

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin / Vereinigung der Schweizerischen Hochschuldozierenden = Association Suisse des Enseignant-e-s d'Université
<b>Herausgeber:</b>	Vereinigung der Schweizerischen Hochschuldozierenden
<b>Band:</b>	45 (2019)
<b>Heft:</b>	1
<b>Artikel:</b>	Medizinoftik : Forschung und Industrie in der Schweiz
<b>Autor:</b>	Marchal-Crespo, Laura / Nef, Tobias / Sznitman, Raphael
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-893933">https://doi.org/10.5169/seals-893933</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Medizinrobotik. Forschung und Industrie in der Schweiz

Laura Marchal-Crespo\*, Tobias Nef\*\*, Raphael Sznitman\*\*\*,  
Lutz Nolte\*\*\*\*, Stefan Weber\*\*\*\*\*

„Der Wissenschaftler beschreibt was ist;  
der Ingenieur erschafft, was noch nie war.“  
–Theodore von Kármán

## 1. Einführung

Medizinrobotik ist in der Öffentlichkeit ein allgegenwärtiges Thema. Aktuell verdichten sich bemerkenswerte Fortschritte in der technischen und klinischen Forschung (Stichwort künstliche Intelligenz) zu vielen neuen Anwendungen und Systemen. Medizinroboter lassen sich grob in drei Kategorien unterteilen: Chirurgisch-interventionelle Systeme, Systeme für die physische Rehabilitation sowie Assistenzsysteme für körperlich eingeschränkte Menschen auf der Basis mechatronischer und robotischer Ansätze. An der Universität Bern konzentriert sich die Forschung auf die ersten beiden Themenbereiche, die daher im Fokus dieses Artikels stehen.

Robotik- und computergestützte Verfahren für chirurgische und interventionelle Anwendungen werden seit 30 Jahren entwickelt. Sie helfen einem Operateur, Instrumente räumlich exakt auszurichten und im Körper zu dirigieren oder vorgeplante Aufgaben, wie Bohren, Fräsen, Sägen, präzise umzusetzen. Eine Vielzahl dieser Systeme ist kommerzialisiert worden und hat weltweit Einzug in die Operationssäle gehalten. Prominenteste Vertreter sind das telemomanipulatorische System daVinci (Intuitive Surgical Inc., U.S.A.) und das Mako System für die orthopädische Endoprothetik (Stryker Inc., USA). Routinemässig werden in vielen Schweizer Spitätern sowie weltweit robotische Eingriffe, zum Beispiel bei Prostatakrebs oder zu Hüft- und Knieimplantationen, durchgeführt.

Die zweite Kategorie sind Systeme für die physische Rehabilitation von Patienten, zum Beispiel nach Schlaganfällen. Diese Roboter führen selbstständig, wiederholt und ohne Abweichung Bewegungen durch, die nicht durch einen Patienten ausgelöst werden müssen und mittels Variation von Bewegungsgeschwindigkeit und Trainingsdauer einen Therapieeffekt erzielen. Im Bereich der Rehabilitationsmedizin sind zwei Schweizer Firmen Hocoma AG und Reha Technology AG führend. Sie sind weltweit in Kliniken und Rehabilitationszentren mit Systemen zur Arm- und Beinrehabilitation von Patienten vertreten.

\* ARTORG Center for Biomedical Engineering Research,  
Universität Bern, Murtenstrasse 50, 3008 Bern.

E-mail: [laura.marchal@artorg.unibe.ch](mailto:laura.marchal@artorg.unibe.ch)  
[http://www.artorg.unibe.ch/research/mln/index\\_eng.html](http://www.artorg.unibe.ch/research/mln/index_eng.html)

ORCID 0000-0002-8008-5803



**Laura Marchal-Crespo**, Ph.D., ist SNF-Professorin am ARTORG Center for Biomedical Engineering Research der Universität Bern und Leiterin der Gruppe Motor Learning und Neurorehabilitation und angegliedert an die Gruppe Sensory-Motor Systems in der Abteilung Health Sciences and Technology der ETH Zürich. Geboren 1980 in Barcelona, folgte das Studium zum BSc Industrial Engineering (5J) mit Schwerpunkt Automatisierung und Robotik, Technical University of Catalonia, UPC, Barcelona, Spain. Dann Master's und Promotion in Mechanical and Aerospace Engineering an der University of California at Irvine, U.S.A. zum Thema haptisch angeleitete Lernprogramme für die Nutzung von Robotik-unterstützten Rollstühlen für schwerbehinderte Kinder. Arbeit in der Forschungsgruppe Sensory-Motor Systems in der Abteilung Health Sciences and Technology der ETH Zürich. Seit 2017 Förderung durch den Schweizer Nationalfond als Assistenzprofessorin mit dem Forschungsschwerpunkt: Schnittstelle Mensch – Maschine und Lernen in biologischen Systemen, Nutzung von Robotik und virtueller Realität zur Unterstützung in der Rehabilitation nach Hirnverletzungen. Preise und Auszeichnungen: Über 50 Veröffentlichungen in führenden ingenieur- und neurowissenschaftlichen Publikationen. Beste Veröffentlichung bei der Biorob 2016, University of California Dean's Dissertation Fellowship 2009, Fundación Caja Madrid Postgraduate Fellowship 2009.

\*\* ARTORG Center for Biomedical Engineering Research,  
Universität Bern, Murtenstrasse 50, 3008 Bern.

E-mail: [tobias.nef@artorg.unibe.ch](mailto:tobias.nef@artorg.unibe.ch)  
[http://www.artorg.unibe.ch/research/ger/index\\_eng.html](http://www.artorg.unibe.ch/research/ger/index_eng.html)

ORCID 0000-0002-8069-9450



**Tobias Nef**, Dr.sc.nat. ETH, ist ausserordentlicher Professor für Gerontechnologie und Rehabilitation an der Universität Bern und am Inselspital. Geboren 1977 in Flawil, St. Gallen. 1999 Studium der Elektrotechnik an der ETH Lausanne, gefolgt von Promotion in biomedizinischer Technik an der ETH Zürich in 2007. 2009 Ruf an das National Rehabilitation Institute, Washington D.C. (U.S.A.). Ruf 2010 an die Universität Bern, Gründung und Leitung Forschungsgruppe Gerontechnologie und Rehabilitation am ARTORG Center for Biomedical Engineering Research der Universität Bern und am Inselspital.

Forschungsschwerpunkte: Technologische Systeme für die Rehabilitation von hirnverletzten Patienten und Patienten mit neurodegenerativen Erkrankungen. Unter anderem auch die Nutzung von Rehabilitationsrobotik, Telerehabilitation und Monitoring-Technologien.

Preise und Auszeichnungen: Autor und Erfinder von über 80 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, Buchkapiteln und Monografien und Patenten. Wissenschaftliche Leitung der alljährlichen «Brainweek» in Bern, als Initiative der European Dana Alliance for the Brain mit dem Ziel, die interessierte Öffentlichkeit über das Gehirn und die Fortschritte in den Neurowissenschaften zu informieren. Mitglied verschiedener Fachgesellschaften und Präsident der Klinischen Neurowissenschaften Bern. ABB Research Award 2009, Hans-Eggenberger Award 2008, Swiss Technology Award 2006, Wertheimer Preis 2016 und der HumanTech Innovationspreis 2005.

\*\*\* ARTORG Center for Biomedical Engineering Research,  
Universität Bern, Murtenstrasse 50, 3008 Bern.

E-mail: [raphael.sznitman@artorg.unibe.ch](mailto:raphael.sznitman@artorg.unibe.ch)  
[http://www.artorg.unibe.ch/research/otl/index\\_eng.html](http://www.artorg.unibe.ch/research/otl/index_eng.html)

ORCID 0000-0001-6791-4753



**Raphael Sznitman**, Ph.D., ist Assistenzprofessor am ARTORG Center for Biomedical Engineering Research der Universität Bern und Gruppenleiter der Gruppe Ophthalmic Technology Laboratory (OTL). Geboren 1985 in New York, Studium B.Sc. Cognitive Systems in Computational Intelligence (2003, University of British Columbia, Canada) danach MSc und PhD (2009) in Computer Science an der Johns Hopkins University (Baltimore, USA). 2011 Post-doctoral Fellowship im Computer Vision Labor, ETH Lausanne. 2014 als Gruppenleiter am ARTORG Center und seit 2016 Assistenzprofessur an der Universität Bern. Forschungsschwerpunkte: Anwendung von künstlicher Intelligenz zur Entwicklung schnellerer und präziserer Diagnoseverfahren für die klinische Betreuung von Patienten mit chronischen Augenleiden wie Glaukom, Makuladegeneration und diabetischer Retinopathie.

Kommerzielle Aktivitäten: Translation von Forschungsergebnissen durch die Entwicklung, klinische Validierung und Zulassung von KI-basierten Medizinprodukten für die Ophthalmologie. Vermarktung von RetiNet für die Diagnose von Makuladegeneration durch RetinAI Medical AG.

Preise und Auszeichnungen: Autor von über 50 Forschungsartikeln und Erfinder von Patenten im Bereich KI Anwendungen. 2. Platz Ypsomed Innovationspreis des Ypsomed Innovationsfonds 2019, 1. Platz bei der MICCAI 2015 EndoVision Challenge, Preis für beste Lehre, JHU 2008, Mitgewinner der JHU Computer Vision Grand Challenge 2008.

\*\*\*\* ARTORG Center for Biomedical Engineering Research,  
Universität Bern, Murtenstrasse 50, 3008 Bern.

E-mail: [lutz.nolte@artorg.unibe.ch](mailto:lutz.nolte@artorg.unibe.ch)  
[http://www.artorg.unibe.ch/research/otl/index\\_eng.html](http://www.artorg.unibe.ch/research/otl/index_eng.html)



**Lutz-P. Nolte**, Dr.-Ing., ist Professor emeritus für Chirurgische Technologien und Biomechanik der Universität Bern. Geboren 1954 in Minden Westfalen, Studium an der Ruhr-Universität Bochum zum Dipl.-Ing 1980 und Promotion zum Dr.-Ing. 1983 im Fach Konstruktiver Ingenieurbau. Von 1984–87 Leitung der «Nonlinear Shell Research» Forschungsgruppe am Institut für Mechanik. 1987 Gründung und Leitung der Gruppe für Orthopädische Forschung mit Schwerpunkt Wirbelsäulenbiomechanik. 1990 Ruf an die Wayne State University in Detroit, MI, USA, als Assoziierter Professor für Maschinenebau am Bioengineering Center. 1993 Ruf an die Universität Bern und Übernahme der Abteilung für Orthopädische Biomechanik am Maurice E. Müller Institut. 2002 Ordinariat und Direktion des Instituts für Chirurgische Technologien und Biomechanik an der medizinischen Fakultät der Universität Bern. Von 2001–13 Mitgründer und Ko-Direktor des Nationalen Forschungszentrums «Computer Aided and Image Guided Medical Interventions». Von 2007–12 Mitgründer und erster Direktor des «Artificial Organ Center for Biomedical Engineering Research» der Universität Bern. Forschungsschwerpunkte: Orthopädische Biomechanik und bildgestützte Chirurgie verbunden mit einer ganzheitlichen translationalen Strategie zur Entwicklung neuartiger klinischer Behandlungsmethoden.

Kommerzielle Aktivitäten: Mitgründung der chirurgischen Navigationsfirma Medivision AG, von Orthopaedic Services FNG

und Betreuung weiterer Start-Ups im Bereich bildgestützter interventioneller Anwendungen. Zusätzlich zu den Aufgaben in leitender Forschungsfunktion: Von 2001–17 Mitglied und ab 2013 Vizepräsident der Kommission für Technologie und Innovation (KTI). Seit 2018 Experte der föderalen Innovationsagentur Innosuisse. Von 1997–2018 Mitgründer und Mitglied im Vorstand des Berufsverbands der Medtech Industrie Medical Cluster (ab 2017 Swiss Medtech). 2006 Gründung des «Competence Center for Medical Technology» zum nachhaltigen Technologietransfer von Forschungsergebnissen in der Medizintechnik.

Preise und Auszeichnungen: Autor und Erfinder von über 300 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Patenten. Swiss Technology Award mit Medivision AG 1995, Maurice E. Müller Award for Excellence in Computer Assisted Surgery 2001. Seit 2013 Mitglied der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften.

\*\*\*\*\* ARTORG Center for Biomedical Engineering Research,  
Universität Bern, Murtenstrasse 50, 3008 Bern.

E-mail: [stefan.weber@artorg.unibe.ch](mailto:stefan.weber@artorg.unibe.ch)  
[http://www.artorg.unibe.ch/research/igt/index\\_eng.html](http://www.artorg.unibe.ch/research/igt/index_eng.html)

ORCID 0000-0002-0395-7102



**Stefan Weber**, Dr.-Ing., ist ordentlicher Professor und Direktor des ARTORG Center for Biomedical Engineering Research der Universität Bern. Geboren 1972 in Erfurt, Studium an der Technischen Universität Ilmenau zum Dipl.-Ing. Automatisierung und Robotik. 1999 als Fulbright Stipendiat an der University of Southern California, Los Angeles USA. Promotion 2004 an der Humboldt Universität zu Berlin über medizinische Visualisierungsverfahren. 2005–2008 Zeit als Gruppenleiter und Vize-Direktor des Zentralinstitutes für Medizintechnik der Technischen Universität München. 2008 erfolgte der Ruf an die Universität Bern, Assistenzprofessur für Implantationstechnologie, 2012 Ordinariat und Berufung auf den Lehrstuhl für bildgestützte medizinische Verfahren.

Forschungsschwerpunkte: Bildgestützte, robotische Verfahren in der Chirurgie mit Schwerpunkt HNO- und Leberchirurgie, mit Ziel der erfolgreichen Einführung disruptiver Technologien in die klinische Anwendung und damit einhergehende Paradigmenwechsel in den Behandlungsmöglichkeiten. Etablierung neuer Verfahren in der Klinik im Bereich onkologischer Interventionen in der Leber und bei der robotischen Cochlear-Implantation. Kommerzielle Aktivitäten: CAS-One IR™, Otoplan™ und HEARO™ sind Medizintechnologien, die aus dem ARTORG hervorgegangen sind und durch CAScination AG weiterentwickelt, produziert und vertrieben werden. Aktive Unterstützung von Neuausgründungen vom ARTORG und der Universität Bern in den Bereichen Medizintechnik, Diagnostik und künstlicher Intelligenz.

Preise und Auszeichnungen: Autor und Erfinder von über 100 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Patenten. Präsident der deutschsprachigen Gesellschaft für computer- und robotergestützte Chirurgie (CURAC) und Mitglied des IEEE. Finalist The Hamlyn Symposium – Surgical Robotic Challenge 2018, Gewinner CTI Medtech Award Switzerland mit CAScination AG 2013, Gewinner Ypsomed Innovationspreis des Ypsomed Innovationsfonds mit CAScination AG 2013, Gewinner Ypsomed Innovationspreis des Ypsomed Innovationsfonds mit CAScination AG 2010.

## 2. Entwicklung der Schweizer Forschung

Das Thema Medizinrobotik spielt heute in der Schweizer Wissenschaft und Forschung sowie in der Industrie eine beachtliche Rolle und ist Ergebnis vieler wissenschaftlicher Großprojekte der letzten zwanzig Jahre. Insbesondere das von 2001 bis 2013 etablierte Nationale Kompetenzzentrum «Computergestützte und bildgeführte medizinische Eingriffe»<sup>1</sup> hat dazu beigetragen, dass sich die Schweizer Medizinrobotikforschung entfalten und international etablieren konnte. Daneben bewirken und bewirkten Förderprogramme wie NanoTera<sup>2</sup> oder Bridge<sup>3</sup>, dass viele neuartige wissenschaftliche Ansätze und Ideen ihren Weg aus der Forschung in die Klinik und teilweise auch in eine kommerzielle Nutzung fanden. Seit 2010 beschäftigt sich auch das Nationale Kompetenzzentrum Robotik (NCCR Robotics<sup>4</sup>) mit Robotertechnologien für die Verbesserung therapeutischer Ansätze in der Reharobotik.

Diese Forschungsinitiativen haben anschaulich aufgezeigt, dass Innovationsimpulse in der Medizinrobotik regelmässig aus relevanten und ungelösten klinischen Herausforderungen entstehen. Nur durch eine gemeinsame Zusammenarbeit technischer Forscher mit klinischen Experten können benutzbare und nachhaltige Lösungen entwickelt und tatsächlich umgesetzt werden.

Aus dieser Grundlagenforschung in der Schweiz ist außerdem eine umfangreiche und nachhaltige Gründerszene rund um das Thema Medizinrobotik entstanden. Diese Firmenneugründungen versuchen die Entwicklungen in neue Produkte und Dienstleistungen zu überführen und tragen damit zur künftigen Wettbewerbsfähigkeit der Schweizer Medizintechnikindustrie bei (CAScination AG, DistalMotion AG, Ophorobotics AG).

Eine bedeutende Rolle in der Umsetzung von Forschungsergebnissen in marktfähige Produkte und Verfahren spielt seit vielen Jahren die föderale Innovationsagentur Innosuisse ([www.innosuisse.ch](http://www.innosuisse.ch)) – früher bekannt als Kommission für Technologie und Innovation (KTI) – mit ihren verschiedenen Förderinstrumenten. Dazu gehören einerseits die unbürokratische Förderung und flexible Handhabung von zukunftsträchtigen Entwicklungen im Rahmen von F&E Projekten, anderseits mit erfolgreich etablierten Strukturen die Start-up Hilfe für jene Jungunternehmer, die Fachkompetenz und unternehmerischen

Geist mitbringen, um mit ihren Ideen den Schritt in den Markt zu wagen. Dies lässt sich exemplarisch am Nationalen Forschungszentrum Co-Me ablesen, welches in mehr als 40 KTI F&E Projekte mit industriellen Partnern mündete und KTI Start-up Förderung für mehr als 20 Jungunternehmen erhielt, womit mehrere hundert hochqualifizierte Arbeitsplätze nachhaltig geschaffen werden konnten.

## 3. Roboter für chirurgische Eingriffe und Interventionen

Grundsätzlich sollen chirurgische Roboter präzisere und schnellere Eingriffe durch Kompensation der Einschränkungen menschlicher Sinne und der begrenzten Manipulationsfähigkeiten von Händen und Fingern ermöglichen. Gleichzeitig sollen Nebenwirkungen für den Patienten reduziert und eine schnellere Genesung des Patienten erreicht werden.

Eine mögliche Klassifizierung von chirurgisch-interventionellen Medizinrobotern ist die Unterteilung in interaktive Telemanipulations- und programmierbare Instrumentenpositioniersysteme. Interaktive Telemanipulatoren ermöglichen eine joystickbasierte Steuerung von laparoskopischen Instrumenten wie das zuvor erwähnte daVinci System in der Schlüsselhochchirurgie oder die gezielte räumliche Steuerung von Führungsdrähten zur Ablage von Gefässkathetern an beliebigen Stellen im Körper (Magellan). Programmierbare Roboter für die Instrumentenpositionierung realisieren in 3D Bildern (CT oder MRI) geplante chirurgische Aktivitäten wie Bohren oder Fräsen am Zielobjekt form- und lagegetreu. Dabei führen die Roboter die Instrumente selber, (RoboDoc, Hearo) oder werden durch den Arzt bewegt und nur an den Arbeitsraumgrenzen gestoppt (Mako) oder stellen als «Hülsenhalter» die exakte räumliche Ausrichtung eines ansonsten durch den Arzt bedienten und geführten Instrumentes sicher (Rosa Medtech).

Die in der Klinik aktuell eingesetzten Systeme unterstehen dabei immer der vollständigen Kontrolle des Operateurs. Chirurgen, Technologen, Zulassungsverfahren und Patienten haben bisher nur robotische Systeme akzeptiert, die entweder eine Verlängerung oder Erweiterung der menschlichen Handhabe sind oder den Arbeitsraum des Chirurgen um einen «unermüdbaren Arm» oder einen «geschärften Blick» erweitern.

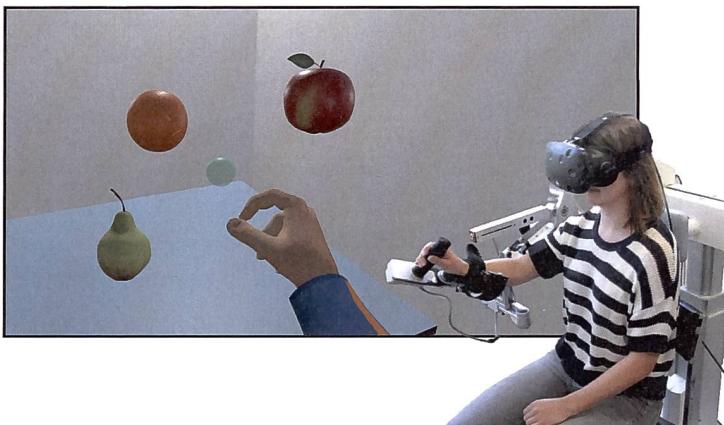
Dieser technologische Status quo steht derzeit zur Debatte. Erhöhte Rechenkapazitäten, Entwicklungen bei Sensortechnologien und Fortschritte in den Herstellungsverfahren machen es möglich, robotische Systeme und damit Behandlungsverfahren anzuden-

<sup>1</sup> <http://www.snf.ch/en/researchinFocus/nccr/nccr-co-me> (2. April 2019)

<sup>2</sup> <http://www.nano-tera.ch> (2. April 2019)

<sup>3</sup> <http://www.snf.ch/en/funding/programmes/bridge/Pages/default.aspx> (2. April 2019)

<sup>4</sup> <https://nccr-robotics.ch> (2. April 2019)



**Abb. 1.** Armtherapie mit dem Arentrainer Armeo®Spring (Hocoma, Schweiz). Der Benutzer interagiert zu Trainingszwecken mit virtuellen Objekten, welche über eine Videosichtbrille Brille (HTC Vive, USA) dargestellt werden.

ken und zu entwickeln, die durch den menschlichen Arzt gar nicht durchführbar wären. Beispielsweise können miniaturisierte robotische Systeme ange- dacht werden, die sich teilautonom durch flüssiges Medium (Blut, Augenwasser) zu einem Ziel bewegen, um dort eine Aktivität zu verrichten, wie beispiels- weise ein Medikament abzugeben (Kim et al., 2016).

In unserer eigenen Forschung haben wir uns viele Jahre mit einem ganz anderen Beispiel für eine höher- automatisierte robotische Lösung zur Anwendung bei Hörgeräteimplantationen beschäftigt (siehe Bild 2). Hierbei besteht das System aus einer speziellen Planungssoftware, einem optischen Positions- messystem (ähnlich eines GPS Navigationssystems) und einem robotischen Bohrsystem ( serielle Kinematik mit 5 Freiheitsgraden). Damit kann der HNO-Chirurg mit einem Bohrer (1.8 mm Durchmesser) direkt von der Schädelaussenseite (hinter dem Ohr) bis zum Innenohr (der Cochlea/Hörschnecke) bohren, um anschliessend die Elektrode des Hörimplantats in die Cochlea einzuführen.

Unser robotisches Bohrsystem ermöglicht eine absolute Bohrgenauigkeit von unter 0.3 mm. Dazu müssen vor dem Eingriff vier kleine Titan-Schrauben hinter dem Ohr in den Knochen eingebracht werden. Danach wird der Patient im CT gescannt und aus den Bildern werden die anatomischen Strukturen mittels einer Software extrahiert und dreidimensional modelliert. Ausserdem wird der Verlauf des Bohrtunnels definiert. Anschliessend kann die Bohrung durch den Roboter realisiert werden. Insbesondere während des Bohrens in der Nähe des Gesichtsnervs, der im Schädel verläuft, agieren mehrere voneinander unabhängige Sicherheitssysteme. So wird mittels elektrischer Stimulationen geprüft, ob die Bohrung in einer sicheren Entfernung zum Gesichtsnerv verläuft und falls erforderlich, kann der Roboter gestoppt werden. Ausserdem wird beim Bohren die Bohrkraft

kontinuierlich gemessen und mit den verfügbaren Dichteinformationen aus dem CT abgeglichen um zu prüfen, ob der Roboter auf dem geometrisch exakten Weg ist. Ist der Bohrvorgang abgeschlossen, werden die Referenzschrauben wieder entfernt, das Cochlearimplantat eingesetzt und der Hautschnitt vernäht. Ein derartiger Eingriff mit nur einer kleinen Bohrung direkt in die Cochlea, die extrem nahe an Nerven vorbeiführt, kann nicht durch einen Menschen, auch nicht unter Verwendung von derzeit verfügbaren Hilfsmitteln, wie z.B. Mikroskopen, realisiert werden (Weber et al., 2017).

Es wird ausserdem erwartet, dass Methoden des ma- schinen Lernens auf die künftige Entwicklung von Medizinrobotern Einfluss nehmen werden. So könnten Algorithmen in Kamerabildern (von Mikrosko- pen oder Endoskopen) vollautomatisch anatomische Strukturen erkennen und dreidimensional modellieren. Es ist rasch erkennbar, dass darauf basierend eine (automatische) Steuerung von Medizinrobotern denkbar ist. Die automatische Bestimmung von In- strumentenpositionen in endoskopischen Bilddaten kann zur Entwicklung geschlossener Regelkreise vi- deogesteuerter Roboter herangezogen werden (Du et al., 2018). Mit derartigen Ansätzen können kame- ragesteuerte teilautonome Roboter im Tiermodell bereits chirurgische Nähte platzieren (Shademan et al., 2016).

#### 4. Robotiksysteme für die Neurorehabilitation

In der Rehabilitation von Patienten mit Verletzungen des zentralen Nervensystems (Schlaganfall, Schädel-Hirntrauma, Querschnittlähmung), insbesonde- re beim Training der motorischen Fähigkeiten, haben sich intensive, physiotherapeutische Behandlungsme- thoden als bemerkenswert effektiv erwiesen. Diese Methoden können vor allem die neurologischen Ausfälle durch häufige und intensive Übungssequen- zen verringern und das Wiedererlernen der verlorenen Fertigkeiten ermöglichen (Kwakkel et al., 2004; French et al., 2016). Mit dem Ziel die Dauer und die Intensität der Therapie weiter zu erhöhen, verwen- den heute viele Therapeuten Rehabilitationsroboter für die unteren und die oberen Extremitäten als Er- gänzung zur manuellen Therapie. Insbesondere bei der Gangtherapie vereinfachen Gangroboter die körperlich anstrengende manuelle Arbeit der The- rapeuten und ermöglichen intensivere und längere Therapiesequenzen.

Bei der roboterunterstützten Therapie nach Schlag- anfall wird zum Beispiel die Bewegung des betroffe- nen Arms und der Hand des Patienten von dem The- rapieroboter unterstützt. Der Patient blickt dabei auf

ein grafisches Display (z.B. Computermonitor, Virtual Reality Brillen), auf dem alltagsrelevanten Aufgaben virtuell dargestellt werden (z.B. Kochen, Zähne putzen). Kraft- und Bewegungssensoren messen dabei die Aktivität des Patienten und unterstützen den Patienten bei der Bewegungsausführung. Verschiedene Unterstützungsparadigmen sind möglich (z.B. «full guidance», «assist-as-needed»). In randomisierten Studien konnte gezeigt werden, dass die Robotertherapie im Vergleich zur traditionellen manuellen Therapie ähnliche oder leicht bessere Effekte zeigt (Klamo-roth-Marganska et al., 2014; Mehrholz et al., 2017).

Die Vermutung liegt nahe, dass die heutigen Unterstützungsparadigmen sub-optimal sind und dass mit patientenspezifischen Trainings die Therapieeffekte weiter gesteigert werden können. Daher konzentriert sich unsere Forschung auf neue patientenspezifische Strategien, bei denen der Therapieroboter die Schwierigkeit des Trainings an die individuellen Bedürfnisse des Patienten anpasst. Abhängig von der Bewegungsaufgabe, den Fähigkeiten und dem Alter des Patienten vergrößert oder verkleinert der Roboter den Bewegungsfehler. Durch Verstärkung von Bewegungsfehlern werden Patienten dazu motiviert, ihre Bewegungen weiter zu verbessern (Marchal-Crespo et al., 2014). Ebenfalls erforscht das Team wie neue Technologien der virtuellen und augmentierten Realität verwendet werden können, um die Trainingseinheiten noch besser auf die Alltagssituation replizieren zu können. Die Nutzung von virtuellen Übungsvideos, die dem Patienten über eine Videobrille eingespeist werden, können die Grundlage der Übungen bilden, wie zum Beispiel das Greifen eines bekannten Objektes wie eines Apfels oder einer Orange (siehe Bild 1). So kann die Motorplastizität des Gehirns zur Neuausbildung der verlorenen Gehirnfunktionen genutzt werden. Durch die Entwicklung von Trainingsprogrammen, die sowohl individuell abgestimmt sind als auch durch eine «closed-loop» Strategie das Training nach jeder Runde anpassen können, können eine Bandbreite an Patienten mit denselben Robotern arbeiten. Dies wird Rehabilitationsroboter kostengünstiger und effektiver machen und die bereits in den Kliniken vorhandenen Rehabilitationsroboter optimal zum Nutzen der Patienten auslasten.

## 5. Berufsbild – Ingenieur für Medizinrobotik

Es reicht heute nicht mehr als Ingenieur mathematisch-wissenschaftlich und technische Fächer in Theorie und Praxis zu beherrschen. Medizintechnik Ingenieure müssen für ihre Arbeit ein immer tieferes Verständnis vom Aufbau des menschlichen Körpers, dessen Funktionsweise und vorhandener Krankheitsbilder entwickeln. Darauf aufbauend ist ein tieferge-



**Abb. 2.** Die weltweit erste robotische Cochlea-Implantation im Inselspital, Universität Bern, durchgeführt vom Team der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, Kopf- und Halschirurgie unter der Leitung von Prof. Dr. Marco Caversaccio mit dem von der IGT-Gruppe am ARTORG entwickelten Cochlea-Roboter.

hendes Verständnis der verfügbaren diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten zusammen mit deren immanenten Vorteilen und Nachteilen erforderlich. Nur auf der Basis umfangreichen medizinischen Fachwissens kann ein Ingenieur gemeinsam mit beteiligten Klinikern neue Behandlungsmethoden entwickeln, die signifikante Vorteile hinsichtlich Wirksamkeit, Sicherheit und Kosteneffektivität haben. In unserer Doktorandenausbildung nutzen wir dazu das Bild des Turing-Tests<sup>5</sup>. Die Doktoranden sollten gegen Ende ihres Projektes in der Lage sein, mit einem Kliniker ein medizinisches Fachgespräch (im Dissertations-thema) zu führen, ohne dass der Kliniker sofort merkt, dass er mit einem Ingenieur spricht. Dieser Anspruch soll aufzeigen wie umfangreich klinisches Wissen bei einem Ingenieurwissenschaftler sein muss, um disruptive Lösungen erarbeiten zu können.

Darüber hinaus ist ein hohes Kompetenzniveau auch bei regulatorischen Anforderungen (Medizinprodukt-richtlinie MDR, FDA, Qualitätsmanagement), technischen Normenforderungen und Standardisierungen (z.B. technische Sicherheit, Biokompatibilität, Sterilität, Datensicherheit, funktionelle Sicherheit) sowie bei der Organisation, Durchführung und Auswertung von klinischen Studien (Medizinstatistik, Ethik, Studienmethodik) zwingend.

In der Summe muss ein technisches Expertenteam in der Lage sein, den hochvariablen Ablauf eines

<sup>5</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Turing-Test> (2. April 2019)

chirurgischen Eingriffes in ein möglichst mächtiges Prozessmodell zu übersetzen, um darauf basierend einen technischen Algorithmus in Form von Hardware und Software zu synthetisieren, der die Grundlage eines Medizinproduktes bildet.

Der Master-Studiengang Medizintechnik der Universität Bern ist in seiner Anbindung an eine medizinische Fakultät einzigartig und der Umfang medizinisch orientierter Lehrveranstaltung überdurchschnittlich. Die Ausbildung zukünftiger Medizintechnik-Ingenieure ist auf die Vermittlung umfangreichen klinisch-medizinischen Wissens in verschiedenen technischen Bereichen (Implantate, musculoskeletales System und bildgestützte Technologien) ausgerichtet. Zusammen mit dem entsprechenden Doktoratsprogramm am ARTORG Zentrum der Universität Bern sowie dem Studiengang «MAS/DAS/CAS in Translation and Entrepreneurship in Medicine» des Schweizer Instituts für Translation und Unternehmertum SITEM<sup>6</sup> werden hier Ingenieure ausgebildet, die nicht nur technisch auf der Höhe der Zeit sind.

## 6. Ausblick

Obwohl allgemein davon ausgegangen wird, dass das Potential der Medizinrobotik erheblich ist und diese

Technologie in der Zukunft der Medizin eine noch grössere Rolle spielen wird, ist es (fast) unmöglich, spezifischere Aussagen zu treffen. Aus Sicht der Forschung sind Themen rund um höhergradige Automatisierung von chirurgischen Robotern bis hin zu teilautonomen Systemen denkbar, die mit Hilfe von Methoden des maschinellen Lernens implementiert werden können.

Allgemein trägt der vorhandene technische Fortschritt zu einer immer höheren Integration von Sensor- und Antriebstechnologien, erhöhten Echtzeit-Rechenkapazitäten und Verfügbarkeit neuartiger Produktionsverfahren (3D-Druck etc.) bei. Hochspezifische Robotiklösungen können dann auch bei den in der Medizintechnik erwartbar geringen Stückzahlen (um den Faktor 102) kosteneffektiv realisiert werden.

Eine Reihe von Schweizer Firmen (siehe oben) versucht aktuell mit disruptiven Robotiklösungen den aufwendigen und langwierigen Weg in den Medizintechnikmarkt zu gehen. Darüber hinaus wird es für die Schweizer Medizintechnikbranche interessant sein als Zulieferer an der zu erwartenden Wertschöpfung zu partizipieren und die vorhandenen Kompetenzen (Instrumententechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik, Bildverarbeitung) einzubringen. ■

<sup>6</sup> <https://sitem-insel.ch/en/> (2. April 2019)

## Literatur

- Du, X. et al. (2018) 'Articulated Multi-Instrument 2-D Pose Estimation Using Fully Convolutional Networks,' *IEEE transactions on medical imaging*, 37(5), pp. 1276–1287. doi: 10.1109/TMI.2017.2787672.
- French, B. et al. (2016) 'Repetitive task training for improving functional ability after stroke,' *The Cochrane database of systematic reviews*. England, 11, p. CD006073. doi: 10.1002/14651858.CD006073.pub3.
- Kim, S. et al. (2016) 'Fabrication and Manipulation of Ciliary Microrobots with Non-reciprocal Magnetic Actuation,' *Scientific Reports*. The Author(s), 6, p. 30713. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep30713>.
- Klamroth-Marganska, V. et al. (2014) 'Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial,' *The Lancet. Neurology*. England, 13(2), pp. 159–166. doi: 10.1016/S1474-4422(13)70305-3.
- Kwakkel, G. et al. (2004) 'Effects of augmented exercise therapy time after stroke: a meta-analysis,' *Stroke*. United States, 35(11), pp. 2529–2539. doi: 10.1161/01.STR.0000143153.76460.7d.
- Marchal-Crespo, L. et al. (2014) 'Learning a locomotor task: with or without errors?,' *Journal of neuroengineering and rehabilitation*. England, 11, p. 25. doi: 10.1186/1743-0003-11-25.
- Mehrholz, J. et al. (2017) 'Is body-weight-supported treadmill training or robotic-assisted gait training superior to overground gait training and other forms of physiotherapy in people with spinal cord injury? A systematic review,' *Spinal cord*. England, 55(8), pp. 722–729. doi: 10.1038/sc.2017.31.
- Shademan, A. et al. (2016) 'Supervised autonomous robotic soft tissue surgery,' *Science Translational Medicine*, 8(337), p. 337ra64 LP-337ra64. doi: 10.1126/scitranslmed.aad9398.
- Weber, S. et al. (2017) 'Instrument flight to the inner ear,' *Science Robotics*, 2(4). Available at: <http://robotics.sciencemag.org/content/2/4/eaa4916.abstract>.