

# Roboterassistiertes Gangtraining: Wertung des erreichten Stands\*

Andrea Scheidig<sup>1</sup>, Anke Mayfarth<sup>2</sup>, Christian Sternitzke<sup>2,3</sup>, Alexander Vorndran<sup>1</sup>, Thanh Q. Trinh<sup>1</sup>, Benjamin Schuetz<sup>1</sup> und Horst-Michael Gross<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik, TU Ilmenau, Ilmenau, Deutschland;  
<sup>2</sup> tediro GmbH, Ilmenau, Deutschland; <sup>3</sup> MetraLabs GmbH, Ilmenau, Deutschland

[www.roger-projekt.de](http://www.roger-projekt.de)

## Kurzfassung

In diesem Beitrag wird der erreichte technologische Stand eines roboterassistierten Gangtrainings in einer Klinik vorgestellt und aus den Sichten Technologie, Anwender sowie aus wirtschaftlicher Perspektive bewertet. Folgende Fragestellungen werden schwerpunktmäßig betrachtet. Ermöglicht der erreichte Entwicklungsstand einen autonomen Einsatz im klinischen Alltag? Ist das Gangbild von Patienten, die ein mehrtägiges zusätzliches roboterassistiertes Gangtraining nutzten, im Vergleich zu Patienten ohne dieses Zusatztraining verändert bzw. verbessert? Wie wirkt sich die Nutzung eines Trainingsroboters auf die Trainingsmotivation der Patienten aus?

## Abstract

This paper presents the technological status of a robot assisted gait training under real clinical environment conditions. The evaluation of the system takes place in regard to the view from technology, from different user groups and from an economic perspective. There the following questions are primarily considered. Does the level of development achieved enable autonomous use in every day clinical practice? Has the gait pattern of patients who used additional robot-assisted gait self-training for several days been changed or improved compared to patients without this additional training? How does the use of a robot gait coach affect the motivation of the patient?

## 1 Problemstellung

Das selbständige Mitwirken von Patienten am Rehabilitationsprozess wird in Zeiten knapper finanzieller und personeller Ressourcen im Gesundheitswesen zunehmend wichtiger. Üblicherweise erhalten Patienten von therapeutischem Personal Hinweise und Empfehlungen zur Durchführung von Eigentraining für Zeitfenster, in denen keine Therapien mit Therapeuten stattfinden. Ob die Patienten in dieser Zeit tatsächlich trainieren und die Übungen exakt ausführen, bleibt offen. Im Gegensatz dazu ermöglicht ein durch einen Trainingsroboter assistiertes Eigentraining den Patienten, nicht nur unabhängig von der Präsenz eines Physiotherapeuten zu üben, sondern auch vom Roboter Korrektorempfehlungen samt positivem Feedback zu erhalten: Trainingsfehler werden so vermieden, der Therapiefortschritt verstärkt. Diese Art des Eigentrainings führt zu einem „kontrollierten“ Training mit der Chance auf schnellere Rehabilitation und Wiedereingliederung und trägt gleichzeitig zur Entlastung des therapeutischen Personals bei.

Im Projekt „Roboterassistiertes Gangtraining in der orthopädischen Rehabilitation“ (ROGER, 2016-2019) wurde basierend auf eigenen Vorarbeiten [Gross 2017] ein persönlicher Trainingsroboter entwickelt, der Patienten nach orthopädischen Operationen an der Hüfte in der klinischen Nachsorge bei personalisierten Gangübungen zur Wiederherstellung eines möglichst physiologischen Gangbildes assistiert (siehe Abb. 1). Der Trainingsroboter kann mittels seiner on-board Sensorik und der damit möglichen Skelett Wahrnehmung die Patienten bei deren Gang-

training beobachten, aktiv anleiten, Fehler im Ablauf des Gangtrainings erkennen, korrigierend eingreifen und Trainingsverlauf und –fortschritt protokollieren.



**Abbildung 1:** Patienten während eines roboterassistierten Eigentrainings, bei dem Trainingsroboter vor den Patienten fahren und motivierende und korrigierende Rückmeldungen zu ihrem Gangverhalten geben.

Zielstellung dieses Beitrags ist es, die in ROGER bei Nutzertests in einer Klinik erreichten Ergebnisse aus der Sicht eines *technischen Benchmarkings*, aus der *Therapeuten-* und *Patientensicht* hinsichtlich der Trainingsmotivation und aus der Sicht erster Erkenntnisse zu einer *medizinischen Wirksamkeit* als Voraussetzung für eine *wirtschaftliche Perspektive* vorzustellen und zu diskutieren. Besondere Schwerpunkte sind folgende Fragestellungen: Ermöglicht der erreichte Entwicklungsstand einen autonomen Einsatz im klinischen Alltag? Ist das Gangbild von Patienten, die ein mehrtägiges zusätzliches roboterassistiertes Gangtraining nutzten, im Vergleich zu Patienten ohne dieses Zusatztraining verändert bzw. verbessert? Wie wirkt sich die Nutzung eines Trainingsroboters auf die Trainingsmotivation der Patienten aus?

\* Gefördert durch das TMWWDG aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung, 2015 FE 9088.

## 2 Anforderungen

Zur Bewertung des Entwicklungsstands einer Technologie, wie das in diesem Beitrag behandelte roboterassistierte Gangtraining, müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Neben dem erreichten technologischen Stand der hard- und softwaretechnischen Umsetzung betrifft dies wesentlich auch die Nutzbarkeit aus Sicht des Anwenders und die erreichte Integration in bestehende Strukturen. Eine solche Bewertung kann auch über den Technologiereifegrad (TRL)<sup>2</sup> auf einer Skala von 1 bis 9 erfolgen, innerhalb derer ein TRL von 4 die Demonstration der Funktionsfähigkeit in Laborumgebungen bedeutet. Systeme, mit denen ein alltagstauglicher Einsatz möglich sein soll, erfordern darüber hinaus einen TRL von 6.

### 2.1 Methodisch-technische Sicht

Mobile Assistenzroboter müssen für einen alltagstauglichen Einsatz in beliebigen Anwendungen über realwelttaugliche technische Grundfähigkeiten verfügen. Dies betrifft neben der Grundfähigkeit der autonomen hinderungsvermeidenden Navigation die Fähigkeit zur robusten Personenerkennung, -verfolgung sowie -wiedererkennung und die Fähigkeit zur Interaktion mit Nutzern. Die konkrete Realisierung dieser Grundfähigkeiten bestimmt bereits den Grad der überhaupt erreichbaren Roboterautonomie in einer Anwendung. Nur wenn eine hohe Roboterautonomie erreicht wird, sind umfangreiche Nutzertests wie auch Wirksamkeitsstudien möglich, für die aufgrund begrenzter Ressourcen keine technische Vorortbetreuung möglich ist. Aufbauend auf diesen Grundfähigkeiten sind dann abhängig von der konkreten Rahmenanwendung weitere Fertigkeiten des Roboters erforderlich. So bedingt ein roboterassistiertes Gangtraining auch die Grundfertigkeit, einen Patienten auf der Trainingsstrecke zentral im sensorischen Erfassungsbereich der Robotersensorik zu halten, was wiederum eine Voraussetzung der Ganganalyse ist [Vorndran 2018]. Für die Analyse des Gangbildes speziell von Patienten nach orthopädischen Operationen an der Hüfte sind dann klassische Gangmerkmale wie z. B. gleichmäßige Schrittlänge, Standdauer, Spurbreite, Oberkörperkipfung und Beugung von Knie und Hüfte aus der den Patienten beobachtenden Sensorik zu extrahieren. In ROGER wurde darüber hinaus auch die richtige Nutzung der Unterarmgehstützen (UAGS) im Dreipunktgang erfasst und analysiert, da nur bei einer richtigen Nutzung der UAGS eine Entlastung der operierten Hüfte möglich ist. Zudem ist eine Bewertung der extrahierten Merkmale erforderlich, um dem Patienten eine unmittelbare Rückmeldung zu den gemachten Gangfehlern zu geben. Die robotischen Grundfähigkeiten und -fertigkeiten sind weiterhin in eine realwelttaugliche Trainingsanwendung zu überführen, die mit allen Nutzergruppen, hier Mediziner, Therapeuten und Patienten, spezifiziert werden muss (siehe Abschn. 4.1). Das generelle Vorgehen sollte passend dokumentiert werden, wenn eine Zulassung als Medizin-

produkt (TRL 7) erreicht werden soll. Einfluss auf die zu nutzenden Methoden hat bereits die Auswahl geeigneter Sensoren, die in ROGER zudem durch die Anforderung geringer Anschaffungskosten bei möglichst gleicher Sensorgüte vorausgewählt wurde. Die Bestimmung des erreichten Stands aus methodisch-technischer Sicht muss über ein technisches Benchmarking auf mehreren Entwicklungsstufen erfolgen, wozu zunächst Daten von Probanden (TRL 3), Daten von Patienten unter Laborbedingungen (TRL 4) und schließlich im Rahmen einer Wirksamkeitsstudie an Patienten (TRL 5-6) erfasst und ausgewertet wurden (siehe Abschn. 4.3). Dazu mussten ein Datenmanagementplan zur Umsetzung des Datenschutzes, ein positives Votum einer Ethikkommission und Versicherungsschutz für die Nutzer vorliegen.

### 2.2 Anwendersicht

Aus Patientensicht spielen vier Faktoren eine wichtige Rolle: Bedienbarkeit, Sicherheit, Vertrauen und Unabhängigkeit. Die vom Roboter adressierte Zielgruppe von Patienten, die an UAGS laufen, deckt zwar prinzipiell Jung und Alt ab, wird aber zahlenmäßig von Senioren dominiert, die eine Hüft- oder Knieprothese erhalten haben, weshalb der Roboter als digitales Therapiegerät leicht bedienbar sein muss. Hiervon profitieren nicht nur die Patienten, sondern auch weitere Nutzer wie Therapeuten, die ein Gerät erwarten, das sich nicht schwerer bedienen lässt als ein Smartphone. Weiterhin müssen sich Patienten generell während des Trainings sicher fühlen. Gerade für anfangs unsichere Patienten ist der Verkörperungseffekt eines Roboters ein Element, das Sympathien und Vertrauen schafft. Patienten haben zudem unterschiedliche Tagesrhythmen, unterschiedlich ausgeprägte Motivation und immer wieder Zeitfenster zwischen den Therapien, die ein Eigentaining zulassen. Ein Roboter sollte es ermöglichen, selbständig, unabhängig und sicher zu trainieren, auch außerhalb der Dienstzeiten der Therapeuten wie z. B. abends oder an Wochenenden. Für die technische Umsetzung müssen daher die Abläufe des Trainingsvorganges und das Navigationsverhalten des Roboters vorhersagbar und eindeutig festgelegt, die Sprachausgaben und die Menüführung einfach und inhaltlich eindeutig formuliert sein und entsprechend Berücksichtigung in der Gestaltung der Graphical User Interfaces (GUI) finden. Aus Sicht von Therapeuten und Medizinern müssen Trainingspläne einfach sowie individuell erstellbar und an den sich ändernden Trainingsfortschritt der Patienten anpassbar sein. Somit ist es auch erforderlich, dass die Therapeuten und Mediziner Zugriff auf die Ergebnisse des Eigentrainings erhalten.

### 2.3 Gesundheitsökonomische Aspekte

Der finanzielle Nutzen eines roboterassistierten Trainings kann im stationären klinischen Bereich eine Kostensparnis im Rahmen der Fallpauschale (Diagnosis-related Group) sein, resultierend aus z. B. geringeren Personalaufwendungen. Weiterhin können auch schnellere Durchlaufzeiten von Patienten für einen finanziellen Nutzen

<sup>2</sup> <https://www.nks-kmu.de/teilnahme-trl.php>

sorgen, da sie über eine Kapazitätsverbesserung zur Steigerung von Umsätzen bei konstanten Rahmenbedingungen führen. Im stationären rehabilitativen Bereich sind die Effekte eher in der Optimierung des Personaleinsatzes und interner Arbeitsorganisation zu sehen. Im ambulanten Bereich erfolgt die Kostenerstattung durch die Krankenkassen, wobei für eine Kostenerstattung im ambulanten Bereich die Aufnahme in den Heilmittelkatalog Voraussetzung ist.

In jedem Fall ist der Nachweis des gesundheitsökonomischen und medizinisch-therapeutischen Nutzens über medizinische Wirksamkeitsstudien notwendig. Für das hier vorgestellte roboterassistierte Gangtraining wäre eine Nicht-Unterlegenheitsstudie bereits geeignet, um aufzuzeigen, dass das Medizinprodukt mindestens genauso gut wie die alternative Behandlungsmethode ist. Dies kann sich auch unterstützend für eine Produkteinführung (TRL 8) auswirken. Eine dabei erforderliche Einbindung des Robotersystems in die klinischen oder ambulanten Abläufe setzt eine Prozessanalyse und -auswertung voraus sowie intensive Abstimmungen mit entsprechenden Stakeholdern. Aus Klinik Sicht muss der Roboter dabei so robust in der Funktionsweise sein, dass er wirklich autonom ohne Involvierung von Begleitpersonen, Technikern sowie Therapeuten das Training selbständig durchführt (siehe Abschn. 2.1), ohne den Ablauf innerhalb der Klinik zu behindern.

### 3 State of the Art

Eine Beurteilung des State of the Art erfolgt einerseits mit Blick auf die wissenschaftliche Literatur, andererseits auf den Markt, der entsprechende Anwendungen weiterentwickelt und verfügbar macht.

#### 3.1 Ansätze aus der Wissenschaft

Das vorgestellte robotische System für ein Gangtraining an UAGS verknüpft zwei grundlegende Strömungen in der Literatur. Es adressiert die kamerabasierte Bewegungsanalyse, bei der mittels Kameraauswertung Körperposen ermittelt und ausgewertet werden. Dieses Gebiet hat sich seit der Veröffentlichung der Microsoft Kinect als erstem Low-Cost-Sensor mit zehntausenden Publikationen rasant entwickelt. Hierbei finden sich auch wenige Veröffentlichungen zu Therapieansätzen, die den Gangablauf einer Person betreffen [Hondori 2014]. Insbesondere sind mobile robotische Systeme von Interesse, die auch bei sich ändernden Umgebungsbedingungen eine Ganganalyse ermöglichen. In [Chi 2018] wird ein solches System zum Zweck der Identifikation von Personen vorgestellt. In verschiedenen Anwendungen werden auch smarte Rollatoren anstelle mobiler Assistenzrobotern eingesetzt [Martins 2014; Mandel 2018], mit denen die Wiederherstellung eines physiologischen Gangbilds jedoch nicht möglich ist. Die Besonderheit des hier vorgestellten robotischen Systems ist die Auswertung des Gangablaufs an UAGS. Eine Literaturrecherche in Google Scholar (Begriffe: crutch kinect gait; alternativ zu Kinect auch

RGB-D oder „2d camera“) zeigte als weiteres Projekt die Arbeiten von Tsuda et al., die explizit einen an Achselstützen durchgeführten Gangablauf auswerten, wobei die Achselstütze nicht explizit erfasst wird. In [Tsuda 2016a] wird mittels einer statischen Kamera der Gangablauf einer Person an Achselstützen ausgewertet, darunter der Winkel der Oberschenkel (als Approximation der Schrittlänge) sowie die Beschleunigung des Rumpfs als Maß für Irregularitäten im Gangablauf. [Tsuda 2016b] bringen dieses System auf einen Staubsaugerroboter, so dass die Probanden eine längere Distanz zurücklegen können. In [Tsuda 2018] werden mittels eines Versuchsaufbaus im Labor (TRL 4) die Schrittlängen der an den Achselstützen gehenden Probanden ermittelt und diesen über ein Display Hinweise zur Anpassung der Schrittlänge gegeben.

#### 3.2 Verwandte Produkte auf dem Markt

Im Bereich der stationären kamerabasierten Bewegungsanalyse, die sich jeweils für breite Anwendungen eignen und auf relativ kostengünstige Sensorik aufbauen, sind z.B. Systeme im professionellen Fitnessbereich zu nennen wie von Pixformance (DE) und SOLOS Mirrors (DE). Sie verfügen neben der Kamera und einer Auswertungseinheit über ein großes Display zum Darstellen von Übungen und Nutzerfeedback. Daneben gibt es eine Reihe von ähnlichen Systemen für den Heimbereich wie Mirror (USA), Tonal (USA), QAIQ (USA) oder Vaha (DE). Dieser Ansatz wurde von Unternehmen wie CASPAR Health (DE) in den Rehabilitationsbereich übertragen. Ein Anbieter für spezielle Anwendungen in der Neurologie ist die Firma Motognosis (DE). Die Grenzen sind allerdings fließend hin zu Applikationen auf Smartphones wie z. B. Kaia Health (DE), einer App für u.a. Rückentraining. Diese Apps werden ebenfalls stationär genutzt, d. h. die Endgeräte werden fix positioniert und Nutzer führen vor den Endgeräten die Übungen in einem räumlich eng abgegrenzten Bereich durch.

In der neurologischen Therapie-Robotik sind einerseits Exoskelette (Orthesen) bekannt, andererseits Gangtrainingsroboter mit Vorrichtungen zur Aufhängung von Patienten, die über eine geringe Rumpfstabilität verfügen wie z. B. nach schweren Unfällen oder Schlaganfällen. Hier sind das System Andago von Hocoma (CH) oder ein Roboter von Gable Systems (NL) zu nennen (letzterer ist noch nicht am Markt verfügbar). Kamerabasierte Auswertungen zur Verbesserung des Gangablaufs nehmen diese Systeme nicht vor. Der in diesem Beitrag vorgestellte Trainingsroboter für das Gangtraining an UAGS schließt damit eine Lücke zwischen den kamerabasierten Therapiesystemen und den mobilen Gangtrainingsrobotern.

### 4 Entwicklungsstand aus methodisch-technischer Sicht

Im Folgenden wird das Vorgehen in ROGER mit zwei technologisch unterschiedlichen Ausbaustufen des Trainingsroboters vorgestellt.

## 4.1 Trainingsanwendung

Die entwickelte Trainingsanwendung wurde in Tests mit Patienten untersucht, die nach einer hüftendoprothetischen Operation ab dem zweiten postoperativen Tag mit UAGS im Dreipunktgang nach Freigabe der Ärzte bereits frei gehen durften. Das roboterassistierte Eigentaining erfolgte zusätzlich zur Standardtherapie der Klinik zweimal täglich über 5 bis 10 Minuten bis zur Entlassung des Patienten zwischen dem fünften und siebten postoperativen Tag. Während des ersten Trainings erfolgte eine Einweisung in den Umgang mit dem Roboter durch einen Therapeuten. Das Training selbst fand in einem Flur der Klinik statt. Eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs kann [Scheidig 2019] entnommen werden. Entsprechend den Anforderungen in Abschn. 2.1 fährt der Roboter in einem festen Abstand und Winkel vor dem Patienten, während dessen Gangmerkmale extrahiert [Jaeschke 2018] und bezüglich von Therapeuten vorgegebener Schwellen regelbasiert bewertet werden [Trinh 2020]. Bei erkannten Gangfehlern erfolgt eine korrigierende Sprach- und GUI-Ausgabe an den Patienten. Den Patienten war es während des Trainings jederzeit möglich zu pausieren, wofür sie Stühle auf dem Gang nutzen konnten. Der Trainingsroboter erfasst dies und nimmt bis zur Wiederaufnahme des Trainings eine Warteposition ein.

## 4.2 Genutzte Roboterplattformen

Für die Nutzertests wurden zwei technologisch unterschiedliche Ausbaustufen an Trainingsrobotern eingesetzt, um die generelle technische Machbarkeit mit einer Forschungsplattform (siehe Abb. 2 links) und darauf aufbauend die Übertragbarkeit der entwickelten Methoden auf eine produktnahe und mit low-cost-Sensorik und -Hardware ausgerüstete Plattform (siehe Abb. 2 rechts) zu untersuchen. Wesentliche Unterschiede der produktnahen zur Forschungsplattform sind der Verzicht auf einen Roboterkopf mit Omnikamera, über die die Forschungsplattform Personen erfasst und den trainierenden Patienten von anderen Personen unterscheidet [Wengefeld 2016], sowie der Ersatz der beweglich angebrachten Kinect2-Kamera durch eine fest angebrachte ORBBEC AstraPro-Kamera mittels NuiTrack SDK zur Skelettschätzung. Die sensorische Erfassung des Patienten während des Trainings erfolgte bei der produktnahen Plattform über das

mit NuiTrack SDK erfasste Skelett und die Re-Identifikation des Patienten durch eine sich farblich von der Umgebung unterscheidende und vom Patienten getragene Identifikationskarte.

## 4.3 Technisches Benchmarking

Mit den zwei technologisch unterschiedlichen Ausbaustufen des Trainingsroboters erfolgten in den Waldkliniken Eisenberg im Zeitraum von 6-8/2019 und 9/2019 zwei Testreihen an Nutzertests. In der ersten Testreihe wurden mit der produktnahen Plattform die in Abschn. 1 dargelegten Fragestellungen untersucht, ob **1)** der erreichte Entwicklungsstand bereits einen autonomen Einsatz im klinischen Alltag ermöglicht und **2)** das Gangbild von Patienten, die ein mehrtägiges zusätzliches roboterassistiertes Gangtraining nutzten, im Vergleich zu Patienten ohne dieses Zusatztraining verändert ist (siehe Abschn. 4.3.1). Ziel der zweiten Testreihe war ein technisches Benchmarking der auf der Forschungsplattform genutzten Methoden, vor allem auch solcher, die aufgrund ihres Entwicklungsstands oder bewusst reduzierter Sensorik der produktnahen Plattform auf diese nicht übertragen wurden (siehe Abschn. 4.3.2). Während beider Testreihen erfolgte eine Technikbewertung aus Sicht der Patienten und Therapeuten (siehe Abschn. 5) zur Beantwortung der Fragestellung **3)**, wie sich die Nutzung eines Trainingsroboters auf die Trainingsmotivation der Patienten auswirkt.

### 4.3.1 Produktnahe Roboterplattform

Im Zeitraum von 6-8/2019 wurde mit der produktnahen Plattform eine klinische Studie ohne technische Vorortbegleitung durchgeführt. Dabei wurden zwei Patientengruppen miteinander verglichen. Während die eine Gruppe die übliche Standardtherapie bis zur Entlassung erhielt, absolvierte die andere Gruppe zweimal täglich ein zusätzliches Eigentaining mit Roboter für 5-10 Minuten. Die Stammdaten der teilnehmenden Patienten wurden durch die Therapeuten mit ihren jeweils spezifischen Trainingsparametern (Seite der Operation, Dauer des Trainings) über ein Therapeuteninterface eingegeben. Der Roboter selbst befand sich während des Testzeitraums außerhalb der Trainingszeiten auf einer Ladestation in einem separaten Raum der Klinik. Morgens wurde der Raum durch Mitarbeiter der Klinik geöffnet und der Roboter gestartet (abends fuhr der Roboter wieder in den

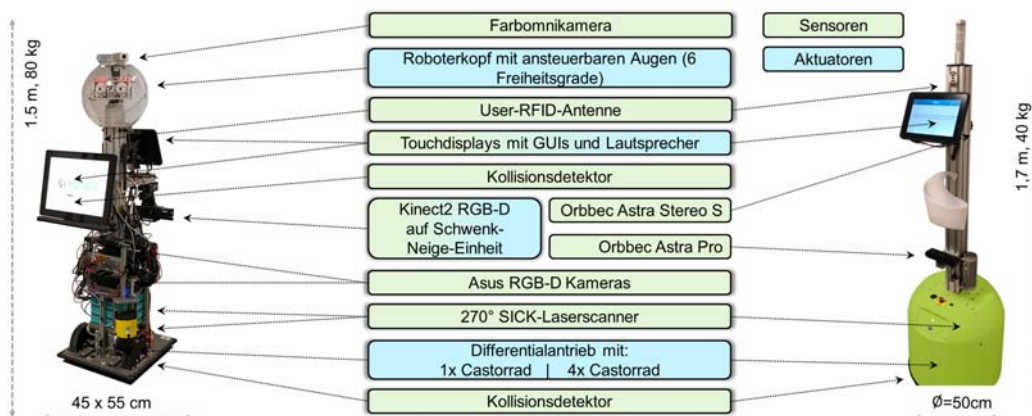


Abbildung 2: Sensorik und Hardware der Forschungsplattform (links) und der produktnahen Plattform (rechts).

Raum auf seine Ladestation, wurde durch den Klinikmitarbeiter in einen Stand-by-Modus versetzt und der Raum abgeschlossen). Nach Verlassen der Ladestation fuhr der Roboter in den angrenzenden Trainingsflur auf seine Startposition. Die teilnehmenden Patienten konnten sich zu beliebigen Zeiten über einen personalisierten RFID-Transponder am Roboter anmelden. Das jeweils erste Training erfolgte zusammen mit einem Therapeuten, der die Patienten im Umgang mit dem Roboter einwies. An diesem roboterassistierten Gangtraining nahmen 17 Patienten teil. Im Ergebnis fanden an 40 Trainingstagen 142 Trainingseinheiten (8,35 Trainingseinheiten/Patient) bei einer Gesamttrainingszeit von 16,1 h (7 min/ Trainingseinheit) und einer Gesamttrainingsstrecke von 34,8 km (240 m/ Trainingseinheit) statt, wobei kein externes Eingreifen in den Trainingsablauf erforderlich war.

Im Rahmen der klinischen Wirksamkeitsstudie sollte die Frage geklärt werden, ob und welche Gangmerkmale sich bei den Patienten verändern, die zusätzlich ein Training mit Roboter absolvieren. Die Waldkliniken führten dazu am präoperativen und am siebenten postoperativen Tag eine standardisierte Ganganalyse im eigenen Ganglabor verbunden mit der Erfassung klinischer Scores durch, die ein subjektives Maß für empfundene Schmerzen und Lebensqualität sind. Während es bei den Scores keine Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen gab, zeigte die Gruppe, die ein zusätzliches Robotertraining erhielt, postoperativ statistisch signifikant bessere Gangparameter, u. a. Knie-Flexionswinkel. Eine Bewertung der Genauigkeit der erfassten Gangparameter und Gangkorrekturen während des Trainings erfolgte aufgrund der fehlenden Ground-Truth-Daten nicht.

#### 4.3.2 Forschungsplattform

Während der zweiten Testreihe in 9/2019 erfolgten Untersuchungen mit der Forschungsplattform an 16 Trainingstagen mit 22 Patienten. Diese nutzten den Roboter an bis zu drei aufeinander folgenden Trainingstagen für insgesamt 91 Trainingseinheiten (4,14 Trainingseinheiten/Patient), mit einer Gesamttrainingszeit von 11,6 h (7,6 min/Trainingseinheit) und einer Gesamttrainingsstrecke von 17,8 km (195 m/Trainingseinheit).

Mit dem dabei durchgeführten technischen Benchmarking konnten u. a. Methoden im Bereich der ansichtsbasierten Wiedererkennung, der autonomen Wartepositionsfindung und dem Einnehmen einer Interaktionsposition bewertet werden. Dazu erfolgte eine technische Begleitung vor Ort, um korrigierend in den Trainingsablauf eingreifen zu können. Zudem wurden die Patienten aufgefordert, während des Trainings mehrfach Pause auf einem Stuhl im Trainingsflur zu machen. Mittels des technischen Benchmarkings konnte u. a. gezeigt werden, dass die Kinect2 die in einem spezifizierten Abstand und Winkel zum Roboter trainierenden Patienten während 99,6 % der Trainingszeit auch ohne Nachjustierung mittels Schwenk-Neigeeinheit erfassen konnte. An „Sich-setzende“ Patienten konnte zum Herstellen einer Interaktionsdistanz in 86 % der Fälle so herangefahren werden, dass eine Interaktion mit dem Roboterdisplay einfach möglich war (Abstand ca. 0,66 m und 10° abweichende Orientierung). Die während der Pausen der Patienten autonom ermittelten

Wartepositionen des Roboters wurden stets so bestimmt, dass der sitzende Patient im Fokus der Robotersensorik blieb. In 5 % der Fälle hätte die gewählte Roboterposition den Zugang zu Räumen erschwert oder unbeteiligte Personen hätten dem Roboter auf dem Flur ausweichen müssen. Diese und weitere Ergebnisse sind detailliert in [Trinh 2020] dargestellt. Ebenso wie bei der ersten Testreihe erfolgte keine Bewertung der Gangkorrekturhinweise aufgrund fehlender Ground-Truth-Daten. Alternativ sollen in einer nächsten Arbeit Therapeuten Videoausschnitte aus den Nutzertests mit den entsprechenden Gangkorrekturhinweisen hinsichtlich ihrer Güte bewerten, so dass damit das Gesamtsystem verbessert werden kann.

## 5 Entwicklungsstand aus Anwendersicht

Beide Testreihen an Nutzertests wurden aus sozialwissenschaftlicher Sicht extern durch das Institut für Sozialforschung (SIBIS) untersucht. In beiden Testreihen bewerteten die Patienten die Gebrauchstauglichkeit des Systems auf der System Usability Scale (SUS)<sup>3</sup>, dem am weitesten verbreiteten standardisierten Fragebogen zur Bewertung der empfundenen Benutzerfreundlichkeit. Dabei wurde die Forschungsplattform mit 90,7 (excellent) und die produktnahe Plattform mit 81,2 (sehr gut) bewertet.

Die Patienten der klinischen Studie (n=30) sollten außerdem ihre eigene Trainingsmotivation außerhalb der Trainings- und Therapiezeiten beurteilen. Alle Patienten, die zusätzlich zur Standardtherapie mit Roboter trainierten (n=15), bewerteten ihre Übungsmotivation als gut oder sehr gut, in der Vergleichsgruppe ohne Robotertraining (n=15) sind dies nur 11 Patienten. Alle Patienten (n=20), die mit der Forschungsplattform trainierten, stimmten (voll) zu, dass sie häufiger trainieren würden, wenn sie den Roboter dazu einsetzen könnten und bestätigen somit die positive Wirkung des Roboters auf die Motivation der Patienten. In einer über diese Tests hinausgehenden Befragung von 22 Patienten, die den Roboter ebenso in Tests genutzt hatten, stimmten 21 zu, das roboterassistierte Training nach der Einweisung durch einen Therapeuten selbständig ohne die Begleitung eines Therapeuten nutzen zu wollen. Das Training mit Roboter wurde während therapie- und diagnostikfreier Intervalle im Klinikablauf durchgeführt und 13 von 15 Patienten stimmten (voll) zu, dass sie sich während des Trainings mit Roboter sehr sicher fühlten, zwei Patienten antworteten mit „teils/teils“. Diese Angaben bescheinigen eine gute Umsetzung der Anforderungen aus Abschn. 2.2 für ein unabhängiges und sicheres Training mit Roboter. Ein Zitat der Nutzerbefragung zeigte, dass die Benutzung der Roboter intuitiv war: „Wer mit 90 Jahren Geld abheben kann, kann auch das Gerät ‚Roger‘ bedienen“.

<sup>3</sup> <https://experience.sap.com/skillup/system-usability-scale-jetzt-auch-auf-deutsch/>

## 6 Entwicklungsstand aus wirtschaftlicher Perspektive

Die technischen Möglichkeiten des roboterassistierten Gangtrainings zeigen, dass Therapeuten mehr Zeit für „hands-on-Therapie“, z. B. Muskel- und Gelenktechniken, Kryotherapie, Narbenmassagen aufwenden können, wenn sie den begleiteten Teil des Gangtrainings durch ein roboterassistiertes Eigentaining durchführen lassen können. Dies würde wiederum dazu führen, dass eine schnellere Genesung möglich wird. Die ersten Ergebnisse der durchgeführten klinischen Studie, die eine signifikante Verbesserung der Patientenbeweglichkeit aufzeigten, lassen dies erwarten.

Für die produktnahe Roboterplattform wurden möglichst kostengünstige, aber dennoch industrietaugliche und damit langlebige Komponenten genutzt, die teils auch in Medizinprodukten Einsatz finden können. Dies trägt dazu bei, dass zukünftig ein Produkt angeboten werden kann, das sich wirtschaftlich rechnet. Hinsichtlich der Einbindung in klinische Prozesse sind noch zu entwickelnde Schnittstellen zu Kliniksystemen sinnvoll, um eine Prozessautomatisierung zu erreichen.

Zu einer medizinischen Wirksamkeit einhergehend mit finanziellen Vorteilen für die Stakeholder, den Anforderungen an die Zulassung als Medizinprodukt und die Einbindung in klinische Abläufe wurden im Rahmen des Projekts erste Erkenntnisse gesammelt und durch Stakeholder-Interviews weiter ausgebaut.

Dies sind alles Anknüpfungspunkte auf dem Weg vom Demonstrator (TRL 6) zum fertigen Produkt (TRL 8), die weitere Arbeiten verlangen.

## 7 Fazit zu den Fragestellungen des Beitrags und Ausblick

**Autonomer Einsatz im klinischen Alltag:** Die produktnahe Plattform lief mehrere Wochen ohne technische oder therapeutische Begleitung im Trainingsalltag in der Klinik, was eine ausreichende Robustheit und Autonomie der Gesamtanwendung nachweist. In nächsten Arbeiten ist zu prüfen, welche der zunächst mit der Forschungsplattform umgesetzten Roboterfertigkeiten für ein alltagstaugliches Robotertrainings ohne Vorortbegleitung umsetzbar sind.

**Gangbild:** Die durchgeführte klinische Studie zeigte keine Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen hinsichtlich der erfassten klinischen Scores. Die Gruppe mit zusätzlichem Robotertraining wies postoperativ jedoch statistisch signifikant bessere Gangparameter auf. Die bislang durchgeführte klinische Studie deckte dabei nur einen Teil der Funktionalitäten ab, die ein Gangtrainingsroboter erfüllen muss. So werden noch randomisierte, blinde klinische Studien benötigt, um die Wirksamkeit des roboterassistierten Gangtrainings in der Breite zu demonstrieren. Weiterentwicklungen werden auch verbesserte Erkennungsalgorithmen zum Gangbilde betreffen.

**Trainingsmotivation:** Durch die Befragung der Patienten und Therapeuten, verbunden mit dem gezeigten mehrwöchigen Einsatz der Roboter konnte gezeigt werden, dass

sich Akzeptanzkriterien der Sicherheit, Bedienbarkeit, Vertrauen und Unabhängigkeit erfüllt wurden. Für die weitere Entwicklung hinsichtlich des Designs der Plattform ist die Erkenntnis wichtig, dass der Roboter mit den ausgeprägten Verkörperungsmerkmalen offensichtlich von den Patienten sehr positiv und keineswegs irritierend empfunden wurde.

### Danksagung

Die Autoren danken allen Partnern des Projekts ROGER für die produktive Zusammenarbeit und Kooperation, insbesondere den Waldkliniken Eisenberg für die Untersuchungen im Ganglabor und im klinischen Einsatz sowie der Krankenversicherung BARMER für deren Projektbegleitung. Dem Institut für Sozialforschung SIBIS danken wir für die sozialwissenschaftliche Evaluation.

## 8 Literatur

- [Gross 2017] Gross, H.-M. et al. *Mobile robot companion for walking training of stroke patients in clinical post-stroke rehabilitation*. in: IEEE Proc. of ICRA, 2017, pp. 1028–1035.
- [Vorndran 2018] Vorndran, A. et al. *How to Always Keep an Eye on the User with a Mobile Robot?* in: Int. Symposium on Robotics (ISR), Munich, Germany, pp. 219–225, VDE Verlag 2018
- [Hondori 2014] Hondori, H.M., et al. *A Review on Technical and Clinical Impact of Microsoft Kinect on Physical Therapy and Rehabilitation*. in: Journal of Medical Engineering, 2014;2014:846514. doi: 10.1155/2014/846514.
- [Wade 2011] Wade, E. et al. *Socially assistive robotics for guiding motor task practice* in: J.of Behav.Robotics, v.4,no.2, pp.218–227, 2011
- [Chi 2018] W. Chi et al. *A Gait Recognition Method for Human Following in Service Robots* in: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 48 (9), 1429–1440, 2018
- [Martins 2014] Martins, M. et al. *Legs tracking for walker-rehabilitation purposes* in IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics (ICBRB), 2014, pp. 387–392.
- [Mandel 2018] Mandel, C. et al. *Gait cycle classification for wheeled walker users by matching time series of distance measurements* in: Annual Conference of the Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America (RESNA), 2018.
- [Tsuda 2016a] Tsuda, N. et al. *Measurement and evaluation of crutch walk motions by Kinect sensor* in: Mechanical Engineering Journal, Vol.3, Issue 6, 2016
- [Tsuda 2016b] Tsuda, N. et al. *Development of Measuring and Guiding Robot for Crutch Walk Training* in: Proc. of Telehealth and Assistive Technology (TAT), 2016
- [Tsuda 2018] Tsuda, N. et al. *Attending and Observing Robot for Crutch Users* in: Companion of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction pp. 259–26, 2018
- [Scheidig 2019] Scheidig, A., et al. *May I Keep an Eye on Your Training? Gait Assessment Assisted by a Mobile Robot*. in: IEEE/RAS-EMBS Intern. Conf. on Rehab.Robotics (ICORR), pp. 701–708, 2019
- [Wengefeld 2016] Wengefeld, T. et al. *May I be your personal coach? Bringing together person tracking and visual re-identification on a mobile robot* in: Int. Sympos. on Rob. (ISR). VDE,2016,pp. 141–148
- [Jaeschke 2018] Jäschke, B. et al. *Making Gait Training Mobile - A Feasibility Analysis* in: IEEE Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics (Biorob), pp. 484–490, 2018
- [Trinh 2020] Trinh, T.Q. et al. *Autonomous Mobile Gait Training Robot for Orthopedic Rehabilitation in a Clinical Environment* in: IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Comm.(RO-MAN) 2020