

Fachbereich Robotik

im BV
Med

Fortschrittsbericht

Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie

Vom BVMed-Fachbereich „Robotik in der medizinischen Versorgung“

Herausgeber

Der Fortschrittsbericht wurde im Auftrag des Fachbereichs Robotik in der medizinischen Versorgung im BVMed - Bundesverband Medizintechnologie e.V. zusammengestellt und in Zusammenarbeit mit Healthcare Heads erstellt. Die nachfolgenden Inhalte und Forderungen sind nach Ansicht des Fachbereichs erarbeitet worden.

Der BVMed-Fachbereich Robotik in der medizinischen Versorgung setzt sich für die Verbesserung der Patientenversorgung durch die Etablierung Robotischer Assistenzsysteme in der medizinischen Regelversorgung ein. Ziel des Fachbereichs ist es, die Fachöffentlichkeit über die Robotik in der medizinischen Versorgung zu informieren und den Zugang der Patienten zu den modernen Technologien voranzutreiben.

Gender-Hinweis: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Haftungsausschluss: Die Formulierungen erfolgten nach bestem Wissen auf Grundlage der zum Zeitpunkt der Veröffentlichung am 20.08.2024 geltenden Regelungen. In keinem Fall ersetzen sie eine juristische und steuerliche Prüfung auf Anwendbarkeit und Anpassung im konkreten Einzelfall. Jeder Nutzer setzt das Dokument in vollem Umfang eigenverantwortlich ein. Bei der Erstellung der Verlautbarung wurden alle zur Verfügung stehenden Möglichkeiten ausgeschöpft, die Informationen exakt und fehlerfrei zu halten. Dennoch können der Herausgeber und die Mitwirkenden für die Fehlerfreiheit nicht garantieren und übernehmen diesbezüglich keine Haftung. Eine Ausnahme besteht nur bei vorsätzlichem oder grob fahrlässigem Verhalten. Der BVMed behält sich das Recht vor, diese Veröffentlichung jederzeit zu aktualisieren, um die Informationen auf dem aktuellen Stand zu halten.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	4
1. Einleitung.....	5
2. Was sind Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie?	5
3. Wie haben sich Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie entwickelt?	6
4. Bei welchen Operationen kommen Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie zum Einsatz?.....	7
5. Robotische Prozeduren in der Krankenhausabrechnung	8
6. Robotische Assistenzsysteme als wichtiger Bestandteil der Digitalisierung im Gesundheitswesen	9
7. Betrachtung der möglichen Verbesserung von Qualität und Wirtschaftlichkeit durch Robotische Assistenzsysteme	10
8. Ausgewählte wissenschaftliche Evidenz zu Robotischen Assistenzsystemen in der Chirurgie	11
9. Notwendige Anpassung der Rahmenbedingungen für Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie	16
Literaturverzeichnis	18

Executive Summary

Was sind Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie?

Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie unterstützen Ärzte während einer Operation. Sie sind keine „Roboter“ im alltagssprachlichen Sinne, die eigenständig Eingriffe durchführen, sondern helfen Operateuren bei sicheren, präzisen und effektiven Eingriffen. Der Grad der Automatisierung variiert nach Einsatzgebiet und Assistenzsystem. Generell wird in der Medizin zwischen aktiven und halbaktiven Systemen unterschieden. Die Einsatzmöglichkeiten von Robotischen Assistenzsystemen bei chirurgischen Eingriffen haben sich in den letzten Jahren stark erweitert. Dazu zählen: Herz, Gefäße, Speiseröhre, Magen, Leber, Bauchspeicheldrüse, Darm, Lunge, Prostata, Gebärmutter, Knie oder Hüfte, Wirbelsäule, weibliche Brust, Bauchwand, Gehirn, Rachen und Zunge etc.

Welchen Wert schaffen Robotische Assistenzsysteme für die Gesundheitsversorgung?

Robotische Assistenzsysteme können helfen, die demografischen und personellen Herausforderungen im Gesundheitswesen zu bewältigen. Die aktuelle Studienlage zeigt indikationsübergreifend eine Vielzahl klinischer und gesundheitsökonomischer positiver Effekte: Patienten können von einer schnelleren postoperativen Erholung, geringeren Schmerzen und einer reduzierten Komplikationsrate (Ergebnis- bzw. Behandlungsqualität) profitieren; Ärzte gewinnen Vorteile durch Prozessoptimierung, z.B. durch angepassten Personaleinsatz oder datenunterstützte Entscheidungsfindung, durch bessere Ergonomie sowie eine patientenindividuelle OP-Planung. Für Nachwuchskräfte ergeben sich durch die Anwendung von Robotik in der Chirurgie völlig neue Trainingsmöglichkeiten.

Wie werden robotisch-assistierte Prozeduren in deutschen Krankenhäusern finanziert?

Die Kosten von Robotischen Assistenzsystemen werden – wie Medizintechnik allgemein – über Betriebs- und Investitionskostenbeiträge finanziert. Die Betriebskosten für robotisch-assistiertes Operieren werden bisher im G-DRG-System nicht gesondert vergütet, sondern fließen mit den Kosten traditioneller Operationsmethoden in eine Durchschnittskostenvergütung ein. Die Verwendung eines Robotischen Assistenzsystems wird über einen seit 2017 etablierten OPS-Zusatzcode verschlüsselt, damit die steigende Nutzung und die damit verbundenen Mehrwerte im System abgebildet werden können. Die Investitionskosten für Robotische Assistenzsysteme als medizintechnische Anlagegüter werden grundsätzlich im Rahmen der dualen Krankenhausfinanzierung durch die Bundesländer finanziert. Tatsächlich leiden auch Robotische Assistenzsysteme unter der seit Jahren unzulänglichen Investitionskostenfinanzierung der Bundesländer. Aus diesem Grund spielen Förderprogramme eine wichtige Rolle. Mit dem Krankenhauszukunftsfonds wurden Robotische Assistenzsysteme (Fördertatbestand 9) im Krankenhaus gefördert. Damit der technische Fortschritt allen Patienten zugutekommen kann, bedarf es jedoch langfristig aufeinander abgestimmter Rahmenbedingungen und einer auskömmlichen Finanzierung des Einsatzes Robotischer Assistenzsysteme.

1. Einleitung

Seit vielen Jahren kommen robotisch-assistierte Operationsverfahren in der medizinischen Versorgung zum Einsatz. Während weltweit mehr als 1 Million (Mill.) Patienten pro Jahr mit Robotischen Assistenzsystemen operiert werden (Menon, 2020), bleibt ihr Einsatz in Deutschland noch hinter den Erwartungen zurück (Bühren et al., 2023).

Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie stellen digitale Plattformen dar, mittels derer Ärzte moderne Instrumente mit digitalen und teils neuartigen Funktionalitäten, die anderweitig nicht zur Verfügung stehen, bedienen können. Erhöhte Präzision, Reproduzierbarkeit und Standardisierung (Tejedor, Sagias, & Khan, 2020) von chirurgischen Eingriffen können zu Vorteilen robotisch-assistierter Operationsverfahren gehören. Im Ergebnis werden dadurch die individuellen Fähigkeiten der behandelnden Ärzte verbessert und Patienten profitieren davon, dass sich auch komplexe Eingriffe robotisch-assistiert leichter minimalinvasiv und mit besseren Ergebnissen durchführen lassen (Tejedor, Sagias, Flashman, et al., 2020).

Dies kann zu einer schnelleren postoperativen Erholung, geringeren Schmerzen und einer reduzierten Komplikationsrate (Spinoglio et al., 2016; Stoffels et al., 2020; Feng et al., 2022, Christoffersen et al., 2023) in einigen Indikationen führen. Zudem ermöglicht die Technologie Prozessoptimierungen, beispielsweise durch einen angepassten Personaleinsatz (Auschra et al., 2023) und neue Trainingsmöglichkeiten für Nachwuchskräfte. Robotische Assistenzsysteme können gerade im Rahmen der finanziellen, strukturellen, demografischen und personellen Herausforderungen im Gesundheitswesen eine geeignete Lösung und einen wichtigen Bestandteil für die zukünftige Patientenversorgung darstellen. Die Nutzung dieser Technologie darf daher nicht zu wirtschaftlichen Defiziten führen.

Diese Broschüre informiert darüber, wie Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie ein Teil der Lösung für die bevorstehenden Herausforderungen unseres Gesundheitssystems sein können und die Patientenversorgung sowie Ergebnisse der operativen Behandlung verbessern können. Wichtig ist darauf hinzuweisen, dass der Einsatz von Robotischen Assistenzsystemen in der Versorgung erst in einigen Indikationen etabliert ist und in anderen Indikationen noch am Anfang steht. Diese Broschüre fasst die aktuelle Evidenzlage zusammen, die eine Anwendung von robotisch-assistierten Operationsverfahren in der medizinischen Versorgung in den verschiedenen Leistungsbereichen unterstützt. Damit soll eine Diskussionsgrundlage für eine erfolgreiche, bedarfsgerechte und nachhaltige Integration der robotisch-assistierten Chirurgie in das deutsche Gesundheitswesen gebildet werden.

2. Was sind Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie?

Anders als der sprachliche Ursprung des Worts „Roboter“ vermuten lässt, ist es für Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie kennzeichnend, dass die Operateure weiterhin stets bestimmend für die durchgeführten Aktivitäten sind und die „Operationsroboter“ selbst keine eigenständigen Maßnahmen durchführen.

Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie zeichnen sich dadurch aus, dass diese bei Operationen „assistieren“. Das bedeutet, dass sie eine technische Unterstützung für die operierenden Ärzte darstellen. Der Grad der Automatisierung, der hierbei angewendet wird, hängt vom Einsatzgebiet und dem jeweiligen Assistenzsystem ab.

Robotische Assistenzsysteme lassen sich grundsätzlich in aktive und halbaktive Systeme in der Chirurgie einteilen (Lane, 2018). Während die aktiven Robotischen Assistenzsysteme im Wesentlichen autonom, aber unter der ständigen Kontrolle der Operateure z.B. durch aktive Betätigung eines Fußschalters unterstützen, werden bei halbaktiven Systemen die vorprogrammierten Aufgaben durch die Handlungen und Tätigkeiten der Operateure ausgeführt und ergänzt (Lane, 2018). Aktive Systeme werden vor allem in Orthopädie/Endprothetik, Unfallchirurgie (Skelettsystem) und Neurochirurgie eingesetzt (Feußner et al., 2018), während halbaktive Systeme in erster Linie bei minimalinvasiven Operationen in den meistpräformierten Körperhöhlen Verwendung finden (Lane, 2018).

Die unterstützende bzw. „assistierende“ Funktion der Systeme wird durch die digitale Integration zahlreicher technischer Eigenschaften, zu denen auch die unterschiedlichen Software-Komponenten und die Funktionalität der Instrumente gehören, erzielt. Dies betrifft beispielsweise die OP-Planung, Navigation, optische Darstellung und Funktion spezieller Instrumente.

Robotische Assistenzsysteme bei chirurgischen Anwendungen lassen sich zum Teil mit den Sicherheitssystemen moderner Fahrzeuge vergleichen. So sollen auch hier Navigationssysteme, „Spurassistenten“ sowie „Brems- und Abstandsassistenten“ das Operieren sicherer und präziser machen. Das bedeutet, dass Instrumente und Implantate an genau geplanten Positionen über zuvor geplante Wege und ohne Zittern platziert werden können. Einige Robotische Assistenzsysteme können die Operateure während des Eingriffs auf Probleme hinweisen (zum Beispiel durch Widerstände bzw. automatisches Stoppen der Instrumente) und/oder zusätzliche Funktionen bereitstellen und somit regelhaft zu einer präzisen Umsetzung der Operation beitragen. So werden die handwerklichen Fähigkeiten der Ärzte unterstützt, die Behandlungsqualität verbessert und Komplikationen und Nach-Operationen vermieden.

3. Wie haben sich Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie entwickelt?

Robotische Assistenzsysteme in der minimalinvasiven Chirurgie

Mit Einführung der minimalinvasiven Chirurgie konnten erste Operationen für die Patienten schonender als bei der offenen Chirurgie durchgeführt werden (Marescaux & Rubino, 2003). Hierbei werden nur die Instrumente und eine Kamera über kleine Hautschnitte eingeführt. Die Ärzte steuern den Eingriff ausschließlich über das Kamerabild ohne direkten Blick oder Zugriff auf das Operationsgebiet. Bei der herkömmlichen, endoskopischen Chirurgie führen die Ärzte die Kamera und die Instrumente unmittelbar mit ihren Händen. Es erfordert ein intensives Training, um den Verlust der direkten Sicht und des unmittelbaren Zugriffs zu kompensieren. Die hohen Anforderungen an die Geschicklichkeit der Ärzte und weitere technisch bedingte Herausforderungen begrenzten die Einsatzfähigkeit dieser Operationstechnik vor allem bei komplexen Operationen (Marescaux & Rubino, 2003).

Die moderne Ära Robotischer Assistenzsysteme begann mit einem Konzept der NASA in den 1980er Jahren (Schreuder & Verheijen, 2008). Die ersten Entwicklungen dienten zum Halten der Kamera und als Leitsysteme bei Operationen (Marescaux & Rubino, 2003). Mit der Erkenntnis, dass mit Hilfe der robotischen Assistenz technische Herausforderungen der herkömmlichen, endoskopischen Chirurgie vor allen Dingen bei komplexen Operationen

überwunden werden konnten, begann die kommerzielle Nutzung Robotischer Assistenzsysteme in der Chirurgie (Marescaux & Rubino, 2003). In den 1990er Jahren wurde das Konzept des Master-Slave-Telemanipulationssystems entwickelt, bei dem die Bewegungen der operierenden Ärztinnen/Ärzte computergestützt, ähnlich einer Fernsteuerung, auf die Instrumente in den Patientinnen/Patienten übertragen werden (Marescaux & Rubino, 2003).

Robotische Assistenzsysteme nutzen moderne Navigationstechnologien

Die Navigation hat sich zu einem Kernbestandteil von aktiven Robotischen Assistenzsystemen entwickelt (Bäthis et al., 2003). Die Navigation unterstützt die präzise Orientierung und Instrumentenführung durch Einblenden von Instrumenten und Implantaten in Echtzeit auf Basis von prä- und intraoperativer Bildgebung, wodurch die Strahlenbelastung reduziert werden kann. Ärzten ist es möglich, die genaue Position ihrer Instrumente und Implantate in Beziehung zu den anatomischen Strukturen am Monitor in Echtzeit zu verfolgen und patientenindividuelle, präoperative OP-Pläne genau durchzuführen und intraoperativ, wo nötig, auch anzupassen.

4. Bei welchen Operationen kommen Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie zum Einsatz?

Die aktuell in Deutschland verfügbaren Robotischen Assistenzsysteme werden bereits zur Behandlung verschiedener Erkrankungen an unterschiedlichen Organen bzw. Körperbereichen eingesetzt. Die jeweiligen robotischen Technologien sind auf ihre zugehörigen Einsatzgebiete spezialisiert entwickelt. Die Einsatzmöglichkeiten umfassen beispielsweise Operationen an inneren Organen wie Herz und Gefäßen, Speiseröhre, Magen, Leber, Bauchspeicheldrüse, Darm, Lunge, Prostata oder Gebärmutter oder am Skelettsystem mit Operationen an Knie oder Hüfte (Gelenkersatz) sowie Operationen an der Wirbelsäule, der weiblichen Brust, der Bauchwand, am bzw. im Gehirn oder auch im Bereich des Rachens und der Zunge. Allen Eingriffen gemeinsam

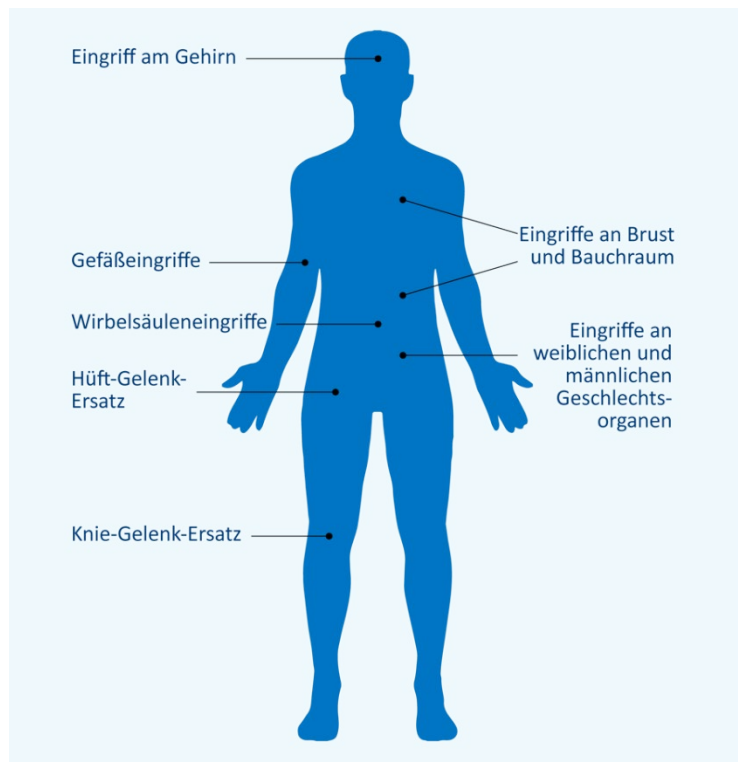


Abbildung 4-1: Beispielhafter Überblick über Einsatzgebiete Robotischer Assistenzsysteme in der Chirurgie

ist die erhöhte Präzision, mit der gezielt anatomische Strukturen schonend mit Instrumenten erreicht werden können. Bei einer Vielzahl von Eingriffen ist darüber hinaus das hohe Maß an rekonstruierenden Operationsanteilen charakterisierend, da sowohl bei eher komplexen als auch weniger komplexen Operationen die Operationsschritte unterstützt und ergänzt werden. Einen beispielhaften Überblick über Körperbereiche, in denen robotisch-assistiertes Operieren angewendet wird, zeigt Abbildung 4-1.

5. Robotische Prozeduren in der Krankenhausabrechnung

Für die DRG-basierte Krankenhausabrechnung ist die Verschlüsselung (Kodierung) stationär durchgeführter Prozeduren mithilfe von OPS-Kodes aus dem „Operationen- und Prozedurenschlüssel“ (OPS) erforderlich.

Der Einsatz eines Robotischen Assistenzsystems kann bereits seit über 20 Jahren durch einen OPS-Kode kenntlich gemacht werden. Dieser OPS-Kode wird als „Zusatzinformation“ ergänzend zum primären Eingriff (z.B. Knie-Gelenk-Ersatz, Entfernung der Prostata) dazu kodiert. In dem Abschnitt „Anwendung eines OP-Roboters“ (OPS-Kode Bereich 5-987) sind derzeit vier OPS-Kodes verfügbar, um verschiedene Arten von Robotischen Assistenzsystemen zu unterscheiden („Komplexer OP-Roboter“, „Roboterarm“, „Miniaturobster“, „Sonstige“).

Die entsprechend behandelten Fälle können über den OPS-Kode in den Abrechnungsdaten der Krankenhäuser identifiziert werden. Damit lassen sich auch Auswertungen zur Anwendung Robotischer Assistenzsysteme in Deutschland durchführen. Abbildung 5-1 zeigt, wie häufig ein OPS-Kode für robotisch-assistiertes Operieren im Zeitverlauf von 2006 bis 2023 kodiert wurde.

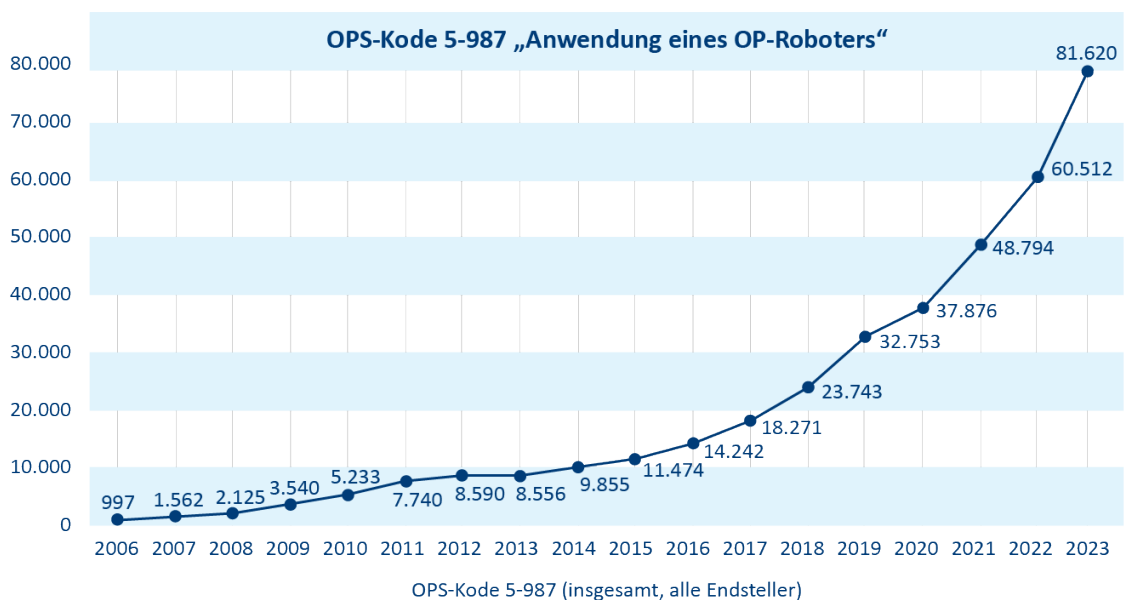


Abbildung 5-2: Anwendung Robotischer Assistenzsysteme in Deutschland 2006 bis 2023 (Quellen: DeStatis: 2006-2021, InEK DatenBrowser: 2023).

Im G-DRG-System haben OPS-Kodes für robotisch-assistiertes Operieren bisher keine Relevanz bei der Zuordnung eines Behandlungsfalls zu einer DRG. Das bedeutet, dass ein Krankenhaus für einen Fall den identischen, pauschalen Betrag abrechnet – unabhängig davon, ob die Operation mit oder ohne Anwendung eines Robotischen Assistenzsystems durchgeführt wurde.

Werden die Patienten nach einer robotisch-assistierten Operation früher entlassen als dies bei anderen Operationstechniken möglich ist, kann es sogar zu einer Minderung der Vergütung kommen. Dieser im DRG-System vorgesehene Mechanismus berücksichtigt nicht, dass der Vorteil der früheren Entlassung für die Patienten nur durch einen entsprechenden technischen Aufwand erzielt werden kann.

Bei der Einführung Robotischer Assistenzsysteme in den Krankenhäusern sind neben der DRG-basierten Abrechnung der durchgeführten Behandlungen mit den Krankenkassen die Investitionen für die Anschaffung zu bedenken. Robotische Assistenzsysteme werden als medizintechnische Anlagegüter im Rahmen der dualen Krankenhausfinanzierung nicht über das G-DRG-System finanziert, sondern fallen in die Zuständigkeit der Bundesländer. Aufeinander abgestimmte Rahmenbedingungen der Investitions- und Betriebskostenfinanzierung sind daher Voraussetzung für eine erfolgreiche Einführung des robotisch-assistierten Operierens in Deutschland. Auch die im Rahmen der Krankenhausreform geplante Vorhaltefinanzierung ist nicht geeignet, diese Situation zu verbessern, da sich die Vorhaltevergütung nur auf die DRG-relevanten Betriebskosten bezieht.

6. Robotische Assistenzsysteme als wichtiger Bestandteil der Digitalisierung im Gesundheitswesen

Weiterentwicklungen und Verbesserungen in der interventionellen Medizin werden heute in der Regel nicht mehr durch die Ärzte allein initiiert, sondern können nur noch durch verbesserte und innovative Medizinprodukte und Verfahren erzielt werden (Feußner et al., 2018). In diesem Zusammenhang werden unter anderem Begriffe wie „Digitalisierung“, „Hightech-Chirurgie“, „Chirurgie 4.0“, „Big Data“, „Miniaturisierung“, „virtuelle Realität“, „Navigation“, „Simulation“ und „Künstliche Intelligenz“ angeführt, die eng mit diesem Thema verbunden sind (Anthuber, 2018; Feußner et al., 2018). Die zunehmende Verwendung von Robotischen Assistenzsystemen gilt als ein Indikator für die zunehmende Digitalisierung der Chirurgie (Feußner et al., 2018).

Die zukünftige Chirurgie wird durch den Einsatz vieler weiterer intelligenter und miteinander vernetzter Systeme, die zu einem Kommunikations- und Informationsnetz zusammengeführt werden, geprägt sein (Manzei-Gorsky, Schubert, 2022).

In einer modernen Gesundheitsversorgung werden sich z.B. durch eine effektive Prozessgestaltung Verbesserungspotenziale mit konkreten Lösungen für eine bedarfsgerechte, wohnortnahe und qualitätsorientierte Behandlung der Patienten eröffnen (van Alst, 2020). Damit führt die Digitalisierung der Medizin und speziell der Chirurgie zu großen Erwartungen in Bezug auf die Linderung individueller Leiden, wie auch der Bewältigung epidemiologischer Herausforderungen (Manzei-Gorsky, Schubert, 2022). Die computerbasierten Robotischen Assistenzsysteme in der Chirurgie können die Umsetzung der Digitalisierung im Gesundheitswesen in vielfältiger Weise unterstützen.

Die Digitalisierung wird als die bedeutendste Herausforderung angesehen, wenn es darum geht, auch in Zukunft eine Gesundheitsversorgung auf höchstem Niveau in Deutschland zu gewährleisten (Manzei-Gorsky, Schubert, 2022). Noch größer erscheinen die Herausforderungen, die eine angepasste und moderne Gesundheitsversorgung mit sich bringt, wenn keine Lösung für die langfristig tragfähige Finanzierung der Digitalisierung und der damit verbundenen Investitionen gefunden wird.

Mit dem Krankenhauszukunftsgesetz (KHZG) 2020 wurde eine bisher einmalige gemeinsame Förderung über 4,3 Mrd. Euro von Bund und Ländern für die Digitalisierung im Gesundheitswesen bereitgestellt. Die Relevanz Robotischer Assistenzsysteme in der Chirurgie für die Digitalisierung und vor allem den Patientennutzen wurde hierbei bereits erkannt und die Technologie dementsprechend in die Förderrichtlinie mit aufgenommen. Die Digitalisierung im Gesundheitswesen erfordert aufgrund des großen Entwicklungsbedarfs in den Krankenhäusern und sich stetig weiterentwickelnder Technologien jedoch eine langfristige Finanzierungsperspektive.

Weitere fachliche Informationen zur Anwendung von OP-Robotern finden Sie unter folgendem Link: <https://www.bvmed.de/themen/robotik>

7. Betrachtung der möglichen Verbesserung von Qualität und Wirtschaftlichkeit durch Robotische Assistenzsysteme

Der Einsatz Robotischer Assistenzsysteme in der Chirurgie bringt diverse Veränderungen in der Gesundheitsversorgung mit sich. Das betrifft unmittelbar die Patienten sowie die Anwender aber auch die Gestaltung von Versorgungsprozessen und die Verfügbarkeit von Daten. Mit diesen Eigenschaften leistet die robotisch-assistierte Chirurgie wertvolle Beiträge für eine qualitätsorientierte Gesundheitsversorgung.

Um die Qualität der medizinischen Versorgung zu beschreiben hat Donabedian 1966 die Dimensionen „Strukturqualität“, „Prozessqualität“ und „Ergebnisqualität“ eingeführt. Struktur- und Prozessqualität haben einen Einfluss auf die Ergebnisqualität, ohne jedoch das Ausmaß des Einflusses genau benennen zu können (Donabedian, 2005). Daher haben Parameter der Ergebnisqualität für die Patientinnen/Patienten grundsätzlich eine höhere Relevanz.

Die Unterstützung der Ärzte durch Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie dient dazu, bessere Behandlungsergebnisse zu erzielen und damit unmittelbar einen Nutzen für die Patienten zu erzeugen (Flynn et al., 2022). Eine verbesserte Ergebnisqualität kann z.B. durch die Verringerung von Komplikationen oder eine schnellere Erholung nach der Operation erzielt werden. Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie können auch eine effizientere Nutzung der Ressourcen ermöglichen, was sich z.B. an kürzeren Krankenhausaufenthalten (Kayani et al., 2018; Dewulf et al., 2022; Strauss et al. 2022) für einige Indikationen zeigen kann. Der nachfolgende Abschnitt gibt anhand ausgewählter wissenschaftlicher Publikationen einen Überblick über klinische und ökonomische Mehrwerte von Robotischen Assistenzsystemen in der Chirurgie.

Darüber hinaus ermöglichen die computerbasierten Systeme die Einbindung in eine IT-Infrastruktur und können hierüber detaillierte und umfangreiche Behandlungsdaten für Dokumentation und Auswertungen verfügbar machen. Aufgrund der überregionalen Relevanz für die Gesundheitsversorgung können Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie auch zur qualitätsorientierten Umstrukturierung der Gesundheitsversorgung, z. B. durch Bildung von spezialisierten Zentren und Ambulantisierung beitragen.

8. Ausgewählte wissenschaftliche Evidenz zu Robotischen Assistenzsystemen in der Chirurgie

Wissenschaftliche Studien bilden die Basis für eine evidenzbasierte Bewertung medizinischer Behandlungen. Zur Anwendung Robotischer Assistenzsysteme in der Chirurgie wurden bereits weltweit Studien durchgeführt.

Im Folgenden werden ausgewählte Studien angeführt, die potenzielle Vorteile von robotisch-assistierten chirurgischen Eingriffen zeigen. Langfristig angelegte Studien mit einem Follow-up von 5 oder 10 Jahren sind aufgrund der Neuheit der Technologie in manchen Indikationen noch nicht vorhanden, sind aber notwendig, um den Mehrwert der Technologie langfristig zu evaluieren.

Die angeführten Literaturtabellen geben einen indikations- und technologie-übergreifenden Eindruck über mögliche Vorteile von Robotischen Assistenzsystemen für die gesundheitspolitische Diskussion.

Tabelle 8-1: Überblick über ausgewählte Studienergebnisse zu Robotischen Assistenzsystemen in der Chirurgie.

Wert der robotisch-assistierten Chirurgie	Relevanz für
Erhöhte Sicherheit (z.B. weniger Komplikationen, Revisionen)	Patientinnen/Patienten, Wirtschaftlichkeit
Studien, die Evidenz zu diesem Wert beitragen	
(Batailler et al., 2019, Improved implant position and lower revision rate with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty); (Benech et al., 2020, Navigated robotic assistance results in improved screw accuracy and positive clinical outcomes: an evaluation of the first 54 cases); (Fu et al., 2021, Robot-assisted technique vs conventional freehand technique in spine surgery: A meta-analysis); (Cacciamani et al., 2018, Impact of Surgical Factors on Robotic Partial Nephrectomy Outcomes: Comprehensive Systematic Review and Meta-Analysis.); (Huntsman et al., 2020, Robotic-assisted navigated minimally invasive pedicle screw placement in the first 100 cases at a single institution); (Klassen et al., 2021, P47 Computerassistierte Spinale Chirurgie versus Freihand-Navigation – DWG-Registerabfrage für monosegmentale TLIFs aus 2019); (Kleeblad et al., 2018, Midterm Survivorship and Patient Satisfaction of Robotic-Arm-Assisted Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty: A Multicenter Study); (Li et al., 2021, Comparison of accuracy and safety between robot-assisted and conventional fluoroscope assisted placement of pedicle screws in thoracolumbar spine A meta-analysis); (Mergenthaler et al., 2021, Is robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty a safe procedure? A case control study); (Mont et al., 2021, Health Care Utilization and Payer Cost Analysis of Robotic Arm Assisted Total Knee Arthroplasty at 30, 60, and 90 Days); (Moschetti et al., 2016, Can Robot-Assisted Unicompartmental Knee Arthroplasty Be Cost-Effective? A Markov Decision Analysis.); (Pearle et al., 2017, Survivorship and patient satisfaction of robotic-assisted medial unicompartmental knee arthroplasty at a minimum two-year follow-up);	

(Vardiman et al., 2020, Pedicle screw accuracy in clinical utilization of minimally invasive navigated robot-assisted spine surgery);
 (Wallace et al., 2020, Navigated robotic assistance improves pedicle screw accuracy in minimally invasive surgery of the lumbosacral spine: 600 pedicle screws in a single institution);
 (T. Wang et al., 2019, A meta-analysis of robot assisted laparoscopic radical prostatectomy versus laparoscopic radical prostatectomy);
 (Yeroushalmi et al., 2022, Early Economic Analysis of Robotic-Assisted Unicondylar Knee Arthroplasty May Be Cost Effective in Patients with End-Stage Osteoarthritis)

Wert der robotisch-assistierten Chirurgie	Relevanz für
Hohe Zufriedenheit der Patientinnen/Patienten mit dem Behandlungsergebnis	Patientinnen/Patienten
Studien, die Evidenz zu diesem Wert beitragen	
(Coon et al., 2015, Short to mid term survivorship of robotically assisted UKA: a multicenter study); (Rossi & Benazzo, 2023, Individualized alignment and ligament balancing technique with the ROSA® robotic system for total knee arthroplasty); (Scott et al., 2010, Predicting dissatisfaction following total knee replacement A prospective study of 127 patients)	

Wert der robotisch-assistierten Chirurgie	Relevanz für
Patientinnen/Patienten empfinden eine höhere Lebensqualität	Patientinnen/Patienten
Studien, die Evidenz zu diesem Wert beitragen	
(Bhimani et al., 2020, Robotic-assisted total knee arthroplasty demonstrates decreased postoperative pain and opioid usage compared to conventional total knee arthroplasty); (Malkani et al., 2020, New Technology for Total Knee Arthroplasty Provides Excellent Patient-Reported Outcomes: A Minimum Two-Year Analysis); (Marchand et al., 2017, Patient Satisfaction Outcomes after Robotic Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty: A Short-Term Evaluation); (Mulpur et al., 2022, Comparison of patient reported outcomes after robotic versus manual total knee arthroplasty in the same patient undergoing staged bilateral knee arthroplasty)	

Wert der robotisch-assistierten Chirurgie	Relevanz für
Patientinnen/Patienten erleben eine verbesserte Funktionalität	Patientinnen/Patienten
Studien, die Evidenz zu diesem Wert beitragen	
(Eerens et al., 2022, Improved joint awareness two years after total knee arthroplasty with a handheld image-free robotic system); (Malkani et al., 2020, New Technology for Total Knee Arthroplasty Provides Excellent Patient-Reported Outcomes: A Minimum Two-Year Analysis)	

Wert der robotisch-assistierten Chirurgie	Relevanz für
Patientinnen/Patienten geben geringere Schmerzen an	Patientinnen/Patienten
Studien, die Evidenz zu diesem Wert beitragen	
(Bhimani et al., 2020, Robotic-assisted total knee arthroplasty demonstrates decreased postoperative pain and opioid usage compared to conventional total knee arthroplasty); (Malkani et al., 2020, New Technology for Total Knee Arthroplasty Provides Excellent Patient-Reported Outcomes: A Minimum Two-Year Analysis)	

Wert der robotisch-assistierten Chirurgie	Relevanz für
Schonendere Durchführung der Operation (z.B. weniger Blutverlust, Gewebeschäden oder Strahlenbelastung)	Patientinnen/Patienten, Wirtschaftlichkeit
Studien, die Evidenz zu diesem Wert beitragen	
(Fu et al., 2021, Robot-assisted technique vs conventional freehand technique in spine surgery: A meta-analysis); (Jiang et al., 2020, Robot-Assisted versus Freehand Instrumentation in Short-Segment Lumbar Fusion: Experience with Real-Time Image-Guided Spinal Robot); (Khan et al., 2021, Blood loss and transfusion risk in robotic-assisted knee arthroplasty: A retrospective analysis); (Kayani et al., 2020, A prospective randomized controlled trial comparing biochemical, thermal, and macroscopic soft-tissue injury outcomes in conventional jig-based versus robotic total knee arthroplasty); (Klassen et al., 2021, P47 Computerassistierte Spinale Chirurgie versus Freihand-Navigation – DWG-Registerabfrage für monosegmentale TLIFs aus 2019); (Zhang et al., 2019, Comparison of Superior-Level Facet Joint Violations Between Robot-Assisted Percutaneous Pedicle Screw Placement and Conventional Open Fluoroscopic-Guided Pedicle Screw Placement)	

Wert der robotisch-assistierten Chirurgie	Relevanz für
Präzisere Operationsergebnisse	Versorgungsqualität
Studien, die Evidenz zu diesem Wert beitragen	
(Batailler et al., 2019, Improved implant position and lower revision rate with robotic-assisted unicompartamental knee arthroplasty); (Bekelis et al., 2012, Frameless robotically targeted stereotactic brain biopsy: feasibility, diagnostic yield, and safety); (Benech et al., 2020, Navigated robotic assistance results in improved screw accuracy and positive clinical outcomes: an evaluation of the first 54 cases); (Carai et al., 2017, Robot-Assisted Stereotactic Biopsy of Diffuse Intrinsic Pontine Glioma: A Single-Center Experience); (Cardinale et al., 2016, Implantation of Stereoelectroencephalography Electrodes: A Systematic Review); (De Benedictis et al., 2017, Robot-assisted procedures in pediatric neurosurgery);	

(Domb et al., 2014, Comparison of Robotic-assisted and Conventional Acetabular Cup Placement in THA: A Matched-pair Controlled Study);
 (Fomenko & Serletis, 2018, Robotic Stereotaxy in Cranial Neurosurgery: A Qualitative Systematic Review);
 (Fu et al., 2021, Robot-assisted technique vs conventional freehand technique in spine surgery: A meta-analysis);
 (González-Martínez et al., 2016, Technique, Results, and Complications Related to Robot-Assisted Stereoelectroencephalography);
 (Gregori et al., 2014, Handheld precision sculpting tool for unicondylar knee arthroplasty. A clinical review);
 (Gupta et al., 2020, Robot-assisted stereotactic biopsy of pediatric brainstem and thalamic lesions);
 (Huntsman et al., 2020, Robotic-assisted navigated minimally invasive pedicle screw placement in the first 100 cases at a single institution);
 (Kaper & Villa, 2019, Accuracy and precision of a handheld robotic-guided distal femoral osteotomy in robotic-assisted total knee arthroplasty 41);
 (Kayani et al., 2020, A prospective randomized controlled trial comparing biochemical, thermal, and macroscopic soft-tissue injury outcomes in conventional jig-based versus robotic total knee arthroplasty);
 (Sharma et al., 2019, Accuracy of robot-assisted versus optical frameless navigated stereoelectroencephalography electrode placement in children);
 (Vardiman et al., 2020, Pedicle screw accuracy in clinical utilization of minimally invasive navigated robot-assisted spine surgery);
 (Wallace et al., 2020, Navigated robotic assistance improves pedicle screw accuracy in minimally invasive surgery of the lumbosacral spine: 600 pedicle screws in a single institution);
 (M. Wang et al., 2022, Frameless Robot-Assisted Stereotactic Biopsy is Superior to Microsurgical Biopsy for Pediatric Diffuse Intrinsic Pontine Gliomas)

Wert der robotisch-assistierten Chirurgie	Relevanz für
Prozessoptimierung (z.B. Standardisierung von Operationsdauer und -ablauf)	Versorgungsqualität, Wirtschaftlichkeit
Studien, die Evidenz zu diesem Wert beitragen	
(Cacciamani et al., 2018, Impact of Surgical Factors on Robotic Partial Nephrectomy Outcomes: Comprehensive Systematic Review and Meta-Analysis.); (Cardinale et al., 2016, Implantation of Stereoelectroencephalography Electrodes: A Systematic Review); (González-Martínez et al., 2016, Technique, Results, and Complications Related to Robot-Assisted Stereoelectroencephalography); (Gupta et al., 2020, Robot-assisted stereotactic biopsy of pediatric brainstem and thalamic lesions); (Kaper, 2020, Learning curve and time commitment assessment in the adoption of navio robotic-assisted total knee arthroplasty); (Kayani et al., 2018, Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of seven cases for integration into the surgical workflow but no learning curve effect for accuracy of implant positioning); (Klassen et al., 2021, P47 Computerassistierte Spinale Chirurgie versus Freihand-Navigation – DWG-Registerabfrage für monosegmentale TLIFs aus 2019); (Ma et al., 2019, Short-term outcomes of robotic-assisted right colectomy compared with laparoscopic surgery: A systematic review and meta-analysis.); (Sharma et al., 2019, Accuracy of robot-assisted versus optical frameless navigated stereoelectroencephalography electrode placement in children);	

(Shearman et al., 2019, Robotic-assisted unicondylar knee arthroplasty is associated with earlier discharge from physiotherapy and reduced length of stay compared to conventional navigated techniques);

(Sires et al., 2021, Accuracy of Bone Resection in MAKO Total Knee Robotic-Assisted Surgery);

(Thilak et al., 2021, Accuracy in the Execution of Pre-operative Plan for Limb Alignment and Implant Positioning in Robotic-arm Assisted Total Knee Arthroplasty and Manual Total Knee Arthroplasty: A Prospective Observational Study);

(Vardiman et al., 2020, Does the accuracy of pedicle screw placement differ between the attending surgeon and resident in navigated robotic-assisted minimally invasive spine surgery?);

(M. Wang et al., 2022, Frameless Robot-Assisted Stereotactic Biopsy is Superior to Microsurgical Biopsy for Pediatric Diffuse Intrinsic Pontine Gliomas)

Wert der robotisch-assistierten Chirurgie	Relevanz für
Verkürzung des stationären Aufenthaltes	Versorgungsqualität, Wirtschaftlichkeit
Studien, die Evidenz zu diesem Wert beitragen	
<p>(Cool et al., 2019, Revision Analysis of Robotic Arm-Assisted and Manual Unicompartmental Knee Arthroplasty);</p> <p>(Fu et al., 2021, Robot-assisted technique vs conventional freehand technique in spine surgery: A meta-analysis);</p> <p>(Klassen et al., 2021, P47 Computerassistierte Spinale Chirurgie versus Freihand-Navigation – DWG-Registerabfrage für monosegmentale TLIFs aus 2019);</p> <p>(Ma et al., 2019, Short-term outcomes of robotic-assisted right colectomy compared with laparoscopic surgery: A systematic review and meta-analysis.);</p> <p>(Pierce et al., 2020, Robotic Arm–Assisted Knee Surgery: An Economic Analysis);</p> <p>(Sephton et al., 2020, Achieving discharge within 24 h of robotic unicompartmental knee arthroplasty may be possible with appropriate patient selection and a multi-disciplinary team approach);</p> <p>(Shearman et al., 2019, Robotic-assisted unicondylar knee arthroplasty is associated with earlier discharge from physiotherapy and reduced length of stay compared to conventional navigated techniques)</p>	

9. Notwendige Anpassung der Rahmenbedingungen für Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie

Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie können einen wesentlichen Beitrag zur Überwindung der aktuellen Herausforderungen im deutschen Gesundheitswesen (u.a. Versorgungsstrukturen, Demografie, Digitalisierung, Ambulantisierung) leisten. Damit dies gelingt, ist es notwendig, dass die Rahmenbedingungen so angepasst werden, dass eine Implementierung in die klinische Routine unterstützt wird.

Der Fachbereich Robotik im BVMed sieht folgende Punkte:

Harmonisierung der getrennten Finanzierung von Investitionen und Betriebsmitteln

Um Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie implementieren zu können, ist eine anfängliche größere Investition für die Krankenhäuser erforderlich. Für die Finanzierung solcher Investitionen sind die Bundesländer im Rahmen der dualen Krankenhausfinanzierung zuständig, kommen dieser Verpflichtung aber nur unzureichend nach.

Getrennt davon fließen die Betriebskosten Robotischer Assistenzsysteme sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten in die DRG-Kalkulation mit ein. Für eine wirtschaftlich nachhaltige Implementierung Robotischer Assistenzsysteme in den Krankenhäusern ist deshalb sowohl eine ausreichende Finanzierung der anfänglichen Investition erforderlich als auch eine abgestimmte und auskömmliche Erstattung der Betriebskosten nötig.

Sicherstellung der Investitionskostenfinanzierung

Im Zuge der Krankenhausreform sind Änderungen der Finanzierung von Betriebskosten, z.B. die Ergänzung des DRG-Fallpauschalensystems durch eine Vorhaltefinanzierung, vorgesehen. Bisher ist jedoch in keiner Weise eine Lösung für den ca. 50 Mrd. € betragenden Investitionsstau in den Krankenhäusern zu erkennen. Aufgrund der über Jahrzehnte rückläufigen Investitionsfinanzierung durch die Länder sind Krankenhäuser heute darauf angewiesen, die Anschaffung eines Robotischen Assistenzsystems in der Chirurgie weitgehend über die DRG-basierte Vergütung zu kompensieren. Eine gewünschte Konzentration von komplexen Leistungen auf weniger Krankenhäuser muss durch entsprechende technische Ausstattung und Möglichkeiten zur Finanzierung dieser Ausstattung begleitet werden.

Einbeziehung von Robotischen Assistenzsystemen in der Chirurgie in die Digitalisierungsstrategie für das Gesundheitswesen

Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie sind auf vielfältige Weise ein Teil der Digitalisierung im Gesundheitswesen. Mithilfe digitaler Funktionen und der Generierung umfangreicher Daten unterstützen sie den effizienten Ressourceneinsatz z. B. durch eine besser mögliche Prozessoptimierung und kontinuierliche Analyse und Optimierung der Behandlungsqualität. Da beim Einsatz Robotischer Assistenzsysteme daneben ein kontinuierlicher Datenfluss erzeugt wird, ermöglicht die Technologie auch die automatisierte Dokumentation von Behandlungsfällen, die in Registerstudien einfließen oder zur Krankenhausabrechnung genutzt werden können. Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie bilden deshalb einen wichtigen Baustein für digitale Versorgungsstrategien.

Eingriffe werden digital geplant, durchgeführt und die entstandenen Daten für eine kontinuierliche Verbesserung ausgewertet, so entstehen Datenbanken mit Lern- und Anschauungsmaterial. Teil der Digitalisierungsstrategie sollte auch sein, die Rahmenbedingungen für solche Datenverarbeitungen im Krankenhaus zu verbessern.

Verbesserung der Identifizierbarkeit Robotischer Assistenzsysteme in der Chirurgie in Routine- und Registerdaten

Um den Mehrwert Robotischer Assistenzsysteme in der Chirurgie besser in der Versorgungsforschung für das deutsche Gesundheitswesen untersuchen zu können, ist es erforderlich, die entsprechend behandelten Patientinnen/Patienten in Routinedaten identifizieren zu können. Daher muss die Kennzeichnung sowohl in den Abrechnungsdaten der Krankenhäuser (über primäre OPS-Kodes) als auch in Registerdaten (über verpflichtende Einträge) verbessert werden. So wird zum Beispiel für das Endoprothesen-Register Deutschland geprüft, neben dem Implantat eine Unterscheidung nach Operationstechnik (z.B. robotisch-assistiert, navigiert, patientenspezifische Schnittblöcke, manuell) einzuführen.

Bedarfsgerechter Einsatz Robotischer Assistenzsysteme in der Chirurgie zur Verbesserung der Behandlungsqualität

Behandlungsergebnisse können durch die Anwendung innovativer Instrumente und digitaler Techniken, die über Robotische Assistenzsysteme gesteuert werden, verbessert werden. Dies ermöglicht ggf. eine schnellere Erholung der Patienten oder einen geringeren Blutverlust bei der Operation. Damit die Patienten auch in Deutschland davon profitieren können, müssen die Rahmenbedingungen so gestaltet werden, dass Robotische Assistenzsysteme in der Chirurgie zur Verbesserung der Behandlungsqualität im deutschen Gesundheitswesen bedarfsgerecht ohne ökonomische Nachteile für die Anwender eingesetzt werden können.

Literaturverzeichnis

Anthuber, M. (2018). Technical Innovations in Surgery. *Chirurg*, August, 753–754.
<https://doi.org/10.1007/s00104-018-0710-6>

Auschra, C., Behar, B., Sauermann, S., & Sydow, J. (2023). Robotereinsatz und strategisches Timing Zur Ökonomie einer medizintechnischen Innovation im deutschen Gesundheitsmarkt. *Zeitschrift Führung + Organisation*, 4.

Batailler, C., White, N., Ranaldi, F. M., Neyret, P., Servien, E., & Lustig, S. (2019). Improved implant position and lower revision rate with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 27(4), 1232–1240.
<https://doi.org/10.1007/s00167-018-5081-5>

Bäthis, H., Perlick, L., Lüring, C., Kalteis, T., & Grifka, J. (2003). CT-basierte und CT-freie Navigation in der Knieendoprothetik. *Der Unfallchirurg*, 1(1), 1–1.
<https://doi.org/10.1007/s00113-003-0685-7>

Bekelis, K., Radwan, T. A., Desai, A., & Roberts, D. W. (2012). Frameless robotically targeted stereotactic brain biopsy: feasibility, diagnostic yield, and safety. *Journal of Neurosurgery*, 116(5), 1002–1006. <https://doi.org/10.3171/2012.1.JNS111746>

Benech, C. A., Perez, R., Benech, F., Greeley, S. L., Crawford, N., & Ledonio, C. (2020). Navigated robotic assistance results in improved screw accuracy and positive clinical outcomes: an evaluation of the first 54 cases. *Journal of Robotic Surgery*, 14(3), 431–437.
<https://doi.org/10.1007/s11701-019-01007-z>

Bhimani, S. J., Bhimani, R., Smith, A., Eccles, C., Smith, L., & Malkani, A. (2020). Robotic-assisted total knee arthroplasty demonstrates decreased postoperative pain and opioid usage compared to conventional total knee arthroplasty. *Bone & Joint Open*, 1(2), 8–12.
<https://doi.org/doi:10.1302/2633-1462.12.BJO-2019-0004.R1>

Bühren, M., Bünte, M., Brückner, R., Churi, S., Kaltenbach, T., & Magunia, P. (2023). The operating theater of the future – the rise of robotic-assisted surgery. An industry set to triple in size by 2030.

Cacciamani, G. E., Medina, L. G., Gill, T., Abreu, A., Sotelo, R., Artibani, W., & Gill, I. S. (2018). Impact of Surgical Factors on Robotic Partial Nephrectomy Outcomes: Comprehensive Systematic Review and Meta-Analysis. *The Journal of Urology*, 200(2), 258–274.
<https://doi.org/10.1016/j.juro.2017.12.086>

Carai, A., Mastronuzzi, A., De Benedictis, A., Messina, R., Cacchione, A., Miele, E., Randi, F., Esposito, G., Trezza, A., Colafati, G. S., Savioli, A., Locatelli, F., & Marras, C. E. (2017). Robot-Assisted Stereotactic Biopsy of Diffuse Intrinsic Pontine Glioma: A Single-Center Experience. *World Neurosurgery*, 101, 584–588. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.02.088>

Cardinale, F., Casaceli, G., Raneri, F., Miller, J., & Lo Russo, G. (2016). Implantation of Stereoelectroencephalography Electrodes: A Systematic Review. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 33(6), 490–502. <https://doi.org/10.1097/WNP.0000000000000249>

Christoffersen MW, Jørgensen LN, Jensen KK. Less postoperative pain and shorter length of stay after robot-assisted retrorectus hernia repair (rRetrorectus) compared with laparoscopic intraperitoneal onlay mesh repair (IPOM) for small or medium-sized ventral hernias. *Surg*

Endosc. 2023 Feb;37(2):1053-1059. doi: 10.1007/s00464-022-09608-w. Epub 2022 Sep 15. PMID: 36109358

Cool, C. L., Needham, K. A., Khlopas, A., & Mont, M. A. (2019). Revision Analysis of Robotic Arm-Assisted and Manual Unicompartamental Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*, 34(5), 926–931. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2019.01.018>

Coon, T., Roche, M., Pearle, A., & et al. (2015, July). Short to mid term survivorship of robotically assisted UKA: a multicenter study.

De Benedictis, A., Trezza, A., Carai, A., Genovese, E., Procaccini, E., Messina, R., Randi, F., Cossu, S., Esposito, G., Palma, P., Amante, P., Rizzi, M., & Marras, C. E. (2017). Robot-assisted procedures in pediatric neurosurgery. *Neurosurgical Focus*, 42(5), E7. <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS16579>

Dewulf M, Hiekkaranta JM, Mäkäräinen E, Saarnio J, Vierstraete M, Ohtonen P, Muysoms F, Rautio T. Open versus robotic-assisted laparoscopic posterior component separation in complex abdominal wall repair. *BJS Open*. 2022 May 2;6(3):zrac057. doi: 10.1093/bjsopen/zrac057. PMID: 35748378; PMCID: PMC9227725.

Domb, B. G., El Bitar, Y. F., Sadik, A. Y., Stake, C. E., & Botser, I. B. (2014). Comparison of Robotic-assisted and Conventional Acetabular Cup Placement in THA: A Matched-pair Controlled Study. *Clinical Orthopaedics and Related Research*®, 472(1). https://journals.lww.com/clinorthop/Fulltext/2014/01000/Comparison_of_Robotic_assisted_and_Conventional.49.aspx

Donabedian, A. (2005). Evaluating the Quality of Medical Care. *The Milbank Quarterly*, 83(4), 691–729. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0009.2005.00397.x>

Eerens, W., Bollars, P., Henckes, M.-E., Schotanus, M., Mievis, J., & Janssen, D. (2022). Improved joint awareness two years after total knee arthroplasty with a handheld image-free robotic system. *Acta Orthopaedica Belgica*, 88, 47–52. <https://doi.org/10.52628/88.1.07>

Feng Q, Yuan W, Li T, et al; REAL Study Group. Robotic versus laparoscopic surgery for middle and low rectal cancer (REAL): short-term outcomes of a multicentre randomised controlled trial. *Lancet Gastroenterol Hepatol*. 2022 Nov;7(11):991-1004. doi: 10.1016/S2468-1253(22)00248-5. Epub 2022 Sep 8. PMID: 36087608.

Feußner, H., Ostler, D., & Wilhelm, D. (2018). Robotics and augmented reality: Current state of development and future perspectives. *Chirurg*, 10(August), 760–768. <https://doi.org/10.1007/s00104-018-0697-z>

Flynn J, Larach JT, Kong JCH, Waters PS, McCormick JJ, Warriar SK, Heriot A. Patient-Related Functional Outcomes After Robotic-Assisted Rectal Surgery Compared with a Laparoscopic Approach: A Systematic Review and Meta-analysis. *Dis Colon Rectum*. 2022 Oct 1;65(10):1191-1204. doi: 10.1097/DCR.0000000000002535. Epub 2022 Jul 15. PMID: 35853177.

Fomenko, A., & Serletis, D. (2018). Robotic Stereotaxy in Cranial Neurosurgery: A Qualitative Systematic Review. *Neurosurgery*, 83(4), 642–650. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx576>

Fu, W., Tong, J., Liu, G., Zheng, Y., Wang, S., Abdelrahim, M. E. A., & Gong, S. (2021). Robot-assisted technique vs conventional freehand technique in spine surgery: A meta-analysis. *International Journal of Clinical Practice*, 75(5). <https://doi.org/10.1111/ijcp.13964>

González-Martínez, J., Bulacio, J., Thompson, S., Gale, J., Smithason, S., Najm, I., & Bingaman, W. (2016). Technique, Results, and Complications Related to Robot-Assisted

Stereoencephalography. *Neurosurgery*, 78(2), 169–180.

<https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000001034>

Gregori, A., Picard, F., Bellemans, J., & et al. (2014, June). Handheld precision sculpting tool for unicompartmental knee arthroplasty. A clinical review. 15th EFORT Congress.

Gupta, M., Chan, T. M., Santiago-Dieppa, D. R., Yekula, A., Sanchez, C. E., Elster, J. D., Crawford, J. R., Levy, M. L., & Gonda, D. D. (2020). Robot-assisted stereotactic biopsy of pediatric brainstem and thalamic lesions. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, 1–8.

<https://doi.org/10.3171/2020.7.PEDS20373>

Huntsman, K. T., Ahrendtsen, L. A., Riggelman, J. R., & Ledonio, C. G. (2020). Robotic-assisted navigated minimally invasive pedicle screw placement in the first 100 cases at a single institution. *Journal of Robotic Surgery*, 14(1), 199–203. <https://doi.org/10.1007/s11701-019-00959-6>

Jiang, B., Pennington, Z., Azad, T., Liu, A., Ahmed, A. K., Zygorakis, C. C., Westbroek, E. M., Zhu, A., Cottrill, E., & Theodore, N. (2020). Robot-Assisted versus Freehand Instrumentation in Short-Segment Lumbar Fusion: Experience with Real-Time Image-Guided Spinal Robot. *World Neurosurgery*, 136, e635–e645. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.01.119>

Kaper, B. (2020). Learning curve and time commitment assessment in the adoption of navio robotic-assisted total knee arthroplasty. *Orthop Procs; International Society for Technology in Arthroplasty (ISTA) Meeting, 32nd Annual Congress, October 2019. Part 1 of 2*, 59–59.

Kaper, B., & Villa, A. (2019, May). Accuracy and precision of a handheld robotic-guided distal femoral osteotomy in robotic-assisted total knee arthroplasty 41. *EKS Arthroplasty Conference*.

Kayani, B., Konan, S., Huq, S. S., Tahmassebi, J., & Haddad, F. S. (2018). Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of seven cases for integration into the surgical workflow but no learning curve effect for accuracy of implant positioning. *Reference Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-5138-5>

Kayani, B., Tahmassebi, J., Ayuob, A., Konan, S., Oussedik, S., & Haddad, F. (2020). A prospective randomized controlled trial comparing biochemical, thermal, and macroscopic soft-tissue injury outcomes in conventional jig-based versus robotic total knee arthroplasty. *Orthopaedic Proceedings, The Knee Society (TKS) 2020 Members Meeting*, 22–25.

Khan, H., Dhillon, K., Mahapatra, P., Papat, R., Zakieh, O., Kim, W. J., & Nathwani, D. (2021). Blood loss and transfusion risk in robotic-assisted knee arthroplasty: A retrospective analysis. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 17(6).

<https://doi.org/10.1002/rcs.2308>

Klassen, P. D., Habetha, S., & Sauermann, S. (2021, December 9). P47 Computerassistierte Spinale Chirurgie versus Freihand-Navigation – DWG-Registerabfrage für monosegmentale TLIFs aus 2019. EPoster-Session 4 - Bildgebung, Robotik, Ultraschall, Navigation.

Kleeblad, L. J., Borus, T. A., Coon, T. M., Douchis, J., Nguyen, J. T., & Pearle, A. D. (2018). Midterm Survivorship and Patient Satisfaction of Robotic-Arm-Assisted Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty: A Multicenter Study. *The Journal of Arthroplasty*, 33(6), 1719–1726. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2018.01.036>

Lane, T. (2018). A short history of robotic surgery. *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, 100, 5–7. <https://doi.org/10.1308/rcsann.supp1.5>

Li, C., Li, W., Gao, S., Cao, C., Li, C., He, L., Ma, X., & Li, M. (2021). Comparison of accuracy and safety between robot-assisted and conventional fluoroscope assisted placement of pedicle screws in thoracolumbar spine A meta-analysis. In *Medicine (United States)* (Vol. 100, Issue 38). Lippincott Williams and Wilkins. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000027282>

Ma, S., Chen, Y., Chen, Y., Guo, T., Yang, X., Lu, Y., Tian, J., & Cai, H. (2019). Short-term outcomes of robotic-assisted right colectomy compared with laparoscopic surgery: A systematic review and meta-analysis. *Asian Journal of Surgery*, 42(5), 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.asjsur.2018.11.002>

Malkani, A. L., Roche, M. W., Kolisek, F. R., Gustke, K. A., Hozack, W. J., Sodhi, N., Acuna, A., Vakharia, R., Salem, H., Jaggard, C., Smith, L., & Mont, M. A. (2020). New Technology for Total Knee Arthroplasty Provides Excellent Patient-Reported Outcomes: A Minimum Two-Year Analysis. *Surg Technol Int.*, 36, 276–280.

Manzei-Gorsky, Schubert, von Hayek (2022). Digitalisierung und Gesundheit. Gesundheitsforschung. Interdisziplinäre Perspektiven. Band 4. NOMOS Verlagsgesellschaft.

Marchand, R. C., Sodhi, N., Khlopas, A., Sultan, A. A., Harwin, S. F., Malkani, A. L., & Mont, M. A. (2017). Patient Satisfaction Outcomes after Robotic Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty: A Short-Term Evaluation. *Journal of Knee Surgery*, 30(9), 849–853. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1607450>

Marescaux, J., & Rubino, F. (2003). The Zeus robotic system: experimental and clinical applications. *Surgical Clinics of North America*, 83, 1305–1315. [https://doi.org/10.1016/S0039-6109\(03\)00169-5](https://doi.org/10.1016/S0039-6109(03)00169-5)

Menon, M. (2020). Legends in Urology. *The Canadian Journal of Urology*, 27(3), 10201–10204.

Mergenthaler, G., Batailler, C., Lording, T., Servien, E., & Lustig, S. (2021). Is robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty a safe procedure? A case control study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 29(3), 931–938. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06051-z>

Mont, M. A., Cool, C., Gregory, D., Coppolecchia, A., Sodhi, N., & Jacofsky, D. J. (2021). Health Care Utilization and Payer Cost Analysis of Robotic Arm Assisted Total Knee Arthroplasty at 30, 60, and 90 Days. *The Journal of Knee Surgery*, 34(03), 328–337. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1695741>

Moschetti, W. E., Konopka, J. F., Rubash, H. E., & Genuario, J. W. (2016). Can Robot-Assisted Unicompartmental Knee Arthroplasty Be Cost-Effective? A Markov Decision Analysis. *The Journal of Arthroplasty*, 31(4), 759–765. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2015.10.018>

Mulpur, P., Masilamani, A. B. S., Prakash, M., Annapareddy, A., Hippalgaonkar, K., & Reddy, A. V. G. (2022). Comparison of patient reported outcomes after robotic versus manual total knee arthroplasty in the same patient undergoing staged bilateral knee arthroplasty. *J Orthop.*, 34, 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.jor.2022.08.014>

Pearle, A. D., van der List, J. P., Lee, L., Coon, T. M., Borus, T. A., & Roche, M. W. (2017). Survivorship and patient satisfaction of robotic-assisted medial unicompartmental knee arthroplasty at a minimum two-year follow-up. *Knee*, 24(2), 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2016.12.001>

Pierce, J., Needham, K., Adams, C., Coppolecchia, A., & Lavernia, C. (2020). Robotic Arm-Assisted Knee Surgery: An Economic Analysis. *The American Journal of Managed Care*, 26(7), e205–e210. <https://doi.org/10.37765/ajmc.2020.43763>

- Rossi, S. M. P., & Benazzo, F. (2023). Individualized alignment and ligament balancing technique with the ROSA® robotic system for total knee arthroplasty. *Int Orthop*, 47(3), 755–762. <https://doi.org/10.1007/s00264-022-05671-z>
- Schreuder, H. W. R., & Verheijen, R. H. M. (2008). Robotic surgery. *BJOG: An International Journal of Obstetrics and Gynaecology*, 116(2), 198–213. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0528.2008.02038.x>
- Scott, C. E. H., Howie, C. R., Macdonald, D., & Biant, L. C. (2010). Predicting dissatisfaction following total knee replacement A prospective study of 127 patients. *J Bone Joint Surg [Br]*, 92(9), 92–1253. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.92B9>
- Sephton, B. M., De la Cruz, N., Shearman, A., & Nathwani, D. (2020). Achieving discharge within 24 h of robotic unicompartmental knee arthroplasty may be possible with appropriate patient selection and a multi-disciplinary team approach. *Journal of Orthopaedics*, 19, 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.jor.2020.01.051>
- Sharma, J. D., Seunarine, K. K., Tahir, M. Z., & Tisdall, M. M. (2019). Accuracy of robot-assisted versus optical frameless navigated stereoelectroencephalography electrode placement in children. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, 23(3), 297–302. <https://doi.org/10.3171/2018.10.PEDS18227>
- Shearman, A. D., Sephton, B. M., & Nathwani, D. K. (2019, May). Robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty is associated with earlier discharge from physiotherapy and reduced length of stay compared to conventional navigated techniques. In *Archives of orthopaedic and trauma surgery*. European Knee Society: Abstract number O71.
- Sires, J. D., Craik, J. D., & Wilson, C. J. (2021). Accuracy of Bone Resection in MAKO Total Knee Robotic-Assisted Surgery. *Journal of Knee Surgery*, 34(7), 745–748. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1700570>
- Spinoglio, G., Bellora, P., & Monni, M. (2016). Robotertechnologie in der kolorektalen Chirurgie: Verfahren, aktuelle Anwendung und künftige innovative Herausforderungen. *Chirurg*, 87(8), 663–668. <https://doi.org/10.1007/s00104-016-0238-6>
- Stoffels, B., Glowka, T. R., von Websky, M. W., Kalff, J. C., & Vilz, T. O. (2020). Robot-assisted operations in visceral surgery. *Chirurg*, 91(3), 190–194. <https://doi.org/10.1007/s00104-019-01092-8>
- Strauss et al. 2022. Robotic-assisted TKA reduces surgery duration, length of stay and 90-day complication rate of complex TKA to the level of non-complex TKA. *Arch OrthopTraum*), erstes Paper, <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04618-8>
- Tejedor, P., Sagias, F., Flashman, K., Kandala, N. L., & Khan, J. (2020). The use of robotic or laparoscopic stapler in rectal cancer surgery: a systematic review and meta-analysis. In *Journal of Robotic Surgery* (Vol. 14, Issue 6). <https://doi.org/10.1007/s11701-020-01126-y>
- Tejedor, P., Sagias, F., & Khan, J. S. (2020). The Use of Enhanced Technologies in Robotic Surgery and Its Impact on Outcomes in Rectal Cancer: A Systematic Review. *Surgical Innovation*, 27(4), 384–391. <https://doi.org/10.1177/1553350620928277>
- Thilak, J., Babu, B. C., Thadi, M., Mohan, V., Arun Kumar, T., Mane, P. P., & Ravindran, G. C. (2021). Accuracy in the Execution of Pre-operative Plan for Limb Alignment and Implant Positioning in Robotic-arm Assisted Total Knee Arthroplasty and Manual Total Knee Arthroplasty: A Prospective Observational Study. *Indian Journal of Orthopaedics*, 55(4), 953–960. <https://doi.org/10.1007/s43465-020-00324-y>

van Alst, G. (2020). Digital und kooperativ - Netzwerke statt Sektoren. *KU Gesundheitsmanagement*, 40–42.

Vardiman, A. B., Wallace, D. J., Booher, G. A., Crawford, N. R., Riggleman, J. R., Greeley, S. L., & Ledonio, C. G. (2020). Does the accuracy of pedicle screw placement differ between the attending surgeon and resident in navigated robotic-assisted minimally invasive spine surgery? *Journal of Robotic Surgery*, 14(4), 567–572. <https://doi.org/10.1007/s11701-019-01019-9>

Vardiman, A. B., Wallace, D. J., Crawford, N. R., Riggleman, J. R., Ahrendtsen, L. A., & Ledonio, C. G. (2020). Pedicle screw accuracy in clinical utilization of minimally invasive navigated robot-assisted spine surgery. *Journal of Robotic Surgery*, 14(3), 409–413. <https://doi.org/10.1007/s11701-019-00994-3>

Wallace, D. J., Vardiman, A. B., Booher, G. A., Crawford, N. R., Riggleman, J. R., Greeley, S. L., & Ledonio, C. G. (2020). Navigated robotic assistance improves pedicle screw accuracy in minimally invasive surgery of the lumbosacral spine: 600 pedicle screws in a single institution. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 16(1). <https://doi.org/10.1002/rcs.2054>

Wang, M., Zhang, Y., Shi, W., Zhu, R., Li, H., & Zhao, R. (2022). Frameless Robot-Assisted Stereotactic Biopsy is Superior to Microsurgical Biopsy for Pediatric Diffuse Intrinsic Pontine Gliomas. *Journal of Neuro-Oncology*, Available at Research Square, PREPRINT (Version 1). <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1886446/v1>

Wang, T., Wang, Q., & Wang, S. (2019). A meta-analysis of robot assisted laparoscopic radical prostatectomy versus laparoscopic radical prostatectomy. *Open Medicine (Poland)*, 14(1), 485–490. <https://doi.org/10.1515/med-2019-0052>

Yeroushalmi, D., Feng, J., Nherera, L., Trueman, P., & Schwarzkopf, R. (2022). Early Economic Analysis of Robotic-Assisted Unicondylar Knee Arthroplasty May Be Cost Effective in Patients with End-Stage Osteoarthritis. *Journal of Knee Surgery*, 35(1), 39–46. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1712088>

Zhang, Q., Xu, Y., Tian, W., Le, X., Liu, B., Liu, Y., He, D., Sun, Y., Yuan, Q., Lang, Z., & Han, X. (2019). Comparison of Superior-Level Facet Joint Violations Between Robot-Assisted Percutaneous Pedicle Screw Placement and Conventional Open Fluoroscopic-Guided Pedicle Screw Placement. *Orthopaedic Surgery*, 11(5), 850–856. <https://doi.org/10.1111/os.12534>

Impressum

Inhaltliche Ausgestaltung:

Healthcare Heads GmbH

<https://www.healthcareheads.com/>

Fachbereich „Robotik in der medizinischen Versorgung“ des BVMed e.V.

www.bvmed.de

© Copyright BVMed – Bundesverband Medizintechnologie e. V.

August 2024

Vervielfältigungen, auch auszugsweise, sind nur mit ausdrücklicher Genehmigung des BVMed e.V. gestattet.