laparoskopie

Die Laparoskopie ist die logische Weiterentwicklung der Endoskopie. Kelling benutzte schon 1901 das Zystoskop von Nitze, um bei Tieren eine Peritoneoskopie durchzuführen [81]. Doch erst 1983 gelang dem Gynäkologen Kurt Semm eine laparoskopische Appendektomie [82]. Entscheidend für den Durchbruch der Laparoskopie waren die von Semm entwickelten Insufflorttechnologie und die Fortschritte der Videotechnologie, womit ein video-assistiertes Operieren möglich wurde (► **Tab. 2**).

In der Urologie berichteten Cortesi schon 1976 über die laparoskopische Exploration bei Kryptorchismus [83]. Der Durchbruch stellte jedoch die transperitoneale laparoskopische Nephrektomie durch Clayman dar [84]. Diese beeinflusste weltweit zahlreiche Endourologen dieses technisch anspruchsvolle Verfahren einzusetzen [85].

Gaur fügte 1992 noch die Retroperitoneoskopie als Zugangsvariante hinzu [86, 87]. Allerdings war das Indikationspektrum begrenzt, da anfangs nur benigne Nephropathien operiert wurden („a nice procedure looking for an indication“).

► **Tab. 2** Die wesentlichen Entwicklungen in der Laparoskopie und robotischen Chirurgie

Verfahren	Entwicklungsschritt	Autor	Effekt
Laparoskopische Nephrektomie	Erste transperitoneale Nephrektomie mit Morcellation der Niere	Clayman 1991	Weniger Blutverlust Weniger Schmerzen
	Retroperitonoskopische Nephrektomie	Gaur 1992	Einfacher Zugang
Laparoskopische radikale Prostatektomie	Erste transperitoneale radikale Prostatektomie	Guillonneau/Vallancien 2000	Weniger Blutverlust Weniger Schmerzen
	Extraperitoneal radikale Prostatektomie	Stolzenburg 2003	Einfacher Zugang
Roboter-assistierte radikale Prostatektomie	Erste radikale Prostatektomie	Binder 2001	Bessere Ergonomie
	Standardeingriff	Menon 2002	Trainingsprogramm auch für Nicht-Laparoskopiker
Roboter-assistiertem Single-Port radikale Prostatektomie	Mit SP 1089	Kaouk 2018	Erste Behandlung am Menschen

Nächster Meilenstein war die erfolgreiche Einführung der radikalen Prostatektomie durch Guillonneau und Vallancien im Jahr 1999, womit endlich eine zahlenmässig relevante Indikation vorlag [88]. Auch in Deutschland wurde diese Operation von zahlreichen Kliniken erfolgreich eingeführt [89, 90].

Nachteile der Laparoskopie liegen in der eingeschränkten Arbeitsergonomie des Operateurs, die zeitweise kaum ein 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 mit einer adjustierbaren Bruststütze, Fuss- und Armstützen. Auf die Fußstützen werden dann die entsprechenden Pedale für Koagulation fixiert. Der Sitz kann elektromotorisch außerdem horizontal und vertikal bewegt werden [91]. Wir setzen das System vor allem bei retroperitoneoskopischen Eingriffen wie der Nierentumorexzision oder Pyeloplastik ein [92–93]. Andere Systeme, wie LaparaSurgical befinden sich noch im Entwicklungsstadium [80, 94].

In Zukunft sind wohl auch Hybridsysteme erwarten, die Komponenten der Robotik direkt an den Operationstisch bringen. Solche Lösungen wären sicher deutlich kostengünstiger als Konsolen-basierte Robotersysteme. Letztere bieten allerdings bisher deutlich bessere Technologien zur Umsetzung rekonstruktiver laparoskopische Techniken an [80].

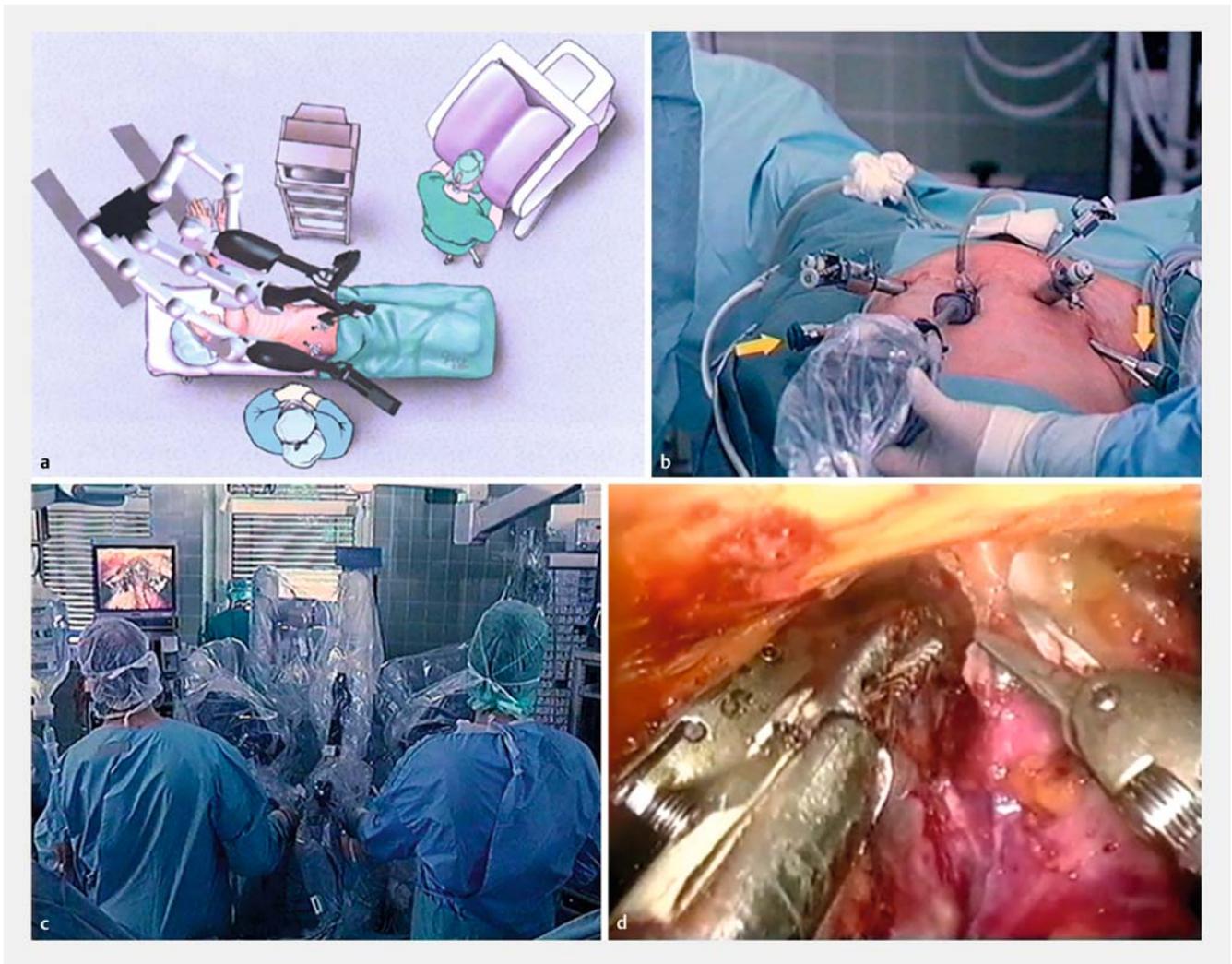
Robotische Chirurgie in der Urologie

Vor allem die technischen Schwierigkeiten der Nahttechnik stellten ein wesentliches Hemmnis für die Verbreitung der Laparoskopie dar. Dies änderte sich mit der Einführung der Robotertechnik für die radikale Prostatektomie im Jahr 2001 durch Binder [95, 96]. Gerhard Buess und Marc Schurr führten schon 1996 am Kernforschungszentrum Karlsruhe mit dem Master-slave-system ARTEMIS [22] erste Experiment durch [97]. 1999

stellten dann die amerikanischen Firmen Computer Motion (ZEUS) und Intuitive Surgical (Da Vinci) erste klinische Erfahrungen auf dem Gebiet der Herzchirurgie unter anderem am Herzzentrum in Leipzig vor [98, 99]. Dabei erwies sich das Da Vinci-System als qualitativ besser mit einer geschlossenen Konsole und 3D-Bild, schlaufengeführten Instrumenten mit 7 Freiheitsgraden und einem Kupplungsmechanismus zur Optimierung der Arbeitsposition der Hände des Operateurs (► **Abb. 4**). Das technisch weniger ZEUS-System ermöglichte allerdings eine transatlantische laparoskopische Cholezytektomie durch Marescaux [100]. Es dauerte aber dann bis ins Jahr 2006, dass Mani Menon mit einem subventionierten Trainingsprogramm die roboter-assistierte radikale Prostatektomie in den USA und später auch weltweit etablieren konnte [101]. Die nächsten Jahre waren dann von der Monopolsituation von Intuitive Surgical nach Übernahme von Computer Motion im Jahr 2003 geprägt [102]. 2019 sind wesentliche Patente bezüglich klinisch relevanter Systemkomponenten ausgelaufen, so dass inzwischen zahlreiche Firmen weltweit Konkurrenzprodukte zum Da Vinci-System entwickelt haben. Allerdings werden sich diese Neuentwicklungen am aktuell hohen Standard von Intuitive Surgical messen müssen.

Da Vinci XI – State-of-the-art

Basierend auf dem Konsolen-design des Da Vinci SI wurde das Robotersystem vor allem im Manipulatorbereich weiterentwickelt. 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 Videosystem besitzt die Möglichkeit der Fluoreszenzdiagnostik mit Isocyanin-grün. Das komplett überarbeitete Konzept der vier Roboterarme ermöglicht die Platzierung der 8mm-Stereo-optik 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 Verbin-



► **Abb. 4** Da Vinci 2000 zur roboter-assistierte radikale Prostatektomie **a** Drei Roboterarme und Konsole, nur monopolarer HF-strom. **b** Trokanranordnung mit zwei medialen Hilfs-trokaren für die Assistenz. **c** Anordnung der Assistenten während des Eingriffs (zur Retraktion, Saugung, biplarer Koagulation, Clipapplikation) **d** Endoskopisches Bild (3D-CCD) bei der Apexpräparation mit bipolarer Koagulation durch Assistenten.

dung mit dem OP-tisch von Trumpf Medical die Möglichkeit den Tisch intraoperativ bei liegenden Trokaren zu bewegen [80].

Alternative Roboter für die Laparoskopie

In der Zwischenzeit wurden mehrere Robotersysteme entwickelt die teilweise kurz vor dem klinischen Einsatz stehen. Allerdings ist gegenwärtig das Senhance (Transenterix, USA), das einzige Alternativgerät auf dem Markt. Es besteht aus einer offenen Konsole mit einem Brillen-gestützten 3D-HD-videosystem. Der Operateur sitzt auf einem Stuhl mit Armlehne und direkten Blick auf den 3D-Monitor. Die Kontrolle der Optik erfolgt über die Augen- und Kopfbewegung (Eye-tracking), was gewöhnungsbedürftig ist. Der Chirurg benützt Handgriffe ähnlich wie bei der konventionellen Laparoskopie mit taktilem Feedback. Damit werden in erster Linie laparoskopische Instrumente bedient mit nur 5 Freiheitsgraden. Nadelhalter mit 7 Freiheitsgraden entsprechen dem RADIUS-System (Tuebingen Scientific, Deutschland), wobei die Handhabung durch die

Armlehne erleichtert ist. Die Laparoskopie-Handgriffe werden über einen Fusspedal aktiviert. Üblicherweise werden drei Roboterarme eingesetzt, die auf einzelnen Wägen montiert sind [103].

In Seoul wurde Revo I (Meerecompany) entwickelt: das inzwischen klinisch exklusiv in Korea eingesetzte System ähnelt stark den Da Vinci-Systemen [104]. Das von Avateramedical in Jena produzierte System verwendet eine geschlossene Konsole bei der das 3D-HD-Videobild mittels Mikroskoptechnik über zwei Okulare realisiert wird. Es besitzt Fusspedale für die Steuerung von Koagulation und ein seitengrenntes Kupplungssystem, das über die Handschlaufen gesteuert wird. Vier Roboterarme sind auf einem Wagen angeordnet [105].

Alle anderen Systeme wie das Hugo (Medtronic / DLR; USA / Deutschland), Taurus (Verb Surgical, USA) oder Versius (Cambridge Medical Robotics; Vereingtes Königreich) sind weder tierexperimentell noch klinisch vorgestellt worden [18,80, 102,105].

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. Bisher ist in der Urologie nur die SP 1098-Plattform (Intuitive Surgical, USA) eingesetzt worden (perineale Prostatektomie, SP-Prostatektomie). Die Steuerung der Plattform erfolgt über eine modifizierte geschlossene XI-Konsole mit einem zusätzlichen Fusspedal zur individuellen Kontrolle der Optik. Alle vier 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. In der Hülse mit 21 mm Außendurchmesser sind drei Teleskopartige Arme mit Gliedergelenken sowie eine Optik integriert [106, 107].

SPORT (Titan Medical, Kanada) wurde erstmals 2016 vorgestellt. Es wird eine offene Konsole mit 3D-Brillen-Videotechnologie und Fusspedalen eingesetzt. Operateur sitzt auf integriertem Stuhl mit Armlehne. Steuerung der beiden Instrumente mit Schlaufentechnologie. In der Hülse mit 21 mm Außendurchmesser sind zwei flexible Instrumente und die bewegliche Optik integriert. Nach tierexperimentellen Erfahrungen mit der partiellen Nephrektomie und Cholezystektomie liegen zuletzt auch Erfahrungen an der Leiche mit der radikalen Prostatektomie vor [108].

Diskussion

Die Erfolgsgeschichte der minimalinvasiven Urologie

Es ist bemerkenswert, wie stark die minimalinvasive Chirurgie (MIC) die operative Urologie in den letzten 50 Jahren verändert hat. MIC profitiert dabei von einer Vielzahl von technischen Erneuerungen, insbesondere von der digitalen Revolution (► **Tab. 1**). In erster Linie ist hier die Entwicklung der Videotechnologie beschleunigt durch die Unterhaltungsindustrie zu nennen. Dies ermöglicht ein entspanntes Arbeiten vor dem entsprechenden Monitor, der gleichzeitig optimal für Trainingszwecke eingesetzt werden kann. Mit dem Full-HD ist hier vor allem im transurethralen Bereich eine Bildqualität erreicht, die für alle wesentlichen Eingriffe ausreicht. Es erscheint fraglich, ob die 4K-Technologie mit entsprechend dimensionierten Bildschirm weitere Vorteile bringen wird.

Elektrophysiologie und Lasertechnik haben ebenfalls entscheidend zum Erfolg der Endourologie beigetragen. Bipolare HF-schlingen und -vaporisationssonden haben das Blutungsrisiko und Einschwemmungsrisiko der TUR entscheidend reduziert. Lasersonden haben eine Miniaturisierung der Ureterskopie und Nephroskope unter Erhalt einer effektiven intrakorporalen Laserlithitripsie ermöglicht.

Perspektiven der Laparoskopie und Robotik

Die Videotechnik war auch die Grundlage für die Etablierung der Laparoskopie zusammen mit der Insufflatortechnologie. Hier konnte schließlich gezeigt werden, dass fast das gesamte Spektrum der offen-operativen Urologie laparoskopisch umgesetzt werden konnte, der eigentliche Durchbruch der Laparo-

skopie erfolgt jedoch mit dem Einsatz der robotischen Master-Slave-Systeme. Dies liegt vor allem an der eindeutig besseren Ergonomie für den Chirurgen im Vergleich zur klassischen Laparoskopie, welches eine breite Umsetzung der minimalinvasiven Chirurgie mit den bekannten Vorteilen (Reduktion des Akzestraumas, geringes Blutungsrisiko) ermöglicht. Hinzu kommt die überlegene Nahttechnik mit praktisch eliminiertem Risiko einer Anastomosenstriktur. Ein gutes Beispiel ist die erfolgreiche Einführung der roboter-assistierten Lebendnierenspende [109].

Allerdings gibt es auch weiterhin klare Indikationen für die klassische Laparoskopie, insbesondere was ablativ Eingriffe angeht. Hinzu kommt die Tatsache, dass auch für die Laparoskopie zahlreiche Entwicklungen zur Verbesserung der Ergonomie, wie der ETHOS-chair vorliegen. In diesem Zusammenhang spielt die 3D-Videotechnologie nur eine untergeordnete Rolle, da der Helligkeitsverlust immer noch erheblich ist. Allerdings kann sich dies mit dem Einsatz der Primentechnologie für 30°-Optiken (Olympus, Hamburg) beziehungsweise die Verwendung von 3D-Monitoren (Realvision, Sesto Calende, Italien).

Hohen 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. 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 durchsetzen werden.

Welche Rolle der Single-Port-Roboter in der Urologie spielen wird bleibt unklar. Kaouk und Mitarbeiter konnten die Da Vinci SP 1098-Plattform[®] bei einer laparoskopischen und perinealen radikalen Prostatektomie einsetzen und Eric Barret gelang mit dem SPORT[®] eine Single-Port radikale Prostatektomie an der Leiche [106–108]. Dennoch bestehen bestehen hierbei noch signifikante ergonomische Grenzen.

Perspektiven der Robotersysteme für die transurethrale Chirurgie

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 drei 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. Auf Grund unserer Erfahrung seit mehr als drei Jahren kann das Gerät die ergonomischen Mängel der klassischen FURS voll kompensieren [78]. Allerdings wird der Kaufpreis eine entscheidende Rolle für die Verbreitung des Gerätes spielen. Interessant ist, dass die Firma Auris, Hersteller des Monarch Systems, inzwischen von Johnson&Johnson gekauft wurde.

Während Roboter für Laparoskopie, Single-Port-chirurgie und Endourologie eigentlich Master-Slave-Systeme sind, bieten die Roboter zur TRUS-gesteuerten Behandlung der Prostata (Wasserablation, HIFU) autonome Systeme an [80]. 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.

Die Zeitlinie für Innovationen in der Urologie

Sicherlich erleben wir alle im „digitalen Zeitalter“ eine Explosion der Informationen: Unser Wissen soll sich in weniger als 15 Jahren verdoppeln, die Informationen im Internet vermehren sich jährlich um 30%. Von 1950 bis 2000 ist die Anzahl der Wissenschaftler von 10 auf 100 Millionen angestiegen. Wir müssen aber zwischen Quantität und Qualität der Information unterscheiden. Nur wenige dieser Wissenschaftler werden später als bedeutend anerkannt. Betrachtet man die Innovationszyklen in der Urologie, werden wir mit einem weiteren abbremsenden Phänomen konfrontiert. Obwohl die damaligen Pioniere völlig im Recht und damit vor ihrer Zeit waren, hat es 8–10 Jahre gedauert, bis ihre Innovation allgemein anerkannt wurde.

Christian Chaussy publizierte seine ersten experimentellen Ergebnisse 1976 [40], sein erster Abstract auf der AUA 1980 wurde nicht akzeptiert, und 1986 wurde die ESWL Standard in the Behandlung des Harnsteinleidens. 1991 veröffentlichte Ralph Clayman die erste laparoskopische Nephrektomie, die in den folgenden Jahren als eine nette Technik, die noch ihre Indikation sucht, kritisiert wurde, und schließlich 2004 als erste Behandlungsoption beim T2-Nierenzellkarzinom in den EAU-guidelines zitiert wurde [84]. 2001 führte Jochen Binder die erste Robotische radikale Prostatektomie durch, aber es dauerte bis 2009, dass sie sich basierend auf dem Trainingskonzept von Mani Menon durchsetzte [96].

So können wir nun wieder über den nächsten „Game changer“ in der MIC spekulieren: Meine persönlichen Favoriten sind die roboter-assistierte Endourologie, endoskopische Chirurgie assistiert durch künstliche Intelligenz oder Bildgebung und die Fokale Therapie von Prostata- und Nierentumoren.

Interessenkonflikt

Jens Rassweiler war in experimentelle und klinische Studien der Firma ELMED involviert. Die Firma Karl Storz unterstützt ein laparoskopisches Trainingszentrum an den SLK Kliniken. Bei den anderen Autoren besteht kein Interessenkonflikt.

Literatur

- [1] Haupt G, Pannek J, Benkert S et al. Transurethral resection of the prostate with microprocessor controlled electro-surgical unit. *J Urol* 1997; 158: 497
- [2] Rassweiler J, Schulze M, Stock C et al. Bipolar transurethral resection of the prostate - technical modifications and early clinical experience. *Minimally Invasive Therapy* 2007; 16: 11–21
- [3] Barba M, Fastenmeier K, Hartung R. Electrocautery: Principles and practice. *J Endourol* 2003; 17: 541–555
- [4] Rassweiler J, Teber D, Kuntz R et al. Complications of transurethral resection of the prostate (TURP) - incidence, management, and prevention. *Eur Urol* 2006; 50: 969–980
- [5] Mamoulakis C, Skolarikos A, Schulze M et al. Results from an international multicentre double-blind randomization controlled trial on the perioperative efficacy and safety of bipolar vs monopolar transurethral resection of the prostate. *BJU Int* 2012; 109: 240–248
- [6] Reuter HJ, Jones LW. Physiologic low pressure irrigation for transurethral resection for transurethral resection: suprapubic trocar drainage. *J Urol* 1974; 111: 210–213
- [7] Iglesias JJ, Stams UK. Das neue Iglesias-Resektoskop. *Urologe A* 1975; 14: 229–231
- [8] Mauermayer W, Hartung R. Filmaufnahmen von offenen Operationen mit einem neuen TUR-Videosystem. *Urologe A* 1981; 20: 102–104
- [9] Faul P. Video-TUR: raising the gold standard. *Eur Urol* 1993; 24: 256–261
- [10] Muschter R, Reich O. Operative und instrumentelle Therapie bei BPH/BPS. *Urologe A* 2008; 47: 155–165
- [11] Kramer MW, Rassweiler JJ, Klein J et al. En bloc resection of urothelium carcinoma of the bladder (EBRUC): a European multicenter study to compare safety, efficacy, and outcome of laser and electrical en bloc transurethral resection of bladder tumor. *World J Urol* 2015; 33: 1937–1943
- [12] Kramer MW, Altieri V, Hurie R et al. Current evidence of transurethral en-bloc resection of nonmuscle invasive bladder cancer: Update 2016. *Eur Urol Focus* 2017; 3: 567–576
- [13] Miernik A, Gross AJ, Schoeb DS et al. Endoskopische Enucleation der Prostata. *Urologe A* 2019; 58: 437–450 epub ahead of print
- [14] Rassweiler J, Roder M, Schulze M et al. Transurethrale Laserenukleation der Prostata mit dem Holmiumlaser: Wieviel Leistung ist nötig? *Urologe A* 2008; 47: 441–448
- [15] 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
- [16] Gilling P, Reuther R, Kahokehr A et al. Aquablation – image-guided robot-assisted water-jet ablation. *BJU Int* 2016; 117: 923–929
- [17] Bach T, Giannakis I, Bachmann A et al. Aquablation of the prostate: single-center results of a non-selected, consecutive patient cohort. *World J Urol* 2018: doi:10.1007/s00345-018-2509-y [Epub ahead of print]
- [18] 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
- [19] Pickens RB, Bajo A, Simaan N et al. A pilot ex vivo evaluation of a telerobotic system for transurethral intervention and surveillance. *J Endourol* 2015; 29: 231–234
- [20] Fernström I, Johansson B. Percutaneous pyelolithotomy: A new extraction technique. *Scand J Urol Nephrol* 1976; 4: 257
- [21] Kauffmann GW, Wenz W, Rohrbach R et al. Renal embolization – Indications and material. *Ann Radiol* 1981; 24: 386–389
- [22] Kauffmann GW, Rohrbach R, Richter G et al. Fortschritte, Erfahrungen und Komplikationen. *Urologe A* 1984; 23: 109–116

- [23] Rassweiler J, Eisenberger F, Buck J. Stumpfes Nierentrauma – operative oder konservative Therapie? *Unfallchirurgie* 1983; 9: 274–279
- [24] Eisenberger F, Schmiedt E, Pfeifer KJ et al. In-situ Perfusion und Kühlung der Niere beim Ausgußstein. *Münch Med Wochenschr* 1973; 115: 404–449
- [25] Alken P, Hutschenreiter R, Günther M et al. Percutaneous stone manipulation. *J Urol* 1981; 125: 463–466
- [26] Kauffmann GW, Rassweiler J, Richter G et al. Capillary embolization with Ethibloc: New embolization concept tested in dog kidneys. *Amer J Roentgen* 1981; 137: 1163–1168
- [27] Rassweiler J, Kauffmann GW, Richter G et al. Experimental basis of angioinfarction for the treatment of renal hypertension. *Urol Int* 1986; 41: 42–56
- [28] Rassweiler J, Kauffmann G, Jäger R et al. Die kapilläre Embolisierung mit Ethibloc bei renaler Hypertonie - eine Alternative zur Nephrektomie. Tierexperimentelle Untersuchungen am Hochdruckmodell der Ratte. *Akt Urol* 1984; 15: 1–8
- [29] Gebreamlact T, Kurzidem M, Tesdal IK et al. Efficacy and limitation of capillary chemoembolization with Ethibloc/Mitomycin C in a renal cell carcinoma with thrombus in vena cava (stage III). *Akt Urol* 1997; 28: 174–177
- [30] Rassweiler J, Prager P, Haferkamp A et al. Transarterial nephrectomy: the current status of experimental and clinical studies. *J Endourol* 2008; 22: 767–782
- [31] Fichtner J, Swoboda A, Hutschenreiter G et al. Percutaneous embolisation of the kidney: indications and clinical results. *Akt Urol* 2003; 34: 475–477
- [32] Gallucci M, Guaglianone S, Carpanese L et al. Superselective Embolization as first step of laparoscopic partial nephrectomy. *Urology* 2007; 69: 642–646
- [33] Michel MS, Trojan L, Rassweiler JJ. Complications in percutaneous nephrolithotomy. *Eur Urol* 2007; 51: 899–906
- [34] Zumstein V, Betschart P, Vetterlein MW et al. Prostatic Artery Embolization versus Standard Surgical Treatment for Lower Urinary Tract Symptoms Secondary to Benign Prostatic Hyperplasia: A Systematic Review and Meta-analysis. *Eur Urol Focus* 2018; doi:10.1016/j.euf.2018.09.005
- [35] Sommer CM, Lemm G, Hohenstein E et al. CT-guided bipolar and multipolar radiofrequency ablation (RF ablation) of renal cell carcinoma: specific technical aspects and clinical results. *Cardiovasc Interv Radiol* 2013; 36: 731–737
- [36] Reuter HJ. Transurethrale Ultraschalllithotripsie im Ureter. *Akt Urol* 1984; 15: 28–31
- [37] Perez-Castro Ellendte, Martinez-Pinero JA. Ureteral and renal endoscopy. *Eur Urol* 1982; 8: 258–260
- [38] Chaussy C, Schmiedt E, Jocham D et al. First clinical experience with extracorporeally induced destruction of kidney stones by shock waves. *J Urol* 1982; 127: 417–420
- [39] Häusler E, Kiefer W. Nierensteinerzrümmerung mit geführten Stosswellen. *Ann Univ Saraviensis* 1974; (Verh Ber Dt Ges Phys) 11: 150–159
- [40] Eisenberger F, Chaussy C, Wanner K. Extrakorporale Anwendung von hochenergetischen Stoßwellen. Ein neuer Aspekt in der Behandlung des Harnsteinleidens. *Akt Urol* 1977; 8: 3–15
- [41] Chaussy C, Eisenberger F, Wanner K et al. Extrakorporale Anwendung von hochenergetischen Stoßwellen. Ein neuer Aspekt in der Behandlung des Harnsteinleidens (Teil 2). *Akt Urol* 1978; 9: 95–102
- [42] Fuchs G, Miller K, Rassweiler J et al. Extracorporeal shock wave lithotripsy: one-year experience with the Dornier lithotripter. *Eur Urol* 1985; 11: 145–149
- [43] Rassweiler J, Hath U, Lutz K et al. In-situ ESWL beim distalen Harnleiterstein – das Ende der Zeiss-Schlinge? *Akt Urol* 1986; 17: 328–331
- [44] Eisenberger F, Rassweiler J. Extrakorporale Stoßwellenlithotripsie im Wandel. *Akt Urol* 1986; 17: 229–233
- [45] Rassweiler J, Lutz K, Gumpinger R et al. The efficacy of in-situ ESWL for upper ureteral calculi. *Eur Urol* 1987; 13: 32–36
- [46] Miller K, Fuchs G, Bub P et al. Kombination von perkutaner Nephrolithotomie (PCN) und extrakorporaler Stoßwellenlithotripsie – eine neue Möglichkeit der Behandlung von Nierensteinen. *Akt Urol* 1984; 15: 317–321
- [47] Eisenberger F, Fuchs G, Miller K et al. Extracorporeal shockwave lithotripsy (ESWL) and endourology: an ideal combination for the treatment of kidney stones. *World J Urol* 1985; 3: 41–47
- [48] Rassweiler J, Gumpinger R, Miller K et al. Multimodal treatment of complicated renal stone disease. *Eur Urol* 1986; 12: 294–304
- [49] Rassweiler J, Westhauser A, Bub P et al. Second-generation lithotripters: A comparative study. *J Endourology* 1988; 2: 193–203
- [50] Rassweiler J, Gumpinger R, Bub P et al. Efficacy and range of indications. *Eur Urol* 1989; 16: 1–6
- [51] Rassweiler J, Henkel TO, Köhrmann KU et al. Lithotripter technology: Present and future. *J Endourol* 1992; 6: 1–13
- [52] Knoll T, Fritsche HM, Rassweiler J. Medizinische und ökonomische Aspekte der ESWL. *Akt Urol* 2011; 42: 363–367
- [53] Rassweiler JJ, Knoll T, Köhrmann KU et al. Shock wave technology and application – an update. *Eur Urol* 2011; 59: 784–796
- [54] Schnabel MJ, Brummeisl W, Burger M et al. Stosswellenlithotripsie in Deutschland: Ergebnisse einer bundesweiten Umfrage. *Urologe A* 2015; 54: 1277–1282
- [55] Abdel-Salam Y, Budair Z, Renner C et al. Treatment of Peyronie's Disease by Extracorporeal Shockwave Therapy: Evaluation of our preliminary results. *J Endourol* 1999; 13: 549–552
- [56] Rassweiler J. Re: Extracorporeal shock wave therapy (ESWT) in Urology: A systematic review of outcome in Peyronie's disease, erectile dysfunction, and chronic pain. (Words of Wisdom). *Eur Urol* 2018; 74: 115–117
- [57] Wickham JE, Kellet MJ. Percutaneous nephrolithotomy. *BJU* 1981; 53: 297–299
- [58] Desai M. Ultrasonography-guided punctures - with and without puncture guide. *J Endourol* 2009; 23: 1641–1643
- [59] Rassweiler J, Rassweiler M-C, Klein J. New technology and percutaneous nephrolithotomy. *Current Opin Urol* 2016; 26: 95–106
- [60] Heinze A, Goezen AS, Rassweiler J. Tract sizes in percutaneous nephrolithotomy: does miniaturization improve outcome. *Curr Opin Urol* 2019; 29: 118–123
- [61] Häcker A, Bachmann A, Herrmann T et al. Operative Technik der perkutanen Nephrolithotomie. *Urologe A* 2016; 55: 1375–1386
- [62] Su LM, Stoianovici D, Jarrett TW et al. Robotic percutaneous access to the kidney: comparison with standard manual access. *J Endourol* 2002; 16: 471–475
- [63] Pollok R, Mozer P, Guzzo TJ et al. Prospects in percutaneous ablative targeting: comparison of a computer-assisted navigation system and the AcuBot robotic system. *J Endourol* 2010; 24: 1269–1272
- [64] Baumhauer M, Feuerstein M, Meinzer HP et al. Navigation in endoscopic soft tissue surgery – perspectives and limitations. *J Endourol* 2008; 22: 751–766
- [65] Rassweiler JJ, Müller M, Fangerau M et al. iPad-assisted percutaneous access to the kidney using marker-based navigation: initial clinical experience. *Eur Urol* 2011; 61: 628–631
- [66] Rassweiler-Seyfried MC, Rassweiler JJ, Weiss C et al. iPad-assisted percutaneous nephrolithotomy (PCNL): a matched pair analysis compared to standard PCNL. *World J Urol* 2019; doi:10.1007/s00345-019-02801-y [Epub ahead of print]

- [67] Ritter M, Rassweiler MC, Michel MS. The Uro Dyna-CT Enables Three-dimensional Planned Laser-guided Complex Punctures. *Eur Urol* 2015; 68: 880–884
- [68] Rodrigues PL, Vilaça JL, Oliveira C et al. Collecting system percutaneous access using real-time tracking sensors: first pig model in vivo experience. *J Urol* 2013; 190: 1932–1937
- [69] Rassweiler J, Irion U, Strauss R et al. Technical considerations using a pulsed Neodym-YAG laser for endoscopic shock wave lithotripsy. *Eur Urol* 1989; 16: 374–377
- [70] Rassweiler J, Henkel T, Tschada R et al. Interdisciplinary experience with the Lithognost: Impact of optical feedback-controlled stone detection in lasertripsy. *J Endourol* 1992; 6: 233–237
- [71] Kronenberg P, Traxer O. Update on Lasers in Urology. Current assessment on holmium:yttrium-aluminum-garnet (Ho:YAG) laser lithotripter settings and laser fibers. *World J Urol* 2015; 33: 1030–1035
- [72] Neisius A, Lipkin ME, Rassweiler JJ et al. Shock wave lithotripsy: The new phoenix? *World J Urol* 2015; 33: 213–221
- [73] Klein J, Netsch C, Sievert KD et al. Extrakorporale Stosswellenlithotripsie. *Urologe A* 2018; 57: 463–473
- [74] Gross AJ, Rassweiler J, Sievert KD et al. Ureterorenoskopie. *Urologe A* 2017; 56: 395–404
- [75] Secker A, Rassweiler J, Neisius A. Future perspectives of flexible ureteroscopy. *Curr Opin Urol* 2019; 29: 113–117
- [76] Desai MM, Grover R, Aron M et al. Robotic flexible ureteroscopy for renal calculi: initial clinical experience. *J Urol* 2011; 186: 563–568
- [77] 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: 1092–1110
- [78] Rassweiler J, Fiedler M, Charalampogiannis N et al. Robot-assisted flexible ureteroscopy: an update. *Urolithiasis* 2018; 46: 69–77
- [79] <https://www.geekfence.com/2018/03/24/monarch-is-a-new-platform-from-surgical-robot-pioneer-frederic-moll/>
- [80] Rassweiler J, Goetzen AS, Klein J-T et al. Zukunft der Laparoskopie und Robotik in der Urologie. *Akt Urol* 2018; 49: 488–499
- [81] Kelling G. Über die Oesophagoskopie, Gastroskopie und Koelioskopie. *Münch med Wschr* 1901; 49: 21–24
- [82] Semm K. Endoscopic appendectomy. *Endoscopy* 1983; 15: 59–64
- [83] Cortesi N, Ferrari P, Zambarda E et al. Diagnosis of bilateral abdominal cryptorchidism by laparoscopy. *Endoscopy* 1976; 8: 33–34
- [84] Clayman RV, Kavoussi LR, Soper NJ et al. Laparoscopic nephrectomy: initial case report. *J Urol* 1991; 146: 278–282
- [85] 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
- [86] Gaur D. Laparoscopic operative retroperitoneoscopy. *J Urol* 1992; 148: 1137–1139
- [87] 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
- [88] Guillonneau B, Vallancien G. Laparoscopic radical prostatectomy: The Montsouris technique. *J Urol* 2000; 163: 1643–1649
- [89] Rassweiler J, Sentker L, Seemann O et al. Laparoskopische radikale Prostatektomie – Technik und erste Erfahrungen. *Akt Urol* 2000; 31: 238–247
- [90] Rassweiler J, Stolzenburg J, Sulser T et al. Laparoscopic radical prostatectomy – the experience of the German Laparoscopic Working Group. *Eur Urol* 2006; 49: 113–119
- [91] Tokas T, Goetzen AS, Avgeris M et al. Combining of ETHOS operating ergonomic platform, three-dimensional laparoscopic camera and Radium Surgical System manipulators improves ergonomics in urologic laparoscopy: Comparison with conventional laparoscopy and da Vinci in a pelvi trainer. *Eur Urol Focus* 2017; 3: 413–420
- [92] 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; 119: 349–357
- [93] Rassweiler J, Klein J, Goetzen AS. Retroperitoneal laparoscopic non-dismembered 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
- [94] 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
- [95] Rassweiler J, Binder J, Frede T. Robotic and telesurgery: will they change our future. *Curr Opin Urol* 2001; 11: 309–320
- [96] Binder J, Kramer W. Robotically assisted radical prostatectomy. *BJU Int* 2001; 87: 408–410
- [97] 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
- [98] 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
- [99] Mohr FW, Falk V, Diegeler A et al. Computer-enhanced coronary artery surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1999; 117: 1212–1215
- [100] Marescaux J, Leroy J, Gagner M et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature* 2001; 413: 379–380
- [101] 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
- [102] Rassweiler JJ, Autorino R, Klein J et al. Future of robotic surgery in urology. *BJU Int* 2017; 120: 822–841
- [103] Darwich I, Stephan D, Klöckner-Lang M et al. A roadmap for robotic-assisted sigmoid resection in diverticular disease using a Senhance™ Surgical Robotic System: results and technical aspects. *J Robot Surg* 2019; doi:10.1007/s11701-019-00980-9 [Epub ahead of print]
- [104] 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
- [105] 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
- [106] 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
- [107] Kaouk J, Garisto J, Eltemamy M et al. Step-by-step technique for single-port robot-assisted radical cystectomy and pelvic lymph nodes dissection using the da Vinci® SP™ surgical system. *BJU Int* 2019; doi:10.1111/bju.14744 [Epub ahead of print]
- [108] Seeliger B, Diana M, Ruurda JP et al. Enabling single-site laparoscopy: the SPORT platform. *Surg Endosc* 2019; doi:10.1007/s00464-018-06658-x [Epub ahead of print]
- [109] Breda A, Territo A, Gausa L et al. Robot-assisted kidney transplantation: The European experience. *Eur Urol* 2018; 73: 273–281