

# Mensch-Roboter-Interaktion: vernetzte, lernfähige Maschinen in der Medizin

## Human-Robot Interaction: Networked, Adaptive Machines in Medicine



### Autoren

Hamid Sadeghian, Abdeldjalil Naceri, Sami Haddadin

### Institut

Munich Institute of Robotics and Machine Intelligence (MIRMI), Technische Universität München

### Schlüsselwörter

Mensch-Roboter-Interaktion, Haptisches Feedback, Tele-mezizin

### Key words

Human-Robot Interaction, Haptic Feedback, Tele-medicine

### Bibliografie

Laryngo-Rhino-Otol 2022; 101: S186–S193

DOI 10.1055/a-1663-0803

ISSN 0935-8943

© 2022. Thieme. All rights reserved.

This is an open access article published by Thieme under the terms of the Creative Commons Attribution-NonDerivative-NonCommercial-License, permitting copying and reproduction so long as the original work is given appropriate credit. Contents may not be used for commercial purposes, or adapted, remixed, transformed or built upon. (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Georg Thieme Verlag, Rüdigerstraße 14, 70469 Stuttgart, Germany

### Korrespondenzadresse

Hamid Sadeghian  
hamid.sadeghian@tum.de

### ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz intelligenter Roboter und anderer KI-Technologien im Gesundheitswesen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Die Fortschritte im Bereich Leichtbauroboter und taktile Roboter bieten eine große Chance für eine breite Palette von Anwendungen, von der medizinischen Untersuchung, Diagnose und therapeutischen Verfahren bis hin zur Rehabilitation und Assistenzrobotern. Indem sie die komplementären Stärken von Menschen und computerbasierten Technologien nutzen, sind die derzeitig verfügbaren Verfahren sogar potenziell überlegen. Ziel des Artikels ist es, die Bedeutung der Mensch-Roboter-Interaktion in diesen Kontexten herauszuarbeiten und dabei die technologischen Anforderungen und Herausforderungen bei der Entwicklung von menschenzentrierten Roboterplattformen für medizinische Anwendungen zu berücksichtigen.

### ABSTRACT

The application of robotic and intelligent technologies in healthcare is dramatically increasing. The next generation of lightweight and tactile robots have provided a great opportunity to be used for a wide range of applications from medical examination, diagnosis, therapeutic procedures to rehabilitation and assistive robotics. They can potentially outperform current medical procedures by exploiting the complementary strengths of humans and computer-based technologies. In this study, the importance of human-robot interaction is discussed and technological requirements and challenges in making human-centered robot platforms for medical applications is addressed.

### Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

S1

Abstract

S1

1. Einleitung

S2

2. Die Bedeutung von MRI/MRK

S2

3.	Technologische Anforderungen	S4
3.1	Mechanische Konstruktionsüberlegungen	S4
3.2	Sensorik und Regelungsparadigmen	S4
4.	Technologische Herausforderungen	S6
5.	Schlussfolgerungen und künftige Entwicklungen	S7
	Literatur	S7

## 1. Einleitung

Für die Medizinrobotik findet sich eine Vielzahl von Anwendungen, darunter chirurgische und interventionelle Verfahren, Rehabilitation und Assistenz, Diagnose u.v.m. Allen gemein ist, dass Roboter und Menschen (PatientIn und/oder Ärztin/Arzt) sich den Arbeitsbereich teilen. Dies ist bei Industrierobotern noch nicht überall der Fall, da diese in der Regel in einem strukturierten und von Menschen getrennten Arbeitsbereich eingesetzt werden. Die Einführung eines Roboters in die menschliche Umgebung erfordert vor allem aus Sicherheitsgründen zusätzliche Vorsichtsmaßnahmen und Vorkehrungen. In der Regel wird der Roboter im selben Raum installiert, in dem sich auch PatientInnen und medizinisches Personal aufhalten. Nur bei telemedizinischen Anwendungen, wird der Roboter in erheblicher Entfernung von Ärztin oder Arzt installiert (von einigen Metern bis zu Hunderten von Kilometern). Der Roboter kann autonom gesteuert werden, basierend auf einem vordefinierten Programm, halbautonom durch direkte Führung des Personals oder der PatientInnen, mit nachgiebiger Interaktion, oder im Tele-Operations- bzw. sogar Tele-Präsenz-Modus über ein haptisches Eingabegerät. Bis 2050 wird der Anteil der über 60-jährigen in vielen europäischen Gesellschaften über 30 % betragen [1]. Die Zunahme des Anteils älterer Menschen an der Bevölkerung ist so dramatisch, dass sie als „stille Revolution“ bezeichnet wird [2]. Das bedeutet wiederum, dass altersbedingte Behinderungen und Krankheiten in naher Zukunft zu einer weltweiten Krise führen können. In den letzten zehn Jahren wurden die nationalen Programme zur Entwicklung intelligenter Gesundheitseinrichtungen wie Assistenz- und Rehabilitationsroboter, chirurgische Roboter und telemedizinische Systeme beschleunigt. Dieser Trend scheint sich im laufenden Jahrzehnt noch schneller fortzusetzen, da die Anforderungen an die Gesundheitstechnologien steigen, um den Menschen ein längeres Leben bei verbesserter Lebensqualität zu ermöglichen [3]. Zentralisierte und telemedizinische Gesundheitssysteme schaffen Zugang zu medizinischen Leistungen unabhängig vom Wohnort [4]. Es gibt auch Belege dafür, dass die robotergestützte Telemedizin auch aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv ist [5]. Um das volle Potenzial solcher Modelle auszuschöpfen, müssen jedoch sowohl die Technik als auch die Infrastruktur entsprechend vorbereitet werden.

In letzter Zeit und insbesondere im Zuge der COVID-19-Pandemie hat die Telemedizin besondere Aufmerksamkeit erlangt. Studien haben gezeigt, dass das Infektionsrisiko des medizinischen Personals dringender Aufmerksamkeit bedarf, es muss besser geschützt werden, um die Verbreitung von Viren zu verhindern [6]. Es ist davon auszugehen, dass sich das Gesundheitspersonal bei den Patienten anstecken kann, wodurch sich das Risiko einer Verbreitung der Infektion bei anderen PatientInnen und beim medizinischen Personal erhöht. Um dieses Problem anzugehen, hat zum Beispiel die Firma Franka Emika in Zusammenarbeit mit dem Klinikum rechts der Isar in München und einem Team am MIRMI eine Tele-Diagnose-Station entwickelt. Sie basiert auf dem taktilen Roboterarm Panda, der einen Nasen-Rachen-Abstrich und notwendige Werkzeuge zur Untersuchung der Mundhöhle enthält. Der Arzt ist über einen Führungsroboter mit der Diagnosestation verbunden und kann so den Roboterarm aus der Ferne steuern [7]. Für Ultraschalluntersuchungen wird an ähnlichen Aufbauten gearbeitet [8].

Viele bestehende telemedizinische Ansätze beinhalten noch keinen Roboter und konzentrieren sich hauptsächlich auf digitale und Internet-of-Things (IoT)-Technologien, die vernetzte Gesundheitsinformationen, elektronische Krankenakten und Audio-Video-Streams ermöglichen [9]. Für medizinische Szenarien, die eine physische Interaktion beinhalten, sind neue fortschrittliche, auf Robotik basierende Technologien, Infrastrukturen und Paradigmen für die physische Interaktion zwischen Arzt und Patient erforderlich. Kürzlich wurde beispielsweise ein duales Arzt-Patienten-Zwilling-Paradigma vorgestellt [10], das zwei roboterbasierte Zwillinge umfasst, von denen einer die Ärztin oder den Arzt (auf der Patientenseite) und einer den Patienten (auf der Arztseite) repräsentiert. Jeder Roboterzwilling dient als multimodaler Sensor sowie als physischer Avatar seines menschlichen Gegenstücks, und ein bidirektionaler telemedizinischer Ansatz ermöglicht eine natürliche physische Interaktion zwischen dem Arzt und dem Patienten.

Insgesamt lassen sich die Vorteile von medizinischen und assistiven Robotern in vier Hauptbereiche unterteilen:

- Verbesserung der technischen Fähigkeiten zur Durchführung von Prozessen durch Nutzung der sich ergänzenden Stärken von Menschen und Robotern (► **Tab. 1**)
- Erhöhung der Sicherheit durch Einbeziehung der technischen Leistungsfähigkeit und aktiver Unterstützung (z. B. durch virtuelle Wände, automatischer Verringerung des Tremors usw.)
- Einbeziehung von Online-Informationen aus verschiedenen Quellen und Evidenzbasierung des Verfahrens durch die Aufzeichnung sensorischer Daten
- Mögliche Durchführung von medizinischen Eingriffen aus der Distanz durch Telemedizin

Abgesehen von den oben genannten Vorteilen, die für Medizin- und Assistenzroboter erwartet werden, erfordert der Einsatz eines Roboters in menschlicher Umgebung viele Vorkehrungen und Überlegungen im Vorfeld. Im weiteren Verlauf dieses Artikels werden jene Überlegungen erörtert, die hauptsächlich für die Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) und Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) relevant sind.

## 2. Die Bedeutung von MRI/MRK

Serviceroboter, die in der Umgebung von Menschen eingesetzt werden, müssen direkt und vor allem haptisch mit diesen interagieren. Das kann Seite an Seite geschehen, indem sie sich einen Arbeitsbereich teilen, oder durch direkte Integration, wie es bei Prothesen oder Exoskeletten der Fall ist. Die Interaktion kann sowohl auf kognitiver als auch auf physischer Ebene stattfinden. Auf der kognitiven Ebene muss der Roboter in der Lage sein, mit dem Menschen durch Audio- und Videoübertragung, Gesten, Mimik usw. zu kommunizieren. Diese Funktionen sind teilweise in vielen Computern und Smartphone-Anwendungen vorhanden und können daher auch in die Roboter integriert werden. Der Roboter muss in der Lage sein, diese wahrzunehmen, zu interpretieren und entsprechend zu reagieren. Solche Funktionen sind auch in vielen Robotik-Plattformen in der Forschung vorhanden. Der GARMi-Roboter (► **Abb. 1**) ist beispielsweise in der Lage, einige verbale Befehle zu erkennen oder anhand des menschlichen Gesichtsausdrucks zu reagieren [10]. Diese sozialen Merkmale ermöglichen dem Roboter eine menschenbezogene Interaktion und werden hauptsächlich durch die

Verarbeitung der von der Kamera und den Mikrofonen aufgenommenen Daten mittels maschineller Lernverfahren gewonnen.

Eine der revolutionärsten und anspruchsvollsten Eigenschaften von Servicerobotern ist die Fähigkeit auch physisch mit Menschen zu interagieren. Es liegt auf der Hand, dass die physische Mensch-Roboter-Interaktion (pMRI) ganz neue Herausforderungen stellt. Im Gegensatz zu Industrierobotern, die meist schwer und steif sind, um eine hohe Präzision zu gewährleisten, müssen die in menschlichen Umgebungen eingesetzten Roboter leicht und vor allem nachgiebig konstruiert bzw. geregelt sein. Dies gilt insbesondere für Anwendungen, die physische Interaktionen erfordern, jedoch nicht nur um unerwartete Stöße des Roboters zu vermeiden, sondern auch für die Ausführung kollaborativer Aufgaben, die einen gezielten Austausch von Kräften über den gesamten Körper des Roboters erfordern. So ist es in vielen Anwendungen der Mensch-Roboter-Kollaboration unbedingt erforderlich, den Roboter-Endeffektor oder den Körper des Roboters kinästhetisch zu bewegen. Um die Sicherheit des Menschen zu gewährleisten, wurden bereits umfangreiche Studien durchgeführt [12, 13], um das Verletzungsrisiko während der physischen Interaktion zu bewerten und eine systematische Einhaltung der Sicherheit in der Mensch-Roboter-Interaktion zu erlauben.

Neben den oben genannten Überlegungen zur MRI ist die Fähigkeit des Roboters zur Zusammenarbeit mit dem Menschen von wesentlicher Bedeutung. Wenn Mensch und Roboter denselben Arbeitsbereich teilen, können sie als Team auf dasselbe Ziel hinarbeiten. In diesem Fall muss der Roboter die Handlungen des Menschen wahrnehmen, antizipieren und komplementär agieren können, um so ein gemeinsames Handeln zu gewährleisten und konfliktreiche Bewegungen bzw. Interaktionen zu vermeiden, sodass der Mensch im Mittelpunkt der Zusammenarbeit steht.



► **Abb. 1** GAMI, ein intelligenter Serviceroboter für die Anwendung im Alltag oder im Gesundheitsbereich.

► **Tab. 1** Komplementäre Stärken von Mensch und Roboter (ursprünglich erhoben für chirurgische Aufgaben [11])

	Mensch	intelligenter Roboter
<b>Stärken</b>	Exzellentes Urteilsvermögen	Exzellente geometrische
	Exzellente Hand-Augen Koordination	Genauigkeit
	Exzellente Geschicklichkeit (im natürlichem menschlichen Maßstab)	Ermüdet nicht, stabile Performanz Unempfindlich gegen ionisierende Strahlung
	Kann mehrere Informationsquellen integrieren und nutzen	Operiert auf diversen Skalen bzgl. Bewegung und Nutzlast
	Leicht auszubilden (lernfähig)	Fähigkeit zur Integration von numerischen und Sensordaten aus mehreren Quellen
	Vielseitig und improvisationsfähig	
<b>Grenzen</b>	Neigung zu Müdigkeit und Unaufmerksamkeit	Schlechtes Urteilsvermögen
	Eingeschränkte Feinbewegungskontrolle (Tremor)	Eingeschränkte Hand-Augen Koordination
	Begrenzte Manipulationsfähigkeit und Geschicklichkeit außerhalb des natürlichen Rahmens	Begrenzte Geschicklichkeit
	„Klobige“ Endeffektoren (Hände)	Passen sich schwer an neue Situationen an
	Begrenzte geometrische Genauigkeit	Begrenzte haptische Erkennung (heute)
	Schwer steril zu halten	Begrenzte Fähigkeit, komplexe Informationen zu integrieren und zu interpretieren
	Strahlungs- und infektionsgefährdet	

► **Tab. 2** Die wichtigsten Sensor- und Interaktionssteuerungsfunktionen des Panda-Roboterarms der Franka Emika GmbH, die ihn für taktile Anwendungen qualifizieren [14].

SensorSpezifikationen	
Kraftauflösung	< 0,05 N
Relative Kraftgenauigkeit	0,8 N
Kraftwiderholbarkeit	< 0,05 N
Drehmomentauflösung	< 0,02 Nm
Interaktionsspezifikationen	
Drehmomentfrequenz	1 kHz
Minimal regelbare Kraft	0,05 N
Kraftregelung Bandbreite	10 Hz
Teaching-Kraft	2 N
Kollisionsdetektionszeit	< 2 ms
Nominelle Kollisionsreaktionszeit	< 50 ms

### 3. Technologische Anforderungen

Im vorherigen Abschnitt wurde die Bedeutung von MRI/MRK erörtert. Die Gewährleistung von Sicherheit ist eine der wichtigsten technologischen Anforderungen, damit ein Roboter für menschen-nahe Anwendungen geeignet ist. Die Sicherheit von Interaktion kann durch die Kombination verschiedener Strategien gewährleistet werden. Im Allgemeinen können die technologischen Anforderungen aus zwei Blickwinkeln betrachtet werden: zum einen anhand mechanischer Konstruktionsüberlegungen, zum anderen aus Perspektive von Sensorik und Steuerungsparadigmen.

#### 3.1 Mechanische Konstruktionsüberlegungen

Ein mechanischer Roboterarm ist das zentrale Element in vielen Anwendungen der Servicerobotik. Er muss so beschaffen sein, dass er durch die Montage geeigneter Werkzeuge an seinem Endeffektor leicht an jede Aufgabe angepasst werden kann. Darüber hinaus muss er menschenkompatibel sein, also ein hohes Verhältnis zwischen Nutzlast und Gewicht aufweisen sowie über genügend Freiheitsgrade für die jeweiligen Aufgaben verfügen. Trägheit und Reibung des Roboters sind entscheidende Parameter, die die mechanische Bandbreite des Systems beeinflussen. Diese Parameter lassen sich nicht ohne weiteres durch aktive Steuerung des Systems beeinflussen. Dies bedeutet, dass es fast unmöglich ist, von einem starren und schweren Roboter Sicherheit zu verlangen. Gefragt sind vielmehr taktile Leichtbauarme mit hochintegrierten Gelenken, die Motor, Getriebe, Bremse, Gelenkpositions- und Drehmomentsensoren sowie Leistungselektronik umfassen. Das System muss außerdem über eine zuverlässige Drehmomentsteuerung mit hoher Bandbreite und geringer Reaktionszeit verfügen. Besonders der Tastsinn ist dabei entscheidend und hängt von hochauflösenden Drehmomentsensoren am Abtrieb jedes Gelenks ab. Die genannte hohe Auflösung und Genauigkeit ermöglicht es dem Roboter, die Umgebung dynamisch zu erfassen und auf physikalische Interaktionen angemessen zu reagieren. ► **Tab. 2** zeigt beispielhaft die

wichtigsten Sensor- und Interaktionsspezifikationen für den Panda-Roboterarm von Franka Emika [14].

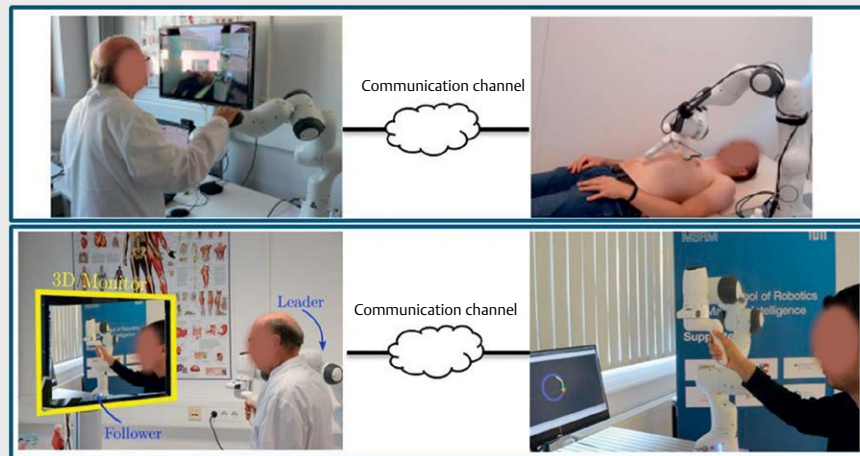
Neben den genannten Sicherheitsaspekten sind vor allem die mechanische Präzision und Impedanz des Roboters zu beachten. Die Anforderungen an diese hängen von der jeweiligen Anwendung ab. So eignen sich beispielsweise Roboter mit hoher Präzision und Steifigkeit für das Setzen von Nadeln oder im Rahmen von Augenoperationen. Rehabilitationsroboter benötigen eine gewisse regelbare Nachgiebigkeit und Rücktreibbarkeit, um den menschlichen Körper optimal zu unterstützen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der mechatronische Entwurf eines Roboters stark von seiner beabsichtigten Anwendung abhängt. Die wichtigsten Faktoren lassen sich jedoch wie folgt zusammenfassen:

- Sicherheit und menschenkompatible Eigenschaften
- Integrierter Entwurf und Kompaktheit
- Mechanische Präzision, Wiederholbarkeit und Steifigkeit
- Kinematische Redundanz und Geschicklichkeit
- Rücktreibbarkeit

#### 3.2 Sensorik und Regelungsparadigmen

Medizin- und Assistenzroboter sollen in der Nähe von PatientInnen und medizinischem Personal arbeiten, weshalb es zu vielen zufälligen aber auch beabsichtigten physischen Interaktionen kommen kann. Daher müssen passende Kollisionsüberwachungs- und Reaktionsstrategien integriert werden. Es existieren bereits geeignete Algorithmen, um Kollisionskräfte aus internen Sensoren äußerst genau abzuschätzen und zu beobachten [15]. Neben den taktilen Sensorfähigkeiten muss auch die Nachgiebigkeit des Roboters erhöht bzw. adaptierbar werden, um sinnvoll auf Interaktionskräfte zu reagieren. Diese Nachgiebigkeit kann intrinsisch in der mechanischen Struktur des Roboters realisiert werden (passive Nachgiebigkeit), beispielsweise durch eine elastische Entkopplung zwischen Aktor und dem angetriebenen Glied wobei feste oder variable Gelenksteifigkeit verwendet wird [16]. Dies kann zu starken Vibrationen des Systems führen und die Steuerung des Roboters erschweren. Alternativ kann die Nachgiebigkeit durch schnelle Regelkreise mittels Kraft- und Impedanzregelung effizient erreicht werden [17]. Diese sogenannte aktive Nachgiebigkeit ist eine wichtige teilautonome Funktion und ist bereits in einigen kommerziellen Roboterarmen integriert.

Für Anwendungen der Mensch-Roboter-Kollaboration muss der Roboter mit Systemen zur Online-Beobachtung des menschlichen Zustands und ein hohes Maß an logischem Denken und Wahrnehmungsvermögen haben, so dass die Intention des Menschen eingeschätzt und bilateral antizipiert werden kann. Die meisten der vorgeschlagenen Ansätze basieren bisher noch auf der Überwachung sensorischer Informationen, wie z. B. dem Austausch von Kräften im Aufgabenbereich, sowie der Überwachung der menschlichen Umgebung, ohne dass die Systeme das Kollaborationsszenario verstehen und bewerten. In [18, 19] beispielsweise verwendet der Roboter ein dynamisches Ganzkörpermodell und erkannte Gesten des Menschen, um die Position der Ko-Manipulationsaufgabe im Arbeitsraum zu optimieren und eine ergonomischere Konfiguration für den Menschen zu ermöglichen. In [20] wird ein neuronales Netz eingesetzt, um die menschliche Bewegungsabsicht für ein Mensch-Roboter-Kollaborationsszenario zu erfassen. Darüber hinaus wird in [21] Spieltheorie angewendet, um die eigene



► **Abb. 2** Beispiele für bidirektionale Konzepte der Tele-Diagnose (oben) und Tele-Rehabilitation (unten): In beiden Fällen wird der Roboterarm der Patientenseite durch einen Roboterarm auf der Arztseite über die Entfernung gesteuert, wobei er sich auf eine präzise haptische Rückkopplung stützt.

Rolle entsprechend der Absicht des Menschen, zu führen oder zu folgen, anzupassen. Diese Anpassung wird durch die Ausnutzung der gemessenen Interaktionskräfte sowie die Aufteilung der Aufgabe zwischen dem Menschen und Roboter durch einen Optimierungsansatz hergeleitet.

Bei der MRK handelt es sich um durch lokale Regelung gesteuerte Roboter, die meistens auf Anweisung des menschlichen Benutzers operieren. Diese geteilte Steuerung (Shared Control) kann für viele Anwendungen im Gesundheitswesen und in der Medizin interessant sein, z. B. in der Rehabilitation [22], beim Einsatz von Exoskeletten [23, 24], bei der Teleoperation [25, 26] oder in der Roboterchirurgie [27, 28]. Wie in ► **Tab. 1** dargestellt, sind Menschen in Bezug auf kognitive Fähigkeiten, wie Situationsbewusstsein und Entscheidungsfähigkeit, Robotern überlegen, während Letztere oft in Bezug auf physische Fähigkeiten, wie Präzision und Kraft, Aufgaben besser bewältigen können. Insbesondere kann der Roboter auf der Grundlage von grobem Vorwissen über die Aufgabe und die Umgebung autonom einer gewünschten Bahn folgen, während der Mensch Korrekturmaßnahmen, Feinabstimmungen und situationsbedingte Führung übernimmt. Wie bei der Mensch-Mensch-Kollaboration erfordert eine intuitive und erfolgreiche gemeinsame Zusammenarbeit jedoch Wissen und Erfahrung über die spezifische gemeinsame Aufgabe. Darüber hinaus benötigt sie eine verbale/gestische Online-Kommunikation mitsamt menschenähnlichen Fähigkeiten und Reaktionsvermögen. Die Kommunikation kann auf der Grundlage von Gesten- und Spracherkennung erfolgen und die Fähigkeiten können durch die Kombination von Primitiven kodiert werden [29]. Allerdings zählen Denkfähigkeit und schnelle Entscheidungsfindung zu den höchsten menschlichen Fähigkeiten und können schlichtweg nicht einfach adäquat digital ersetzt werden. Zusammenfassend erfolgt die Steuerung von Robotern durch eine oder eine Kombination der folgenden Modalitäten erfolgreich;

- Autonomer, halbautonomer Modus, in dem der Roboter eine zugewiesene Aufgabe ohne direkte Kontrolle des Benutzers ausführt.

- Teleoperation, bei der der Roboter über bestimmte (haptische) Schnittstellen direkt vom Menschen gesteuert wird (► **Abb. 2**).
- Kooperativer und gemeinsamer Modus, bei dem die Stärke und Präzision des Roboters mit der Intelligenz und den Fähigkeiten des Menschen kombiniert werden, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen (► **Abb. 3**).

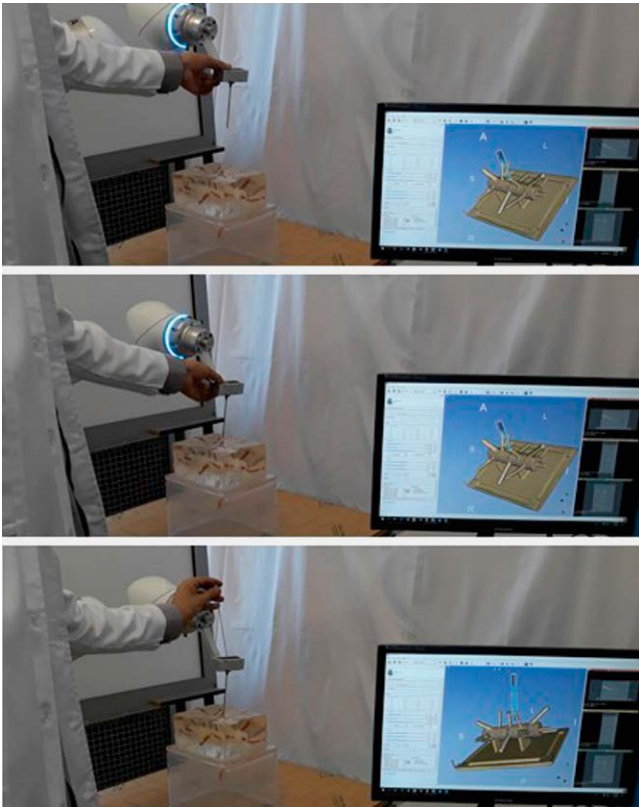
Der in ► **Abb. 1** gezeigte GARMi-Roboter verwendet beispielsweise den autonomen Modus zum Greifen des Auskultations- oder Ultraschallgeräts, das dann zur Fernuntersuchung eines Patienten durch einen Arzt verwendet wird. Derselbe Roboter kombiniert durch ein gemeinsames Kontrollsystem den zweiten und dritten Modus für die Tele-Rehabilitation der oberen Extremitäten [30]. Darüber hinaus ist es durch die Kombination der ersten und zweiten Modalität möglich, den Endeffektor des Roboters durch so genannte virtuelle Zwänge in einer bestimmten Zone oder Richtung zu halten. Diese Eigenschaft erhöht die Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit des Teleoperationsprozesses.

## 4. Technologische Herausforderungen

Wie bereits ausgeführt, beinhalten medizinische und assistive Verfahren in der Regel eine Form der physischen Interaktion zwischen Patient und medizinischem Hilfsmittel. Diese ist sicherlich eine der größten Herausforderungen beim Einsatz von Robotern in menschlichen Umgebungen, die weitere technologische Notwendigkeiten nach sich zieht:

- Höchste mechatronische Integration und niedriger Energieverbrauch
- Garantierte Stabilität und Sicherheit der physischen Interaktion
- Hohe Transparenz im Teleoperationsbetrieb
- Hohe Qualität und niedrige Latenz der Kommunikation





► **Abb. 3** Halbautonomer, nadelbasierter medizinischer Eingriff auf Grundlage 3D-rekonstruierter CT-Scan-Bilder an Dummy-Phantom: Ein nachgiebiger Steuerungsalgorithmus ermöglicht es dem Chirurgen, die Nadelführung physisch in die gewünschte Richtung zu bewegen. Das endgültige Einführen der Nadel wird vom Chirurgen durchgeführt [28].

Die Forderung nach effizienten und leichten Roboterarmen erfordert ein hohes Maß an hochintegrierter Mechatronik. Das Verhältnis von Nutzlast zu Eigengewicht (bzw. bewegter Masse) ist bei Robotern ein zentraler Faktor. Die derzeitige Technologie der Leichtbauroboterarme Panda (von Franka Emika) und iiwa R800 (von Kuka) hat beispielsweise ein Verhältnis von 3 kg/17 kg bzw. 7 kg/23 kg erreicht. Zum Vergleich: Bei einem durchschnittlichen menschlichen Arm beträgt dieses Verhältnis zumindest kurzfristig nahezu 4 kg/4 kg [31]. Diese Lücke gilt es nach wie vor weiter zu schließen, um Assistenzroboter noch beweglicher und sicherer zu machen.

Systeme für die physische MRI müssen ihre Stabilität gewährleisten, was bei der Interaktionsregelung typischerweise durch sogenannte Passivitätsansätze getan wird. Auch ist das konsistente Verhalten der Systeme zentral. Dies ist beispielsweise bei Exoskellen oder in der Teleoperation, die eine Echtzeitrückkopplung der Interaktion benötigt, eine Herausforderung. Von entscheidender Bedeutung ist dieses Feedback zum Beispiel in der Roboter-Telechirurgie, wo jede Fehlanpassung oder falsche taktile Information unnötig große Gewebekräfte erzeugen würde. Es gibt andererseits aber auch technische Grenzen bei der Übertragung eines transparenten und robusten Tastsinns. In solchen Situationen könne jedoch zusätzliche visuelle Hinweise oder Warnungen integriert werden, um die temporäre Limitierung in der Krafterückkopplung zu kompensieren.

Hohe Transparenz war schon immer eine kritische Anforderung in der Telerobotik. Sie beschreibt die Genauigkeit, mit der eine entfernte Umgebung für den menschlichen Benutzer wiedergegeben wird und kann auf verschiedenen Ebenen betrachtet werden. Die mechanische Transparenz berücksichtigt die Diskrepanz zwischen der Umgebungsimpedanz und der vom Benutzer wahrgenommenen Impedanz. In einem vollständig transparenten System würde der Benutzer dasselbe Gefühl haben, als würde er direkt in der Umgebung arbeiten. Dies bedeutet alternativ, dass der Benutzer bei freien Bewegungen keine äußere Dynamik spürt. Ein volltransparentes System ist nahezu unmöglich, und die Erfahrung der Interaktion über die haptische Konsole unterscheidet sich immer von dem realen Gefühl der Umgebung auf der entfernten Seite. Das Konzept der mechanischen Transparenz überträgt sich auch auf Exoskelett- und Assistenzsysteme. Die volle Transparenz wird hier erreicht, wenn das System exakt der Bewegung des Benutzers folgt und dieser somit weder die Trägheit noch jedwede Widerstandskräfte spürt. In der Regel stehen jedoch Stabilität und Transparenz im Widerspruch zueinander und es muss ein Kompromiss gefunden werden [32]. Neben der mechanischen Transparenz kann die Gestaltung multimodaler Schnittstellen (z. B. durch Einbeziehung des Sehvermögens oder eines virtuellen Modells der Umgebung) das Situationsbewusstsein weiter verbessern und menschliche Fehler reduzieren. Transparenz kann auch als das Gegenteil von Unvorhersehbarkeit beschrieben werden [33]. Wenn das Verhalten des Systems vorhersehbar und für den menschlichen Benutzer beobachtbar ist, wird es als transparenter angesehen. Der Grad der Autonomie hat auch einen großen Einfluss auf die Transparenz des Systems [34]. Sowohl ein zu hoher wie auch ein zu niedriger Grad an Autonomie gefährden die Transparenz des Systems. Wenn das System ohne nennenswerten Benutzereingriff handelt, wird der Zustand des Systems als für den menschlichen Benutzer nicht gut beobachtbar klassifiziert. Der Benutzer hat also das Gefühl, dass ein Teil des Systems nicht unter seiner Kontrolle steht. Im Gegensatz dazu ist das Gefühl für den Systemzustand besser, wenn der menschliche Bediener fast alle Aufgaben ausführt, allerdings steigt die Arbeitsbelastung des Benutzers wiederum und verringert somit das Bewusstsein und die Transparenz des Systems. Daher ist ein angemessener Grad an Autonomie in der medizinischen Robotik besonders wichtig.

Kommunikationsverzögerungen sind eine weitere Herausforderung, die insbesondere für Netzwerk- und Teleoperationssysteme kritisch ist. Sowohl die Systemstabilität als auch die Transparenz werden durch Verzögerungen, Bandbreitenbeschränkungen und Paketverluste im Kommunikationskanal drastisch beeinträchtigt. Alle erwähnten Algorithmen zur Interaktionssteuerung basieren routinemäßig auf einer Rückkopplungssteuerung mit hoher Regelrate (1 kHz) und tolerieren nur sehr geringe Verzögerungen. Dies ist unproblematisch, solange die Regelung auf Basis lokaler sensorischer Rückkopplung arbeitet. In geografisch verteilten Teleoperationssystemen, wie z. B. in der Telechirurgie, wird jedoch ein bidirektionaler Kanal für haptische Signale eingerichtet, so dass die lokale Regelung und Steuerung auf jeder Seite die Informationen der anderen Seite benötigt. Selbst bei Protokollen mit hoher Bandbreite und geringer Latenz, wie z. B. 5G, ist eine zuverlässige Datenübertragung manchmal nicht möglich. Die Kommunikationsverzögerung hängt von der Entfernung und der Infrastruktur

ab und kann von einigen Millisekunden bis zu mehreren hundert Millisekunden reichen. Für die meisten Szenarien muss der Kommunikationskanal über eine ausreichende Bandbreite verfügen, um qualitativ hochwertige Video- und Audioströme in Echtzeit zu übertragen. Dies ist eine klassische Herausforderung und alle in der Literatur vorgeschlagenen Lösungen verzichten auf einen Teil der Systemtransparenz, um sie zu bewältigen.

## 5. Schlussfolgerungen und künftige Entwicklungen

Es ist offensichtlich, dass die Medizinrobotik und allgemein die computerintegrierte Medizin unsere klinischen Erfahrungen und Routinen unweigerlich verändern. Regelmäßig werden neue Anwendungen eingeführt, die darauf abzielen, menschliche Grenzen zu überwinden. Von den zahlreichen Forschungsinitiativen und Anwendungen in der interventionellen Medizinrobotik wurden bisher jedoch nur wenige nachhaltig kommerziell verwertet und auf breiter Basis zur Unterstützung des medizinischen Personals sowie PatientInnen eingesetzt. Ähnlich verhält es sich mit der Assistenz- und Rehabilitationsrobotik. Abgesehen von den technologischen Einschränkungen sind die Kosten der Produkte, die Benutzerfreundlichkeit und die Akzeptanz in der Gesellschaft weitere wichtige Faktoren, die sich auf die Verbreitung von Robotiktechnologien im Gesundheitswesen auswirken. Der Ausbruch der Coronapandemie im Frühjahr 2020 hat besonders vor Augen geführt, wie wichtig Digitalisierung und künstliche Intelligenz für die Aufrechterhaltung des öffentlichen Lebens sind und zunehmend sein werden. Es ist auch deutlicher geworden, wie die Technologie zur Verbesserung der Qualität der medizinischen Versorgung und zur Verringerung der Belastung sowie des Risikos von Infektionen für das Gesundheitspersonal beitragen kann. Ähnlich wie bei anderen Technologien werden die konkreten menschlichen Bedürfnisse die zentrale Rolle in der Frage spielen, was die Zukunft der Robotik im Gesundheitswesen für uns bringen wird. Unsere Erfahrungen aus der Vergangenheit zeigen, dass Menschen ihr Verhalten und ihre Umgebung sogar an Roboter anpassen können, wenn sie diese Veränderung für vorteilhaft halten.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde teilweise vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 16SV8569 (Projekt ProteCT) gefördert. Wir bedanken uns für die Förderung der Leuchtturm-Initiative Geriatronik durch das StMWiBayern (Projekt X, Förderkennzeichen 5140951) und durch die LongLeif GaPa GmbH (Projekt Y, Förderkennzeichen 5140953).

## Interessenkonflikt

Sami Haddadin hat einen Interessenkonflikt als Gesellschafter der Franka Emika GmbH.

## Literatur

- [1] Robotics E. Strategic research agenda for robotics in europe 2014–2020 IEEE Robot. Au- tom. Mag 2014; 24: 171
- [2] Walker A, Gemeinschaften GBE. Age and attitudes: main results from a Eurobarometer survey. Commission of the European Communities 1993
- [3] Siciliano B, Khatib O, Kröger T. Springer handbook of robotics. Springer; 2008 200
- [4] Ostermann M, Vincent J-L. How much centralization of critical care services in the era of telemedicine?. *critical care* 23: 2019
- [5] Jang SM, Lee K, Hong Y-J, Kim J, Kim S. Economic evaluation of robot- based telemedicine consultation services. *Telemedicine and e-Health* 2020; 26: 1134–1140
- [6] Chang D, Xu H, Rebaza A, Sharma L, Cruz CSD. Protecting health-care workers from subclinical coronavirus infection. *The Lancet Respiratory Medicine* 2020; 8: e13
- [7] Fuchtmann J, Krumpholz R, Berlet M, Ostler D, Feussner H, Haddadin S, Wilhelm D. Covid-19 and beyond: development of a comprehensive telemedical diagnostic framework. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 2021; 1–10
- [8] Akbari M, Carriere J, Meyer T, Sloboda R, Husain S, Usmani N, Tavakoli M. Robotic ultrasound scanning with real-time imagebased force adjustment: Quick response for enabling physical distancing during the covid-19 pan-demic. *Frontiers in Robotics and AI* 2021; 8: 62
- [9] Becker CD, Dandy K, Gaujean M, Fusaro M, Scurlock C. Legal perspectives on telemedicine part 2: telemedicine in the intensive care unit and medicolegal risk. *The Permanente Journal* 23: 2019
- [10] Tröbinger M, Jähne C, Qu Z, Elsner J, Reindl A, Getz S, Goll T, Loinger B, Loibl T, Kugler C, Calafell C, Sabaghian M, Ende T, Wahrmann D, Parusel S, Haddadin S, Haddadin S. Introducing GARMi – A service robotics platform to support the elderly at home: Design philosophy, system overview and first results. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2021; 6: 5857–5864
- [11] Taylor R, Joskowicz L. Computer-integrated surgery and medical robotics in: *Standard handbook of biomedical engineering & design*. McGraw-Hill Education; 2003
- [12] Haddadin S, Albu-Schäffer A, Strohmayer M, Frommberger M, Hirzinger G. Injury evaluation of human-robot impacts in 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE; 2008: 2203–2204
- [13] Haddadin S, Albu-Schäffer A, Hirzinger G. Requirements for safe robots: Measurements, analysis and new insights. *The International Journal of Robotics Research* 28: 1507–1527 2009
- [14] Franka Emika <https://www.franka.de/>
- [15] Haddadin S, De Luca A, Albu-Schäffer A. Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification. *IEEE Transactions on Robotics* 33: 1292–1312 2017
- [16] Grebenstein M, Albu-Schäffer A, Bahls T, Chalon M, Eiberger O, Friedl W, Gruber R, Haddadin S, Hagn U, Haslinger R et al The DLR hand arm system in 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE; 2011: 3175–3182
- [17] Sadeghian H, Villani L, Keshmiri M, Siciliano B. Task-space control of robot manipulators with null-space compliance. *IEEE Transactions on Robotics* 30: 493–506 2013
- [18] Peternel L, Kim W, Babič J, Ajoudani A. Towards ergonomic control of human-robot co-manipulation and handover in 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids), IEEE; 2017: 55–60
- [19] Kim W, Lorenzini M, Balatti P, Nguyen PD, Pattacini U, Tikhonoff V, Peternel L, Fantacci C, Natale L, Metta G et al. Adaptable workstations for human-robot collaboration: A reconfigurable framework for improving worker ergonomics and productivity. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 2019; 26: 14–26

- [20] Li Y, Ge SS. Human-robot collaboration based on motion intention estimation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2013; 19: 1007–1014
- [21] Li Y, Tee KP, Chan WL, Yan R, Chua Y, Limbu DK. Continuous role adaptation for human–robot shared control. *IEEE Transactions on Robotics* 2015; 31: 672–681
- [22] Riener R, Duschau-Wicke A, König A, Bolliger M, Wieser M, Vallery H. Automation in rehabilitation: How to include the human into the loop in World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7-12, 2009. Munich, Germany: Springer; 2009: 180–183
- [23] Quere G, Hagengruber A, Iskandar M, Bus-tamante S, Leidner D, Stulp F, Vogel J. Shared control templates for assistive robotics in 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE; 2020: 1956–1962
- [24] Aguirre-Ollinger G, Colgate JE, Peshkin MA, Goswami A. Active-impedance control of a lower-limb assistive exoskeleton in 2007 IEEE 10th international conference on re- habilitation robotics.IEEE; 2007: 188–195
- [25] Hirche S, Buss M. Human-oriented control for haptic teleoperation. *Proceedings of the IEEE* 2012; 100: 623–647
- [26] Tonin L, Leeb R, Tavella M, Perdakis S, Millán J. d.R. The role of shared-control in bci- based telepresence in 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE; 2010: 1462–1466
- [27] Tobergte A, Konietschke R, Hirzinger G. Planning and control of a teleoperation system for research in minimally invasive robotic surgery in 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE; 2009: 4225–4232
- [28] Sadeghian H, Barkhordari M, Kamranian Z, Jafarpisheh MS. Robotic needle positioning based on ct-scan images: Constrained admittance realization. *Journal of Medical Robotics Research* 2020; 5: 2150001
- [29] Johannsmeier L, Gerchow M, Haddadin S. A framework for robot manipulation: Skill for-malism, meta learning and adaptive control in 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE; 2019: 5844–5850
- [30] Tröbinger M, Costinescu A, Xing H, Elsner J, Hu T, Naceri A, Figueredo L, Jensen E, Burschka D, Haddadin S. A dual doctor-patient twin paradigm for transparent remote examination, diagnosis, and rehabilitation. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* 2021; 6: 5857–5864
- [31] Gealy DV, McKinley S, Yi B, Wu P, Downey PR, Balke G, Zhao A, Guo M, Thomas-son R, Sinclair A., Cuellar P, McCarthy Z, Abbeel P. Quasi-direct drive for low-cost compliant robotic manipulation in 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA).IEEE; 2019: 437–443
- [32] Lawrence DA. Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE transactions on robotics and automation* 1993; 9: 624–637
- [33] Alonso V, De La Puente P. System transparency in shared autonomy: A mini review. *Frontiers in neurorobotics* 2018; 12: 83
- [34] Miller CA. The risks of discretization: what is lost in (even good) levels-of-automation schemes. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 2018; 12: 74–76