



Fakultät VI - Medizin und Gesundheitswissenschaften

# **Ein immersiv ferngesteuertes Robotersystem zur Unterstützung von Patiententransfers in der Pflege**

Von der Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften der Carl von Ossietzky  
Universität Oldenburg zur Erlangung des Grades und Titels eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften**  
**(Dr.-Ing.)**

angenommene Dissertation  
von Herrn  
**Conrad Fifelski-von Böhlen**  
geboren am 17.09.1991 in Rostock

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein

Weitere Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Kerstin Thurow

Tag der Disputation: 18.03.2022

## **Abstract**

The demographic change, higher life expectations and staff shortage in elderly care are challenging the healthcare system in Germany. Constant high physical overload in care is a health risk and causes musculoskeletal diseases, forcing caregivers to leave the profession early, what worsens the situation for the remaining caregivers even more. Existing measures to cope with this vicious circle are failing. Considering the solutions to minimize direct and indirect health risks in other industries, the usage of robots comes into focus. Especially online tele-operated robots are used effectively to reduce direct and indirect health risks. Inspired by the approaches I present a novel telecare robotics system in this doctoral thesis. It allows an operator to control a robot system, mounted on a care bed, intuitively via a Virtual-Reality-integrated depth camera system. It provides the possibility to fulfill collaborative physically challenging patient transfers together with a nurse, without being present. The whole system is optimized for spatial separation of operator and nurse. Therefore, the operator can theoretically switch between different robot sites. Regarding future pandemics, contact with infectious patients can be reduced when using this system. This work presents the whole system including the background and motivation. It leads from conceptualization to implementation and usage. A dedicated technical evaluation and study-based evaluation proves the operational readiness and the benefit of a fully functional prototype.

## **Zusammenfassung**

Der demografische Wandel, hohe Lebenserwartungen und der Pflegekräftemangel in der Altenpflege stellen eine Herausforderung für das Gesundheitssystem Deutschlands dar. In diesem Beruf konstant auftretende hohe physische Belastungen sind ein Gesundheitsrisiko. Es kommt zu muskuloskelettalen Erkrankungen, aufgrund derer Pflegekräfte den Beruf vorzeitig verlassen, was die Situation für die verbliebenen Altenpfleger zusätzlich verschlimmert. Bestehende Maßnahmen und Lösungen zur Bewältigung dieser Problematik scheinen nicht auszureichen. Ein Blick in anderen Branchen zeigt, dass dort Roboter eingesetzt werden, um direkte und indirekte Gesundheitsrisiken zu minimieren. In dieser Dissertation präsentiere ich ein neuartiges ferngesteuertes Robotersystem für die Pflege. Es bietet einem Operator die Möglichkeit, aktiv an körperlich herausfordernden Patiententransfers teilzunehmen. Er arbeitet kollaborativ mit einer real vorhandenen Pflegekraft, ohne zwingend selbst vor Ort zu sein. Das Gesamtsystem ist für eine räumliche Trennung von Operator und Pflegekraft optimiert. Hinsichtlich zukünftiger Pandemien kann mit diesem System der direkte Kontakt zu infektiösen Patienten minimiert werden. Die hier vorliegende Arbeit stellt das Gesamtsystem inklusive der Motivation und des Hintergrunds vor. Es wird über die Konzeption zur Implementierung übergeleitet. Eine technische sowie eine studienbasierte Evaluation zeigen die Einsatzbereitschaft und die Vorteile bei der Nutzung eines voll funktionsfähigen Prototyps des ferngesteuerten Robotersystems für Patiententransfers.



# Danksagung

An dieser Stellen möchte ich allen danken, die mir bei der Anfertigung dieser Dissertation zur Seite gestanden und mich unterstützt haben sowie jenen, die mir dieses Vorhaben ermöglicht haben.

Mein erster und besonderer Dank gilt meinem Betreuer Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein, der mir mit Rat und Tat zur Seite stand und dieses Promotionsvorhaben mit zahlreichen Anregungen und fachlichen Diskussionen mit voranbrachte.

Bei Prof. Dr.-Ing. habil. Kerstin Thurow bedanke ich mich ebenfalls für die Bereitschaft als Zweitgutachterin zu fungieren und für die vielen hilfreichen Hinweise und Anmerkungen.

Ich danke meinen Kollegen und Weggefährten in der Abteilung Assistenzsysteme- und Medizintechnik, insbesondere Anna Brinkmann, Stephan Mävers, Jan Hendrik Röhl, Carolin Lübke, Christian Kowalski, Raphael Kappes und Dennis Lisiecki für die erfolgreiche Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch. Ebenso sei die Unterstützung von meinen Gruppenleitern Melvin Isken und Sandra Hellmers hervorgehoben. Auch die vielen Studien und Experimente wären ohne die Zusammenarbeit mit Studierenden, Hilfskräften und Probanden nicht umzusetzen gewesen.

Ein weiterer Dank geht an Simon Ortmann und Christof Schlaak für Rat und Austausch im fachlichen Kontext sowie für die Zusammenarbeit im vorangegangenen Studium, welches den Grundstein für diese Dissertation legte. Erik Radtke danke ich ebenfalls für das Einbringen seiner Expertise in fachliche Diskussionen.

Meiner Familie, meinem Bruder und ganz besonders meinen Eltern möchte ich für die Unterstützung und den Glauben an mich danken. Ein besonderer Dank geht zu guter Letzt an meine Frau Dorothea von Böhlen, die stets zu mir hält und die Hochs und Tiefs miterleben musste und an meine Tochter Lieselotte, die mich in der Endphase der schriftlichen Ausarbeitung zu Höchstleistungen motivierte.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Motivation und Hintergrund</b>	<b>5</b>
2.1	Herausforderungen und Chancen des demografischen Wandels . . . . .	5
2.1.1	Gestiegene Lebenserwartung . . . . .	5
2.1.2	Niedrige Fertilität . . . . .	6
2.1.3	Zuwanderung als Chance . . . . .	7
2.2	Fachkräftemangel in der Altenpflege . . . . .	8
2.2.1	Pflegequote und Pflegebedürftigkeit . . . . .	9
2.2.2	Beschäftigungssituation in der Altenpflege . . . . .	9
2.2.3	Attraktivität der Altenpflege . . . . .	11
2.3	Körperliche Überbelastung der Altenpfleger . . . . .	12
2.3.1	Manuelle Patiententransfers . . . . .	12
2.3.2	Arbeitsunfähigkeit aufgrund physischer Belastung . . . . .	13
2.3.3	Kollaboratives Arbeiten zur physischen Entlastung . . . . .	14
2.3.4	Technische Geräte zur physischen Entlastung . . . . .	15
2.4	Problemdefinition . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Eigener Ansatz: Kollaborative Telerobotik für die Altenpflege</b>	<b>19</b>
3.1	Inspiration: Kollaborative Arbeit am Pflegebett . . . . .	19
3.2	Machbarkeit: Sensible und leistungsfähige Roboteraktork . . . . .	21
3.3	Praxistauglichkeit: Einbettung in vorhandene Pflegeabläufe . . . . .	22
3.4	Realisierung: Immersive Telerobotik und Telepräsenz . . . . .	23
3.5	Evaluation: Messbare Entlastung . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>27</b>
4.1	Roboter in der Pflege . . . . .	27
4.1.1	Soziale und Emotionale Dienstleistungen . . . . .	28
4.1.2	Mobilitätshilfen . . . . .	30
4.1.3	Physische Assistenz . . . . .	32
4.2	Immersive Roboterfernsteuerung . . . . .	37

4.2.1	Fahrzeugfernsteuerungen . . . . .	37
4.2.2	Telemanipulation und Telepräsenz . . . . .	39
4.2.3	Ferngesteuerte Mensch-Roboter-Interaktion . . . . .	41
4.3	Subsysteme . . . . .	43
4.3.1	Tiefenbildkamarasysteme . . . . .	44
4.3.2	Direkte Robotersteuerung . . . . .	46
4.4	Kritik am Stand der Technik . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Komponentenauswahl</b>	<b>53</b>
5.1	Grundlegendes Physisches Setup . . . . .	53
5.2	Robotersystem . . . . .	55
5.3	Netzwerkinfrastruktur . . . . .	58
5.4	Immersive Fernsteuerung . . . . .	59
5.4.1	Virtual Reality System . . . . .	59
5.4.2	Sensorik für optisches Feedback . . . . .	59
5.4.3	3D-Framework . . . . .	60
5.5	Komponentenübersicht . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Implementierung</b>	<b>63</b>
6.1	Multi-K4A-System . . . . .	63
6.1.1	Azure Kinect Spezifikationen . . . . .	64
6.1.2	Hardwaresetup . . . . .	67
6.1.3	Registrierung . . . . .	72
6.1.4	Kompaktcomputer Implementierung . . . . .	74
6.1.5	Hauptcomputer Implementierung . . . . .	77
6.2	Robotersystem . . . . .	81
6.2.1	Kuka LBR iiwa 7 R800 Spezifikationen . . . . .	81
6.2.2	Hardwaresetup . . . . .	87
6.2.3	Cabinet Implementierung . . . . .	90
6.2.4	ROS-Computer Implementierung . . . . .	92
6.3	Virtual Reality Integration . . . . .	93
6.3.1	HTC Vive VR System . . . . .	93
6.3.2	Virtual Reality Konfiguration . . . . .	96
6.3.3	Registrierung . . . . .	97
6.3.4	Roboter-Mensch-Mapping . . . . .	100
6.3.5	Unity 3D Implementierung . . . . .	104
6.3.6	Nutzung . . . . .	106
6.4	Übersicht Gesamtsystem . . . . .	109



<b>7</b>	<b>Evaluation</b>	<b>113</b>
7.1	Technische Evaluation . . . . .	113
7.1.1	Multi-K4A-System . . . . .	113
7.1.2	Robotersystem . . . . .	120
7.1.3	Virtual Reality Integration . . . . .	123
7.2	Studie zur Messung der physischen Entlastung . . . . .	129
7.2.1	Studiendesign . . . . .	130
7.2.2	Messsystem . . . . .	133
7.2.3	Auswertung . . . . .	135
7.2.4	Ergebnisse . . . . .	137
7.2.5	Diskussion . . . . .	144
7.3	Weitere Tests und Experimente . . . . .	144
7.4	Evaluationserkenntnisse . . . . .	148
<b>8</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>149</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	149
8.2	Diskussion . . . . .	151
8.3	Zukünftige Arbeiten . . . . .	153
8.4	Fazit . . . . .	154
	<b>Eigene Publikationen</b>	<b>157</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>
<b>A</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>189</b>
<b>B</b>	<b>Messung der Güte der Registrierung</b>	<b>199</b>
<b>C</b>	<b>Studiendaten</b>	<b>201</b>
C.1	Tabelle . . . . .	201
C.2	Diagramme . . . . .	207
C.2.1	Kraftdaten . . . . .	207
C.2.2	SEMG-Daten . . . . .	225
<b>D</b>	<b>Ethikanträge</b>	<b>243</b>
D.1	Studie: Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung . . . . .	243
D.2	Studie: Studie zur Transferanalyse rückenschonender Pflegekonzepte . . . . .	274
<b>E</b>	<b>Copyrighterkklärungen</b>	<b>293</b>



# Glossar

**Immersion** Das Eintauchen eines Menschen in eine, durch auditive, visuelle oder haptische Stimulation als real empfundene, virtuelle Umgebung. 23, 38, 39, 42, 93, 154

**Master-Slave-System** Eine hierarchische Form der Verwaltung innerhalb eines Netzwerks, bei dem durch einen übergeordneten Master das Verhalten eines oder mehrerer untergeordneter Slaves bestimmt wird. 46, 47, 67

**Motion-Sickness** Die Bewegungskrankheit, die sich in Übelkeit äußert, wenn die visuellen Stimuli sich nicht mit den, über den Gleichgewichtssinn wahrgenommenen, Informationen decken. 99, 152

**Multi-K4A-System** Das in dieser Arbeit als Subsystem entwickelte Tiefenbildkamarasystem, bestehend aus 4 Microsoft *Azure Kinect* Tiefenbildkameras und spezialisierter Hard- und Software. 2, 63, 70, 109, 113, 133, 135, 150

**Operator** Ein Mensch, der ein Gerät, zum Beispiel einen Roboter, steuert. 20, 21, 23, 24, 38–43, 46–50, 53, 54, 57–61, 63, 67, 69, 88, 89, 93, 95, 96, 99, 102–111, 113, 123, 125, 127–129, 133, 148, 149, 151–153, 190, 194–196

**Pflegehilfskraft** Ein in der Pflege arbeitender Mensch ohne entsprechende geregelte Berufsausbildung. 10, 11, 13

**Shader** Ein Programm, das auf Grundlage von geometrischen Gegebenheiten, Texturen und weiteren Merkmalen virtuelle Objekte darstellt. 80, 192

**Squat** Eine korrekt ausgeführte Kniebeuge, bei der die Fußsohlen schulterbreit auseinander sind. 134

**Totmannschalter** Ein Knopf, der durchgehend gedrückt sein muss, damit die Steuerung eines Geräts freigeschaltet bleibt. 105, 107, 129



# Akronyme

- AdaMeKoR** Adaptives Mehrkomponentenrobotersystem für die Pflege. 3
- API** Application Programming Interface. 95
- AR** Augmented-Reality. 37
- BMBF** Bundesministerium für Bildung und Forschung. 3, 30, 33, 34, 89
- BMI** Body-Mass-Index. 141
- CPU** Central Processing Unit. 124, 125
- DGUV** Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.. 14–16
- DLR** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. 30
- GPU** Graphics Processing Unit. 71, 124
- GWS** Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH. 9
- HMD** Head-Mounted-Device. 23, 24, 38–42, 44, 47–49, 51, 53, 54, 59, 60, 63, 94, 95, 105, 108, 124, 125, 190, 193
- ICP** Iterative Closest Point. 73
- ITAGAP** Integrierte Technik- und Arbeitsprozessentwicklung für die Gesundheit in der ambulanten Pflege. 3
- K4A** *Azure Kinect*. 45, 60, 62–64, 66–79, 81, 93, 96–100, 108, 110, 111, 114–117, 123, 124, 127, 150, 190–192, 194, 195
- LAN** Local Area Network. 71

- LiDaR** Light Detection and Ranging. 38, 60
- LUT** Look-Up-Table. 66, 67, 75, 76, 191
- MR** Mixed-Reality. 23, 37, 39, 40, 96
- NBA** *Neues Begutachtungsassessment*. 27, 28, 30, 32
- NFOV** Near Field of View. 65–67, 76, 77, 80, 114, 116, 124, 125, 127, 191, 195
- PIZ** Pflegeinnovationszentrum. 89
- ProtoBuf** *Protocol Buffers*. 58, 61, 62, 69, 75–77, 111, 190, 195
- RGB** Rot-Grün-Blau. 64–66
- RMS** Root-Mean-Square. 137
- ROS** *Robot Operating System*. 42, 43, 58, 61, 62, 73, 78, 81, 88, 89, 91–93, 105, 106, 111, 125, 190, 193, 195
- SDK** Software Development Kit. 69, 74
- SEMG** Oberflächenelektromyographie. 25, 41, 133–137, 141–143, 148, 196, 197
- TAB** Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. 16, 27, 28, 30–33
- TCP** Transfer Control Protocol. 75, 78, 106, 192
- TFR** Total Fertility Rate. 6
- TOF** Time-Of-Flight. 45, 50, 60, 64
- UDP** User Datagram Protocol. 85
- URDF** Unified Robot Description Format. 96
- VR** Virtual-Reality. 2, 23, 24, 37–40, 44, 46, 48, 51, 53, 54, 59–63, 66, 71, 77, 88, 93–96, 99–113, 123, 129, 130, 133, 150, 152–154, 190, 193–195
- WFOV** Wide Field of View. 65

# Kapitel 1

## Einleitung

Der demografische Wandel, welcher durch eine gestiegene Lebenserwartung [Ges21b] [Sta21b] und das Missverhältnis zwischen geburtenstarken Jahrgängen der sechziger Jahre und den nachfolgenden geburtenschwachen Jahrgängen entsteht [Wil20, S. 7] [Des21a], bedingt einen Notstand in der stationären und ambulanten Altenpflege in Deutschland. Seine Bewältigung ist eine zentrale Aufgabe der kommenden Jahre [HK17]. Der hohe Krankenstand und die Tendenz, den Beruf noch vor dem Eintritt in das Rentenalter zu verlassen, sind Missstände, deren Ursachen hauptsächlich in der körperlichen Überbelastung liegen [WHM<sup>+</sup>14] [KRR17]. Dies verschärft die Problematik weiter und bildet einen Teufelskreis, da das verbleibende Team die Arbeiten der ausgefallenen Pflegekräfte übernehmen muss und noch stärker belastet wird.

Ver mehrt junge Menschen zur Ergreifung des Pflegeberufs zu motivieren und die Organisation zu optimieren, sind nachhaltige Lösungsstrategien bezüglich dieser Problematik [Ern21]. Schulungen und Weiterbildungen hinsichtlich des ergonomischen Arbeitens und der Einsatz technischer Hilfsmittel können möglicherweise Abhilfe schaffen. Gegenwärtige Zahlen aus dem Berufsfeld der Altenpflege lassen jedoch vermuten, dass diese Bemühungen weiter verstärkt werden müssen oder andere Lösungsansätze nötig sind, um dem Aufkommen an zu pflegenden Patienten gerecht zu werden. Die Lage scheint sich in der Altenpflege, trotz aller Bemühungen, gegenwärtig weiter zu dramatisieren [Emu19]. Die Gründe sind Personalmangel und körperliche Überbelastung [WHM<sup>+</sup>14] [KRR17].

Neben den genannten konventionellen Mitteln – Neueinstellung, Organisation, Schulung und Pflegegerätenutzung – müssen auch andere Lösungswege exploriert werden. Weil die ständige körperliche Überbelastung, deren Folge muskuloskeletale Erkrankungen sind [KRR17], als ein Gesundheitsrisiko wahrgenommen werden kann, lohnt ein Blick in andere Branchen und deren Strategien zu Minimierung von Gesundheitsrisiken. Dies offenbart, dass die Reduktion von direkten Gesundheitsrisiken durch den Einsatz von technischen Gerätschaften, unter anderem auch Roboter, erreicht wird [TTLJ19] [GGSW20] [Ham16]. In vielen Fällen, in denen ein Mensch Lebensgefahr ausgesetzt ist, würde er die Tätigkeit selbst erledigen, handelt es sich um teleoperierte, also von Menschen ferngesteuerte Roboter. Diese werden zum Beispiel beim Transport von

---

Sprenstoff [KSP<sup>+</sup>04], in eingestürzten Gebäuden [TCN<sup>+</sup>17] oder im Weltraum [GIT21] eingesetzt. Es sind Situationen oder Orte, bei denen eine Gefahr für Menschen besteht und gleichzeitig autonome Entscheidungen der Roboter unerwünscht sind.

Aufgrund hoher physischer Belastungen und Überbeanspruchung im Beruf besteht ebenfalls ein Gesundheitsrisiko für die Beschäftigten der Altenpflege. Ein Robotereinsatz zur Assistenz bei physischer Belastungen ist denkbar. Bei dem Einsatz von Robotern in der Pflege wäre aber auch hier, zumindest laut einer Stellungnahme des Deutschen Ethikrats, eine volle Roboterautonomie unangebracht [Deu20a, S. 11-12]. Ein Roboter kann in der Altenpflege höchstens unterstützend an physisch fordernden Pflegehandlungen teilnehmen. Das unterscheidet Roboter für die Anwendung bei Patiententransfers in der Pflege maßgeblich von Beispielen aus anderen Branchen.

Ein Robotersystem, das in Patiententransfers eingesetzt wird, müsste demnach durch eine direkte Steuerung an den Transfers teilhaben können. Dies ist auch innerhalb einer Fernsteuerung möglich. Ein ferngesteuerter Roboter kann aktiv an Patiententransfers teilnehmen und einen, im Normalfall nicht vorhandenen zweiten Pfleger nachbilden. Dies könnte Präsenz und aktive Teilhabe am Patiententransfer ermöglichen. Der Fernsteuernde könnte perspektivisch von einem anderen Ort die Pflegehandlungen kollaborativ mit dem, sich physisch vor Ort befindlichen, Pfleger erledigen und sich, ohne den Ort zu wechseln, zeitsparend zwischen mehreren Robotern und somit mehreren Patienten hin- und herschalten.

Diese Überlegungen führen zur Entwicklung eines ferngesteuerten Robotersystem zur Unterstützung von Patiententransfers in der Altenpflege, um kollaborative Patiententransfers durch Roboter zu ermöglichen. Inspiriert von Telerobotik anderer Branchen und dennoch maßgeschneidert auf den Einsatz in der Altenpflege, wird das, in der hier vorliegenden wissenschaftlichen Forschungsarbeit beschriebene, Gesamtsystem vorgestellt. Über die Motivation und den Hintergrund (Kapitel 2), die Entwicklung eines eigenen Ansatzes (Kapitel 3) und den Stand der Technik (Kapitel 4) wird zur Auswahl der Komponenten (Kapitel 5) und damit zur Konzeption des Systems übergeleitet. In Kapitel 6 wird die Implementierung für alle beteiligten Subsysteme vorgestellt. Schließlich entsteht ein Prototyp, bestehend aus einem aktiven kraftsensiblen Robotersystem, welches an ein Pflegebett montiert ist und einer intuitiv bedienbaren Steuerung über ein Virtual-Reality (VR)-System. Dies ermöglicht ein kollaboratives Arbeiten zweier Pflegekräfte an einem Pflegebett, obwohl nur eine Pflegekraft physisch vor Ort ist. Die nötige visuelle Rückkopplung entsteht durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Tiefenbildkameras innerhalb des eigens entwickelten Multi-K4A-Systems, welche durch die dreidimensionale Bildgebung mit dem VR-System harmonieren. Dieses vielseitig einsetzbare System zur Reduktion der körperlichen Belastung, mit dem Pflegekräfte kollaborativ, intuitiv, adaptiv und effektiv arbeiten können, ist ein Beitrag zur Gesundheit der Pflegekräfte und damit ebenfalls ein Beitrag zur Bewältigung des gesamtgesellschaftlichen Problems des Pflegenotstands. Die Vorteile, welche sich unter der Nutzung des Systems bei Patiententransfers für den Pfleger vor Ort ergeben, sind durch Studien und Tests in Kapitel 7 beschrieben. Die technische Realisierung wird dort ebenfalls evaluiert. Kapitel 8 fasst die Ergebnisse zusammen und diskutiert diese, bevor die Arbeit mit einem Zukunftsausblick und einem Fazit schließt.



---

Die hier vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in den Forschungsprojekten Integrierte Technik- und Arbeitsprozessentwicklung für die Gesundheit in der ambulanten Pflege (ITAGAP) (Fördernummer: 02L14A240) und Adaptives Mehrkomponentenrobotersystem für die Pflege (AdaMeKoR) (Fördernummer: 16SV8534).



# Kapitel 2

## Motivation und Hintergrund

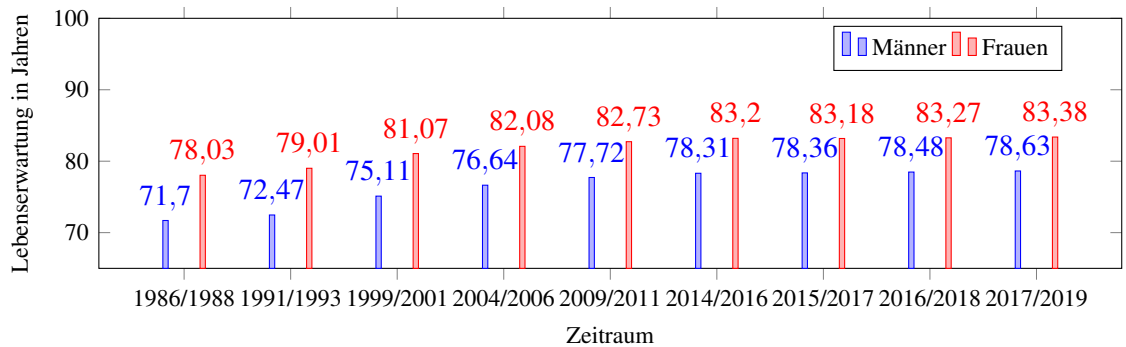
In diesem Kapitel werden die Hintergründe und die aktuelle Situation in der Altenpflege aufgeführt, um die Motivation zur Entwicklung des hier beschriebenen ferngesteuerten Robotersystems darzustellen. Zunächst wird auf den demografischen Wandel und die damit verbundenen Herausforderungen und Chancen verwiesen (Abschnitt 2.1). Der Fachkräftemangel in der Altenpflege und seine Ursachen werden in Abschnitt 2.2 untersucht. Die körperliche Belastung, deren Reduktion das erklärte Ziel dieser Forschungsarbeit ist, wird hinsichtlich verschiedener Aspekte und Anstrengungen zur Belastungsreduktion in Abschnitt 2.3 beleuchtet. Mit einer abschließenden Problemdefinition (Abschnitt 2.4) endet das Kapitel. Für die einzelnen Punkte wird ausschließlich die Situation Deutschlands herangezogen, da tiefgreifende internationale Unterschiede vorliegen.

### 2.1 Herausforderungen und Chancen des demografischen Wandels

Die berufliche Situation der Altenpfleger ist eng mit dem wachsenden Anteil älterer Menschen in der Gesellschaft verknüpft. Nach Prof. Dr. Christina Benita Wilke, Professorin für Volkswirtschaftslehre, setzt sich der demografische Wandel aus drei Parametern zusammen: die Entwicklung der Lebenserwartung, das Geburtenverhalten und die Entwicklung des Wanderungssaldos [Wil20, S. 4]. Diese drei Facetten ermöglichen es, Vorhersagen über die zukünftige Bevölkerungsentwicklung zu treffen und sind zum Verständnis der Herausforderungen und der Chancen für die Altenpflege notwendig.

#### 2.1.1 Gestiegene Lebenserwartung

Die Lebenserwartung von Neugeborenen beträgt laut Gesundheitsberichterstattung des Bundes im Zeitraum von 2017 bis 2019 83,38 Jahre bei Mädchen und 78,63 Jahre bei Jungen [Ges21b]. Dieser Wert ist in den letzten Jahren nur leicht gestiegen (siehe Abbildung 2.1), jedoch gegenüber Menschen, die vor der Jahrtausendwende geboren sind, um einige Jahre höher [Ges21b]. Da in diesem Kontext von Geburt an ermittelt wird, ist nicht präzise zu entnehmen, wie alt Menschen in Deutschland wirklich werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht nur eine vor-



**Abbildung 2.1:** Lebenserwartung ab Geburt in unterschiedlichen Geburtenzeiträumen für Männer und Frauen [Ges21b].

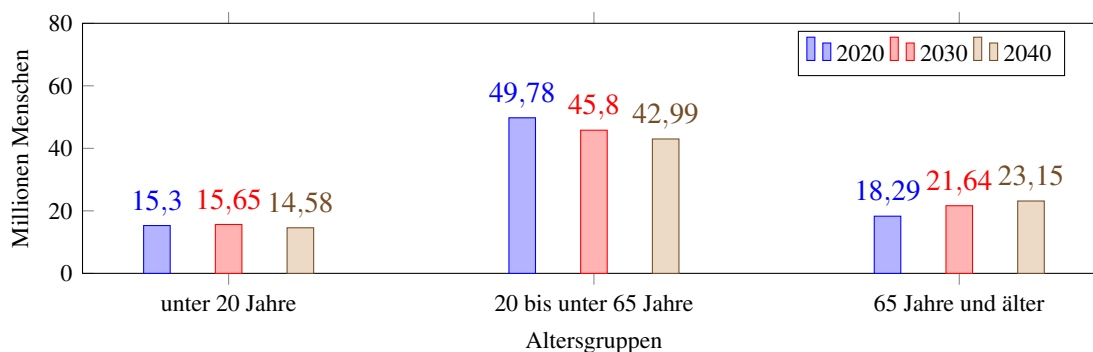
liegende Altersschwäche (z.B. altersbedingte tödliche Krankheiten) die Zahlen beeinflusst, sondern auch andere Todesursachen. In diesem Zusammenhang werden beispielsweise die Verringerung der Säuglingssterblichkeit, weniger tödliche Betriebsunfälle sowie bessere Hygiene und Ernährungsgewohnheiten genannt [Wil20, S. 5].

Ein für die Altenpflege eher relevanter Wert ist die fernere Lebenserwartung. Diese beschreibt das zu erwartende Restleben, sobald das 65. Lebensjahr erreicht ist [Wil20, S. 5]. Dieser Wert liegt 2018 bei 21 Jahren für Frauen und circa 18 Jahren für Männer [Sta18] [Wil20, S. 5]. Demnach können Frauen, die 1953 geboren sind und 2018 bereits 65 Jahre alt sind, durchschnittlich ein Lebensalter von 86 Jahren erreichen, Männer hingegen ein Alter von 83 Jahren [Wil20, S. 5]. Dies zeigt einen Unterschied zwischen der Lebenserwartung bei Geburt versus der Lebenserwartung ab 65 Jahren. Anhand der Werte des Statistischen Bundesamts, die für diesen Zeitraum jedoch nur in Zehnerschritten angegeben sind, beträgt die Lebenserwartung ab Geburt 68,5 Jahre für Frauen und 64,6 Jahre für Männer im Jahr 1950 und selbst 1960 nur 72,4 Jahre beziehungsweise 66,9 Jahre [Sta21b]. Es können also sowohl ein Anstieg der Lebenserwartung ab Geburt, als auch ein Anstieg der ferneren Lebenserwartung festgestellt werden. Demnach werden die Menschen tatsächlich älter und sind somit möglicherweise länger pflegebedürftig. Der Einfluss der Lebenserwartung auf die Zusammensetzung der Gesellschaft muss allerdings noch unter Berücksichtigung des Geburtenverhaltens (siehe Abschnitt 2.1.2) und des Einstiegs in die Pflegebedürftigkeit (siehe Abschnitt 2.2.1) bewertet werden.

### 2.1.2 Niedrige Fertilität

Als Geburtenrate oder auch zusammengefasste Geburtenziffer Total Fertility Rate (TFR) wird die durchschnittliche Anzahl an Kindern beschrieben, die eine Frau in ihrem Leben bekommen würde, wenn die Verhältnisse des betrachteten Jahres von ihrem 15. bis 49. Lebensjahr gelten würden [Des21b]. Hohe Werte der 1950er und 1960er Jahre, welche als Babyboom bekannt sind, wurden in den späteren sechziger Jahren durch die Antibabypille ausgebremst, weswegen

## 2.1 Herausforderungen und Chancen des demografischen Wandels

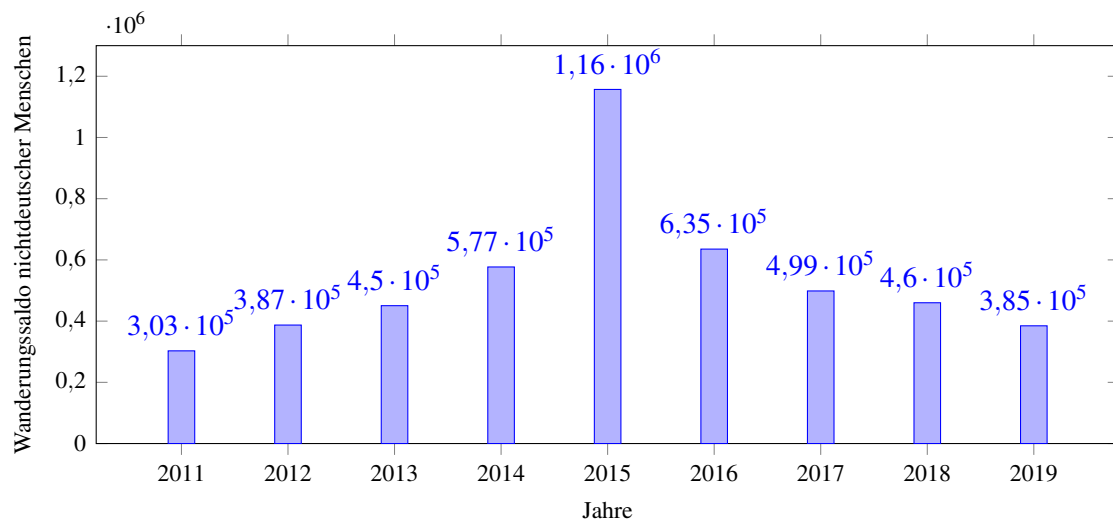


**Abbildung 2.2:** Deutsche Bevölkerung in Millionen, eingeteilt in Altersgruppen nach der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung [Ges21a].

auch vom „Pillenknicke“ gesprochen wird [Wil20, S. 7]. Seither bleibt der Wert auf einem Niveau von etwa 1,4 Kindern pro Frau, während ein bestandserhaltender Wert 2,1 Kinder pro Frau wäre [Wil20, S. 7]. Allerdings schätzt das Statistische Bundesamt in verschiedenen Szenarien den Wert von 1,4 bis 1,7 für die Zukunft [Wil20, S. 8]. Da die aktuellen und nachfolgenden Müttergenerationen geburtenschwachen Jahrgängen entstammen, wird die Anzahl an Lebendgeborenen zunächst weiter abnehmen [Wil20, S. 8]. Das Geburtenrekordjahr 2016 verzeichnete 792.000 Geburten bei gleichzeitig 911.000 Sterbefällen [Des21c]. Dies ist eine Differenz von 199.000. Geburtenstarke Jahrgänge werden in den nächsten Jahren das Renteneintrittsalter erreichen und aufgrund steigender Lebenserwartung für eine ältere Gesellschaft sorgen [HK17]. Daten der 14. Bevölkerungsvorausberechnung dokumentieren diesen Trend und postulieren, dass sich der vermeintlich berufstätige Anteil der Gesellschaft im Alter von 20 bis unter 65 Jahren bis 2040 verringert, während gleichzeitig der Anteil der über 65-jährigen steigt (siehe Abbildung 2.2) [Ges21a]. Diese Entwicklung könnte zu einem Missverhältnis von Pflegebedürftigen und potenziell Pflegenden führen.

### 2.1.3 Zuwanderung als Chance

Trotz der schwachen Geburtenzahlen kann kein maßgeblicher Bevölkerungsrückgang festgestellt werden [Wil20, S. 10]. Der Grund dafür liegt in der Zuwanderung aus dem Ausland [Wil20, S. 10]. Die Bedeutung der Rolle der Ausländer oder Menschen mit Migrationshintergrund nimmt vor dem Hintergrund des Geburtendefizits weiter zu [Swi16, S. 156]. Gerade in den letzten fünf Jahren ist eine massive Zuwanderung festzustellen (siehe Abbildung 2.3) [Sta21e]. Diese Zahlen sind in Bezug auf die Situation der Altenpflege zu bewerten, da die Vermutung nahe liegt, ein Zuzug junger Menschen aus dem Ausland würde die bestehende Problematik entschärfen. Ein Blick in das Dokument „Bevölkerung und Erwerbstätigkeit Bevölkerung mit Migrationshintergrund - Ergebnisse des Mikrozensus 2019“ des Statistischen Bundesamtes offenbart folgende Informationen zum Altersdurchschnitt der Migranten: das Durchschnittsalter von Menschen in Privathaushalten mit Mi-



**Abbildung 2.3:** Wanderungssaldo nichtdeutscher Menschen in den Jahren von 2011 bis 2019. Hinweis Destatis: „Die Ergebnisse ab dem Berichtsjahr 2016 sind aufgrund methodischer Änderungen und technischer Weiterentwicklungen nur bedingt mit den Vorjahreswerten vergleichbar. Die Genauigkeit der Ergebnisse des Berichtsjahres 2016 ist u. a. aufgrund von Unstimmigkeiten in Zusammenhang mit der melderechtlichen Behandlung von Schutzsuchenden eingeschränkt.“ [Sta21e].

grationshintergrund im weiteren Sinn beträgt 35,6 Jahre [Sta20, S. 71]. Dazu zählen unter anderem Ausländer aber auch deutsche Spätaussiedler [Sta20, S. 68-71]. Dieser Wert beträgt für Personen in Privathaushalten ohne Migrationshintergrund 47,3 Jahre, also über 10 Jahre mehr im Durchschnitt [Sta20, S. 71]. Für die Gruppe der Ausländer wird unterschieden zwischen Ausländern mit eigener Migrationserfahrung, hier liegt der Wert bei 40,6 Jahren, und Ausländern ohne eigene Migrationserfahrungen, mit dem Wert von 23,6 Jahren [Sta20, S. 71]. Diese Menschen sind also durchschnittlich deutlich jünger als die Menschen ohne Migrationshintergrund in diesem Land. Weiterhin unterscheiden sich Ausländer beziehungsweise Personen mit Migrationshintergrund hinsichtlich ihrer Fertilität von Deutschen ohne Migrationshintergrund, da sie mehr Kinder bekommen [Swi16, S. 156]. Diese Gegebenheiten können für die Altenpflege unter der Voraussetzung entlastend werden, dass die zugewanderten Personen einen Pflegeberuf ergreifen und ausüben.

## 2.2 Fachkräftemangel in der Altenpflege

Die alternde Bevölkerung ist heute und wird zukünftig mit einer angespannten Personalsituation in der Altenpflege konfrontiert [Sch21, S. 22-29]. Die Disbalance zwischen Pflegern und Patienten entsteht nicht ausschließlich durch Effekte des demografischen Wandels. Auch die Rahmenbedingungen unter denen die Beschäftigten in der Pflege ihre Arbeit verrichten, sind von Bedeutung.

Deswegen werden die Pflegequote, die Beschäftigungssituation und die Attraktivität der Altenpflege im Folgenden untersucht.

### 2.2.1 Pflegequote und Pflegebedürftigkeit

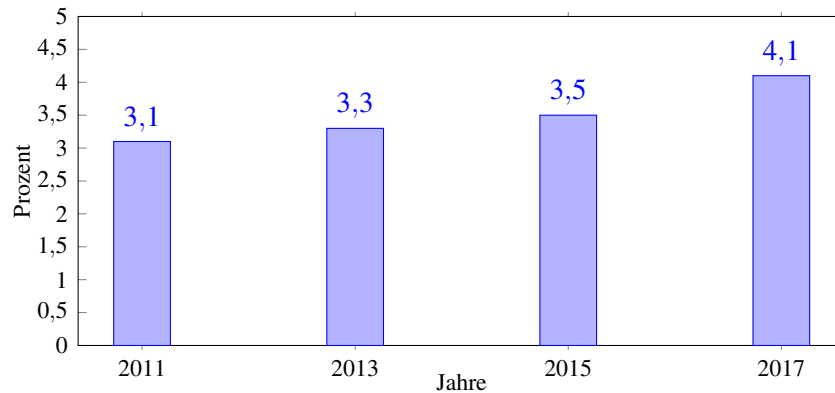
Die Pflegequote beschreibt den Anteil der Menschen, die einen Pflegebedarf haben, in Prozent. Diese Zahl wird vom Bund erhoben und veröffentlicht (siehe Abbildung 2.4). Die Altersgruppen müssen allerdings differenziert betrachtet werden. Wurde im Jahre 1988 noch von einer Pflegequote von 8,8 % bei Menschen über 65 Jahren ausgegangen [Thi88, S. 251], sind es im Jahr 2017 laut Berechnungen von Tesch et al., auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamts, 15,7 % [TRE20, S. 4]. Dies steht im Zusammenhang mit älter werdenden Menschen, hat aber auch andere Ursachen. Die Anzahl an Pflegebedürftigen steigt unter anderem dadurch, dass sich das Verhältnis von akuten Krankheitsbildern zu chronisch-degenerativen verschiebt [HK17, S. 133]. Schätzungen von Hommel et al. zufolge steigt die Zahl an pflegebedürftigen Menschen von 2 Mio. im Jahre 1999 auf 4,7 Mio. bis 2060, was bedeuten würde, dass 6 % der Gesamtbevölkerung pflegebedürftig wäre [HK17, S. 133]. In der Diskussion über Pflegebedürftigkeit ist allerdings auch anzumerken, dass diese zwischen 2015 und 2017 auch deswegen um den hohen Wert von 19,4 % stieg, weil die Einführung eines neuen Pflegebedürftigkeitsbegriffs vorgenommen wurde [Sch21, S. 71]. Dies fand im Rahmen des zweiten Pflegestärkungsgesetzes (PSGII BGBI. I 2015 S. 2424) zum 01. Januar 2017 statt [Bre17, S. 26]. Die Pflegebedürftigen ohne Pflegestufe galten trotz der Tatsache, dass sie Leistungen empfangen, vor der Neueinführung des Begriffs nicht als pflegebedürftig [Sch21, S. 71]. Daten, wie die des Pflegereports 2020 der Krankenkasse Barmer [RMP20], müssen unter diesem Umstand betrachtet werden. Hier ist ein Anstieg des Eintritts in die Pflegebedürftigkeit, was in diesem Fall den Pflegegrad 2<sup>1</sup> meint, im Vergleich der Jahre 2013 und 2019 um 24 % zu verzeichnen [RMP20, S. 79]. Laut Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS) ist davon auszugehen, dass die starke Erhöhung der Pflegebedürftigkeit im Jahr 2017 eine einmalige Entwicklung ist, da vor der Neueinführung eine konstante Pflegequote zu beobachten war [SS19, S. 13-14]. Nach den Daten der 13. Bevölkerungsvorausberechnung können unter der Voraussetzung unveränderter Pflegequoten laut GWS 700.000 Pflegebedürftige mehr in 2035 im Gegensatz zu 2017 angenommen werden [SS19, S. 14]. Dies liegt am steigenden Anteil älterer Menschen an der Gesamtbevölkerung. Eine Verringerung der Pflegequote ist auf Grundlage der Daten vor 2017 nicht zu erwarten, siehe (Abbildung 2.4). Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels können auch leicht steigende oder stagnierende Pflegequoten die Personalproblematik in der Altenpflege verschärfen.

### 2.2.2 Beschäftigungssituation in der Altenpflege

Anhand der Zahl arbeitsloser Altenpfleger und unbesetzter Stellen, die von der Bundesagentur für Arbeit erhoben werden, müsste ein Pflegekräftemangel auszumachen sein. Zunächst fällt jedoch auf, dass die berufsspezifische Arbeitslosenquote in der Altenpflege in Deutschland im Jahr 2019

---

<sup>1</sup>**Anmerkung:** Pflegegrad 2 bedeutet „Erhebliche Beeinträchtigung der Selbstständigkeit oder der Fähigkeiten“ [Bre17, S. 29].



**Abbildung 2.4:** Pflegequote in Deutschland über alle Altersgruppen [Ges21c]. Hinweis: Durch die Einführung eines neuen Pflegebedürftigkeitsbegriffs können die Daten vor 2017 nur eingeschränkt mit den Daten von 2017 verglichen werden [Sch21, S. 71].

4,9 % beträgt [AS20, S. 10]. Die Arbeitslosenquote über alle Berufsgruppen beträgt 2019 lediglich 5 % [Sta21a], was aufgrund des vermeintlichen Pflegekräftemangels überrascht. Allerdings müssen hierbei Trends und unterschiedliche Berufsgruppen innerhalb der Altenpflege betrachtet werden. Im Jahr 2019 sind ein Prozent weniger Altenpflegekräfte arbeitslos gemeldet als im Vorjahr und es ist ein deutlicher Trend zum Rückgang dieses Werts zu verzeichnen [AS20, S. 10]. Die Zahl der gemeldeten Arbeitsstellen in der Altenpflege hat sich im Zehnjahresvergleich um 110 % erhöht [AS20, S. 14]. Insbesondere examinierte Altenpflegefachkräfte werden gesucht, was sich sowohl anhand ihres geringen Anteils an den Arbeitslosen als auch in der hohen Anzahl offener Stellen zeigt, welche gezielt für diese Berufsgruppe ausgeschrieben sind [AS20, S. 10]. So entsteht die unerwartet hohe Arbeitslosenquote durch den immensen Anteil von Pflegehilfskräften bei den arbeitslosen Altenpflegern, der 90 % beträgt, und des geringen Anteils (35 % in 2019) an gemeldeten Arbeitsstellen, die für solche ausgeschrieben sind [AS20, S. 10]. Aufgrund dieser Erkenntnis ist der Anteil der Arbeitslosen nach unterschiedlichen Qualifikationsniveaus noch einmal genauer zu betrachten. Nur 0,9 % der Altenpflegefachkräfte, also mit entsprechender Berufsqualifikation, sind von Arbeitslosigkeit betroffen [AS20, S. 10]. Somit sind hauptsächlich diejenigen Berufsangehörigen der Altenpflege arbeitslos, die nicht über eine geregelte Pflegeausbildung verfügen [AS20, S. 10]. Die Deckung der hohen Nachfrage an qualifizierten Altenpflegern kann durch die Weiterbildung der Pflegehilfskräfte erreicht werden, da diese laut Arbeitslosenstatistiken (siehe [AS20, S. 10]) weniger nachgefragt werden als ihre ausgebildeten Kollegen [AS20, S. 17].

Wie bereits im Abschnitt 2.1.3 angedeutet, kann die Zuwanderung von Menschen aus dem Ausland als Chance für den Arbeitsmarkt gesehen werden. Um die tatsächlichen Effekte zu bewerten, lohnt sich ein Blick in die Daten der Bundesagentur für Arbeit, hinsichtlich der Ausländer im Berufsfeld der Altenpflege. So waren im Jahr 2014 15 % der arbeitslosen Altenpfleger Ausländer und im Jahr 2019 betrug dieser Wert bereits 25 % [AS20, S. 12]. Der hohe Anstieg ist laut Bun-



desagentur für Arbeit auf die Flüchtlingszuwanderung von 2015 zurückzuführen sowie auf den Wunsch der Flüchtlinge in der Pflege zu arbeiten [AS20, S. 13]. Personen mit Migrationshintergrund werden in dieser Statistik allerdings nicht explizit erwähnt. Dass Zuwanderung einen Effekt hat, kann in westlichen Ländern beobachtet werden, in denen bereits vermehrt Pflegekräfte mit Migrationshintergrund eingestellt werden [TL18, S. 10]. Auch in Deutschland werden als Reaktion auf den Fachkräftemangel vermehrt Altenpfleger aus dem außereuropäischen Ausland angeworben [AS20, S. 8]. Vor dem Hintergrund der Arbeitslosenzahlen bleibt es dennoch eine Herausforderung die zugewanderten Menschen in der Altenpflege zu beschäftigen. Auch Pflegehilfskräfte müssen motiviert werden, sich weiterzubilden, um höhere Qualifikationen zu erreichen. Höhere Qualifikationen sind, wie bereits erwähnt, sehr gefragt. Weiterhin können gezielt Fachkräfte mit einer entsprechenden Ausbildung oder Berufsqualifikation angeworben werden. Das Absenken der Schwellen, beispielsweise für den Arbeitsmarktzugang für Zugewanderte aus den Westbalkanstaaten [AS20, S. 18], mag eine Maßnahme zur Bekämpfung des Personalmangels sein. Das Potential, die Personalproblematik in der Altenpflege maßgeblich durch Zuwanderung zu entschärfen, muss in Zukunft effektiv ausgeschöpft werden.

### 2.2.3 Attraktivität der Altenpflege

Neben der Fakten zum Personalmangel und der erhöhten Zahlen pflegebedürftiger Menschen muss die Motivation, den Pflegeberuf zu ergreifen, vorhanden sein. Es muss ein Ziel sein, junge Menschen für die Pflegeberufe zu begeistern. Die Branche leidet jedoch an einer unattraktiven Beschäftigungs- und Arbeitssituation [TL18, S. 10]. Welche Faktoren genau für die Unattraktivität dieser Berufe verantwortlich sind, muss für unterschiedliche Aspekte untersucht werden.

Zunächst ist ein Blick auf die Finanzierung zu werfen. Als Beispiel sei hier die stationäre Langzeitpflege aufgeführt, die als schlechtbezahlter Beruf mit herausfordernden Arbeitsbedingungen gilt [Sch21, S. 87]. Die geringe Entlohnung, die in den ersten Monaten des Jahres 2020 gerade einmal 11,35€ pro Stunde in den alten Bundesländern beträgt, wird als geringe gesellschaftliche Wertschätzung gesehen [Sch21, S. 87]. Eine Ursache dieses Problems ist die Restrukturierung der professionellen Infrastruktur, um privatwirtschaftähnliche Organisationsprinzipien zu etablieren, was nicht mit der restriktiven öffentlichen Finanzierung harmoniert [TL18, S. 10]. Die verschiedenen Parteien wie Leistungsempfänger, Kommunen, Pflegekassen und Einrichtungsträger sind nicht an einer höheren Bezahlung der Altenpfleger interessiert [Sch21, S. 87]. Die Bezahlung der Berufsangehörigen der Altenpflege ist gegenüber Krankenpflegern in den Berufsgruppen Helfer, Fachkräfte und Spezialisten laut Bundesagentur für Arbeit um mehr als 500€ niedriger [AS20, S. 7]. Diese Missstände werden von der Regierung adressiert. Für die Verbesserung der Bezahlung ist die Maßnahme „Konzentrierte Aktion Pflege“ [Bun19] zu nennen, da hier eine Möglichkeit zur besseren Entlohnung der Pflege geschaffen werden soll [Sch21, S. 87-88]. Die jüngsten Diskussionen um Tariflöhne für Pfleger könnten eine Verbesserung der Situation herbeiführen.

Auch die hohe Arbeitsbelastung ist der Attraktivität nicht zuträglich. So ist Deutschland im internationalen Vergleich an der Spitze, wenn es um die quantitativen Anforderungen in Alten- und Pflegeheimen geht [Sch21, S. 89]. Neben psychischen Belastungen, wie zum Beispiel die Kon-

frontation mit Tod und Krankheit der Patienten, sind auch physische Belastungen gegeben [Sch21, S. 89]. Laut Barmer Pflegereport 2020 belegen Antidepressiva den dritten Platz der am häufigsten verordneten Präparate für Altenpfleger [RMP20, S. 194]. Auf die körperliche Belastung wird in dieser Ausarbeitung in Abschnitt 2.3 gesondert eingegangen.

Verschiedene Maßnahmen wie zum Beispiel das „Pflegepersonal-Stärkungsgesetz“ (Ppsg BGBl. I 2018 S. 2394), das „Pflegeberufereformgesetz“ (PflBRef(G) BGBl. I 2017 S. 2581), die „Konzentrierte Aktion Pflege“ [Bun19] oder die „Ausbildungs- und Prüfverordnung für Pflegeberufe“ (PflAPrV BGBl. I 2018 S. 1572) sind auf die Steigerung der Attraktivität des Berufes ausgerichtet [RMP20, S. 47]. Eine Möglichkeit der Attraktivitätssteigerung könnte auch die Verbesserung der technischen Ausstattung sein. Die Pfleger erwarten beispielsweise einen stärkeren Einsatz von Hilfsmitteln wie Klingelanlagen mit Videoüberwachungen und Rücksprechfunktionen [Sch21, S. 158]. Auch Technologien wie Mobiltelefone, Vernetzung und Internet gewinnen diesbezüglich an Relevanz [Sch21, S. 158].

Neben vermehrter Personaleinstellung, besserer Ausstattung und angemessenerer Bezahlung soll der Mangel an Interesse am Beruf des Altenpflegers auch durch Veränderungen bei der Ausbildung bekämpft werden. Durch Maßnahmen und Gesetze können in Zukunft möglicherweise mehr Pflegekräfte für die Altenpflege gewonnen werden. Ob diese Strategien wirken, kann erst in den nächsten Jahren rückblickend bewertet werden.

## 2.3 Körperliche Überbelastung der Altenpfleger

Die Berufsangehörigen der Altenpflege sind einem erhöhten Gesundheitsrisiko ausgesetzt. Sowohl auf subjektiver als auch auf objektiver Ebene sind die Arbeitsbelastungen für Pflegekräfte im Vergleich zu anderen Berufsgruppen überdurchschnittlich hoch [HLS16]. Insbesondere die Rolle der Patiententransfers im Pflegealltag scheint von herausragender Bedeutung. Auch die Arbeitsunfähigkeitstage lassen sich auf die Überbelastung zurückführen. Es existieren verschiedene Ansätze zum Umgang mit schwerer körperlicher Arbeit im Kontext der Altenpflege, die es zu bewerten gilt. Physische Entlastung kann abseits vom Einsatz von Pflegegeräten auch durch die Zusammenarbeit von mehreren Pflegekräften beim Transfer erreicht werden.

### 2.3.1 Manuelle Patiententransfers

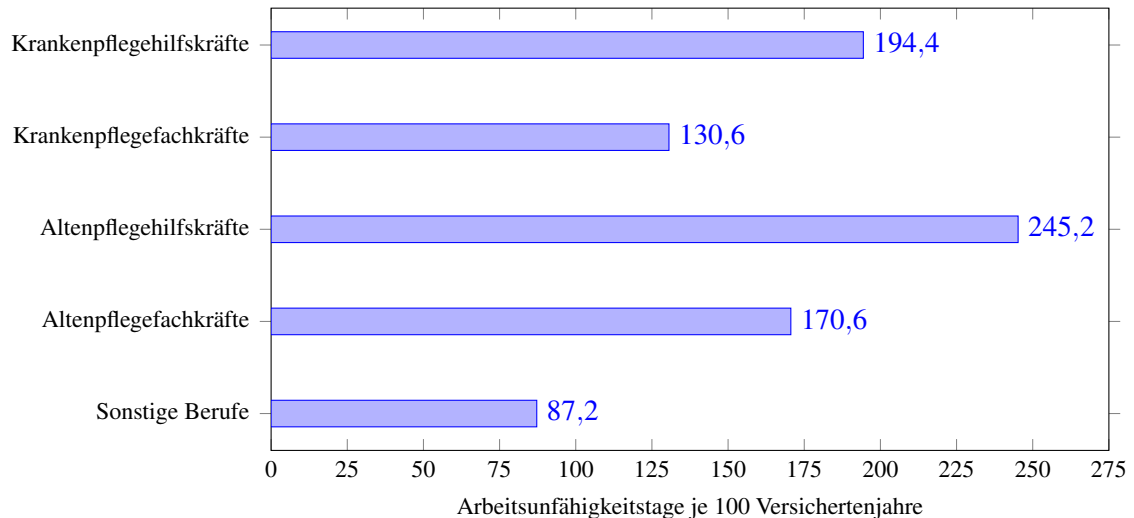
Das manuelle Bewegen, beziehungsweise Transferieren von Patienten ist ein essentieller Bestandteil der alltäglichen Handlungen in der Altenpflege. Auch das Tragen oder Heben von Lasten (über 10 kg bei Frauen und über 20 kg bei Männern) ist Arbeitsanforderung von 68,6 % der Fachkräfte dieses Berufs [HGK<sup>+</sup>16, S. 94]. Als Last kann im physikalischen Sinne auch der Körper eines pflegebedürftigen Patienten angesehen werden [GF17]. In diesem Zusammenhang ist auf die Bedeutung der manuellen Transfers zu verweisen, die, aufgrund der damit einhergehenden körperlichen Überbelastung der Pflegekräfte, zu den Hauptursachen von Rückenschmerzen zählen [WHM<sup>+</sup>14]. Allgemein werden diese Tätigkeiten in der Literatur als risikoreich eingestuft [VORT05] [GOBB91]. Heben, Halten, Ziehen des Gepflegten sowie ungünstige Positionierungen

bei diesen Aktivitäten sind potenzielle Ursachen von Muskel-Skelett-Erkrankungen [WHM<sup>+</sup>14]. Die Ausführung des Transfers eines Patienten in Richtung Kopfende ist ein Beispiel, bei dem hohe Belastungen der Lendenwirbelsäule aufgrund falscher Ausführung oder Ausführung ohne Hilfsmittel auftreten [Amm17]. Die Belastung der Lendenwirbelsäule bei der Arbeit am Pflegebett zeigen auch Jäger et al. in umfassenden Analysen zu verschiedenen Tätigkeiten am Pflegebett [JJT<sup>+</sup>14]. Untersucht werden dort in diesem Zusammenhang unter anderem das Aufrichten eines Patienten aus dem Liegen zum Sitzen im Bett, Bewegen eines liegenden Patienten in Richtung Bettkopfende und das Unterschieben einer Bettpfanne [JJT<sup>+</sup>14]. Dabei werden konventionelle und optimierte Transfermodi untersucht sowie der Einsatz kleinerer Hilfsmittel [JJT<sup>+</sup>14]. Auffällig ist, dass in keiner Variante die gemessenen Belastungen im akzeptablen Bereich sind, sofern sie mit alter- und geschlechtsspezifischen Richtwerten bewertet werden, weswegen zur Nutzung von Hilfsmitteln geraten wird [JJT<sup>+</sup>14]. Ammann weist weiterhin auf älter werdende Pflegekräfte und die Zunahme von schwergewichtigen Patienten hin [Amm17]. Eine ernstzunehmende Entwicklung in diesem Zusammenhang, welche zu Lasten der Pflegekräfte geht, ist die Zunahme von Übergewicht und Adipositas, die laut einer Veröffentlichung des Robert-Koch-Instituts auf Grundlage der Gesundheitsbefragung GEDA 2014/2015-EHIS [SLF<sup>+</sup>17] in Deutschland bei Erwachsenen 54 % beträgt [SMKL17]. Adipöse Patienten erfordern einen erhöhten Kraftaufwand der Pfleger im Pflegeprozess. Damit geht ein erhöhtes Risiko der körperlichen Überbelastung einher. Ein systematischer Review von Stiefler et al. [SSD<sup>+</sup>20] offenbart eindeutige Prädiktoren für den Heimeintritt. Dazu zählen unter anderem Ko-/Multimorbidität und Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems [SSD<sup>+</sup>20]. Dies sind Komplikationen, welche durch Adipositas hervorgerufen werden [Wir19]. Demnach werden übergewichtige oder adipöse Menschen eher zu Pflegefällen und sorgen aufgrund ihres Gewichts für zusätzliche Belastungen für Pflegekräfte. Aufgrund dieser Entwicklung und des Personalmangels ist mit steigenden Anforderungen an die Physis der Altenpfleger zu rechnen.

### 2.3.2 Arbeitsunfähigkeit aufgrund physischer Belastung

Anhaltende psychische und körperliche Belastungen sind die Hauptgründe für einen hohen Krankenstand der Pflegekräfte in der Altenpflege. Im Bundesdurchschnitt sind im Jahr 2015 im Gesundheitswesen 16,1 Arbeitsunfähigkeitstage pro Person und Jahr zu verzeichnen [KRR17]. In der Altenpflege sind es 24,1 Tage [KRR17], also nahezu 150 % des Wertes der anderen Beschäftigten des Gesundheitswesens. Die Muskel- und Skelett-Erkrankungen, zu denen auch Rückenschmerzen (10-GM-2020 M54 [Deu20b]) gehören, haben einen hohen Anteil und sind verglichen mit anderen medizinischen Berufen bei Altenpflegern besonders präsent [KRR17]. Auch neuere Daten belegen dies. Laut des Pflegereports der Krankenkasse Barmer aus dem Jahr 2020 ist die Anzahl der Arbeitsunfähigkeitstage im Bereich der Muskel- und Skelett-Erkrankungen für Pflegehilfskräfte in der Altenpflege fast doppelt so hoch wie bei den Beschäftigten aus nicht-pflegerischen Berufen (siehe Abbildung 2.5) [RMP20, S. 188]. Vor dem Hintergrund des bereits existierenden Pflegekräftemangel können diese Zahlen das bestehende Personalproblem ausweiten. Es zeichnet sich eine Abwärtsspirale ab: Wenn die ohnehin überbeanspruchten Pflegefachkräfte (siehe Abschnitt 2.2) weitere Personalausfälle haben, bedeutet dies im Umkehrschluss eine noch stärkere Belastung

des noch verfügbaren Personals. Dies führt wiederum zu einer erhöhten Belastung, die potenziell Krankheitsausfälle bedingt.



**Abbildung 2.5:** Arbeitsunfähigkeitstage durch Rückenschmerzen je 100 Versicherungsjahre in den Jahren von 2016-2018 laut Barmer Pflegereport 2020 [RMP20, S. 188].

### 2.3.3 Kollaboratives Arbeiten zur physischen Entlastung

Eine substantielle Entlastung eines Pflegers ist zu erwarten, wenn die Patiententransfers gemeinsam von mehreren Pflegern durchgeführt werden. Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) empfiehlt im Rahmen der Informationsbroschüren „GUV-I8557 - Rückengerechtes Arbeiten in der Pflege und Betreuung“ [Deu07, S. 19] und „GUV-I8535 - Rückengerechter Patiententransfer in der Kranken- und Altenpflege“ [Deu02, S. 8] eine Zusammenarbeit in bestimmten Situationen. Durch eine Absprache während des Transfers kann kollaborativ gearbeitet werden und die Belastung sowie die benötigte Zeit werden bei korrekter Ausführung für beide Pfleger minimiert [Lan20b, S. 234]. Ergonomisch unvorteilhafte Bewegungen und Positionen sind aber auch bei der Arbeit zu zweit nicht ausgeschlossen [Lan20a]. Letztendlich steht der gemeinsamen Arbeit bei Patiententransfers die dünne Personaldecke in diesen Berufen entgegen. Dies betrifft nicht nur die Zeit, die zwei Pflegekräfte statt einer mit einem Transfer beschäftigt sind, sondern auch Lauf- und Anfahrtswege. Beide Pfleger vor Ort bei einem Patienten einzusetzen bedeutet also trotz der Belastungsreduktion und der möglicherweise schnelleren Ausführung des Transfers auch den gleichzeitigen Einsatz zweier Ressourcen. In der Literatur lassen sich, bis auf die genannten Quellen, kaum weitere Verordnungen oder Anleitungen finden, wie Patiententransfers zu zweit durchgeführt werden sollen. Dies weist möglicherweise darauf hin, dass gemeinsames Arbeiten aufgrund des Personalmangels nicht dem Regelfall entspricht, obwohl Vorteile [Lan20b, S. 234] zu erwarten wären.

### 2.3.4 Technische Geräte zur physischen Entlastung

Pflegeeinrichtungen unterliegen der Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten bei der Arbeit "Lastenhandhabungsverordnung" (LasthandhabV BGBl. I 1996 S. 1841 und BGBl. I 2020 S. 1328). Laut §2(1) dieser Verordnung hat der Arbeitgeber bei der Handhabung von Lasten für mechanische Ausrüstung zu sorgen, um eine Gefährdung für Sicherheit und Gesundheit, insbesondere der Lendenwirbelsäule, zu vermeiden [Deu18]. Dies kann in der Pflege durch den Einsatz motorisierter technischer Hilfsmittel erreicht werden, um die es in diesem Abschnitt geht. Die DGUV beschreibt in ihrer Informationsbroschüre „Bewegen von Menschen im Gesundheitsdienst und in der Wohlfahrtspflege“ praktische Möglichkeiten zur Vermeidung von Lasten, wobei auch technische Geräte genannt werden [Deu18, S. 9-10]. Die Notsituation, welche sich aufgrund des demografischen Wandels und des Teufelskreises von Überbelastung und daraus folgender Unterbesetzung ergibt, existiert trotz theoretischer Verfügbarkeit technischer Hilfsmittel. Es ist zu klären, ob und welchen positiven Effekt die Hilfsmittel auf die körperliche Belastung haben, ob sie eingesetzt werden und welche Kompromisse durch ihre Nutzung eingegangen werden müssen. Leider existieren in der Literatur wenige Quellen, welche diese Punkte für die körperliche Belastung in der Altenpflege umfänglich adressieren. Dennoch können Erkenntnisse abgeleitet werden.

Prominente Beispiele technischer Hilfsmittel sind vollelektrische Pflegebetten und Patientenlifter, welche mithilfe einer Deckenschienenkonstruktion Transfers in der Wohnung ermöglichen. Diese technischen Geräte sind laut DGUV zur angesprochenen Vermeidung der Belastung geeignet [Deu18, S. 10]. Weitere, für die Altenpflege relevante, technische Geräte zur Transferentlastung nennt zumindest die angesprochene Broschüre nicht. Auf dem Markt finden sich jedoch weitere. Typische elektrische Geräte sind Aufrichthilfe, Aufstehhilfe sowie Pflegebetten und die angesprochenen Patientenlifter. Diese können je nach Hersteller mobil oder stationär sein.

Fraglich ist, ob technische Hilfsmittel konsequent eingesetzt werden. In einer veröffentlichten Untersuchung im Rahmen einer Online-Befragung der Charité von Juni 2019 unter Berücksichtigung von 355 professionellen Pflegekräften, von denen 17 % der Altenpflege zugeordnet sind, geben insgesamt nur 28 % an, Zugriff auf die in der Studie ausgewählten 10 Technologien zu haben [KBNZ19, S. 14-18]. Die Studienleiter geben an, dass hierbei 3 der 10 technische Geräte der körperlichen Unterstützung dienen. Es handelt sich um Hebehilfen, automatisierte Medikamentenverteiler und Roboter zum Materialtransport [KBNZ19, S. 14-18]. Die Hebehilfe ist für die physische Entlastung in der Altenpflege von besonderer Bedeutung. Bei der Nutzung der Hebehilfen geben von den 355 Befragten circa 38 % an, diese häufig und manchmal zu nutzen, circa 65 % den Zugang zu haben und circa 95 % Kenntnis von diesen Geräten zu haben [KBNZ19, S. 16]. Obwohl die befragte Menge nur zu einem kleinen Teil aus Altenpflegern besteht, kann aufgrund der anzunehmenden bescheideneren Ausstattung in der Altenpflege davon ausgegangen werden, dass die Verfügbarkeit schlechter ist als im Durchschnitt der Befragten. Die Differenz zwischen Verfügbarkeit und Nutzung kann mit dem erhöhten zeitlichen Aufwand erklärt werden oder mit dem Fehlen von Schulungen, die bei der Nutzung dieser Systeme angebracht sind [Amm17]. Auch zwischen Kenntnis der Existenz dieser Geräte und der Verfügbarkeit zeigt sich ein Unterschied, welcher aus den begrenzten finan-

ziellen Mittel in der Pflege [TL18] geschlossen werden kann. Die physische Entlastung kann bei der Nutzung von Patientliftern als gegeben angesehen werden, da das Gerät die Last trägt. Somit kann von einem Nutzen für den Pfleger, beziehungsweise einer Arbeitserleichterung gesprochen werden, sofern dieses Gerät vorhanden ist und auch eingesetzt wird. In einem Bericht des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) wird jedoch angemerkt, dass die Nutzung der Transfergeräte zeitaufwendig ist und oft eine zweite Pflegekraft zur Benutzung erfordert [Keh18, S. 62]. Allgemein ist die Akzeptanz von Technik in der Pflege ein oft untersuchtes Themengebiet [ZKS<sup>+</sup>20] [SMP<sup>+</sup>19] [AWF19].

Der Einfluss von Patientliftern auf die Pflegehandlung und somit auf die Handhabung des Patienten ist nicht zu vernachlässigen. In der Literatur wird das Fordern und Aktivieren von vorhandenen Bewegungsressourcen der Patienten angemahnt [GF17, Hel17]. Der 2014 vorgestellte Expertenstandard §113 a SGB 11 beschreibt das Erhalten der Mobilität beziehungsweise die Verbesserung dieser als Hauptziele bei der Pflege von Menschen, um die Gesundheit zu fördern und zur Prävention [Deu18, S. 10]. Die DGUV beschreibt in der bereits angesprochenen Informationsbroschüre die Ermittlung der Ressourcen, um Unterstützung zu vermeiden, die nicht notwendig sind [Deu18, S. 9]. Weiterhin wird in dieser Broschüre der positive Einfluss selbstständiger Patienten auf die Vermeidung von Gefährdungen im Sinne der Lastenhandhabungsverordnung aufgegriffen [Deu18, S. 10]. Ob ein Patientenlifter jedoch die Bewegungsressourcen einer zu pflegenden Person berücksichtigt, ist zu bezweifeln, da dieser Transfer den Patienten zur Passivität zwingt. Die Möglichkeit, aktiv am Pflegeprozess teilzuhaben, geht somit für den Patienten verloren. Auch die ethische Dimension ist durch die temporäre Unterbrechung des Körperkontakts zwischen Pfleger und Pflegebedürftigem kritisch zu bewerten. Bei schwergewichtigen Patienten oder anderweitig pflegeintensiven Patienten muss im Einzelfall abgewägt werden, ab wann die Belastungsreduktion bei der Nutzung eines Geräts den Aufwand zur Inbetriebnahme rechtfertigt.

## 2.4 Problemdefinition

Am Ende dieses Kapitels lässt sich feststellen, dass die Berufsangehörigen der Altenpflege unter einer körperlichen Überbelastung leiden, welche durch den Pflegekräftemangel und den demografischen Wandel bedingt ist. Das gemeinsame Arbeiten zweier Pfleger am Pflegebett, welches der Arbeitsort mit der höchsten Belastung für Pfleger ist [KRR17], reduziert die körperliche Belastung [Lan20b, S. 234], ist aber aufgrund der angespannten Personalsituation nicht flächendeckend umsetzbar. Mit einem proportionalen Anstieg von Pflegebedürftigen und Pflegekräften ist trotz der bereits ergriffenen Maßnahmen in den kommenden Jahren nicht zu rechnen. Die Anzahl der Pflegebedürftigen wird voraussichtlich stärker steigen. Auch die Anforderungen bei Pflege transfers erhöhen sich durch die Gewichtszunahme der Patienten [Amm17]. Weiterhin ist mit den eingesetzten technischen Hilfsmitteln offenbar keine ausreichende Reduktion der Belastung möglich. Der Einsatz dieser Hilfsmittel fügt sich, aufgrund des Aufwands zur Bedienung der Geräte [Keh18, S. 62], nicht passgenau in die bestehenden Pflegeprozesse ein. Die Ressourcen des Pfl-

## 2.4 Problemdefinition

---

gebedürftigen, durch die es möglich ist, aktiv am Pfl egetransfer teilzuhaben, werden beim Einsatz von Geräten wie Liftern außer Acht gelassen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein Gerät fehlt, welches eine körperliche Entlastung bei Patiententransfers erzielt, sich in bestehende Pflegeprozesse einfügt, die Personaldecke schont und auch den Pflegebedürftigen angemessen einbindet.





## Kapitel 3

# Eigener Ansatz: Kollaborative Telerobotik für die Altenpflege

Der eigene Ansatz zur Lösung des soeben definierten Problems ist ein ferngesteuertes Robotersystem. Dieses soll es ermöglichen, aus der Ferne kollaborativ mit einer am Pflegebett arbeitenden Pflegekraft Patiententransfers durchzuführen. In diesem Kapitel werden die grundlegenden Ideen, welche sich aus den Anforderungen des Problems ergeben erläutert: Die Inspiration (Abschnitt 3.1), die Machbarkeit in Hinblick auf die Roboteraktoriik (Abschnitt 3.2), die Praxistauglichkeit (Abschnitt 3.3), die Realisierung einer Fernsteuerung mit Telepräsenz und Teleoperation (Abschnitt 3.4) sowie die Evaluation des Robotersystems (Abschnitt 3.5).

### 3.1 Inspiration: Kollaborative Arbeit am Pflegebett

Kollaboratives Arbeiten zweier Pflegekräfte am Pflegebett wird bei pflegeintensiven Patienten angeraten, um die Belastung für die Pflegekräfte zu minimieren (siehe Abschnitt 2.3.3). Diese Arbeitsweise kann aufgrund der Tatsache, dass die Personalsituation dies kaum zulässt, als ein selten zu erreichendes Ideal betrachtet werden.

Gemeinsames Arbeiten ist jedoch nicht nur bei physischer Anwesenheit möglich. In der Forschung werden heutzutage bereits technische Geräte und Roboter eingesetzt, um Telepräsenz und Telemanipulation zu ermöglichen. Dies geschieht auch mit dem Ziel, eine Zusammenarbeit zwischen Menschen und durch Menschen ferngesteuerte Roboter zu ermöglichen (siehe Abschnitt 5.4).

Telerobotik wird in anderen Berufsfeldern beim Umgang mit gefährlichen Gegenständen, wie zum Beispiel Sprengstoff [KSP<sup>+</sup>04] oder in lebensfeindlichen Umgebung, wie dem Weltraum [GIT21] oder in Katastrophengebieten [TCN<sup>+</sup>17], eingesetzt. In diesen Situationen besteht eine direkte Lebensgefahr oder zumindest eine Verletzungsgefahr für Menschen. Um diese Risiken zu minimieren, werden Roboter genutzt, deren potenzielle Zerstörung in Kauf genommen wird, beziehungsweise, deren Materialien, Beschaffenheit und Aktoriik für diese speziellen Aufgaben entwickelt werden.

Wie sich bereits vom Begriff Teleroboter ableiten lässt, sind die eingesetzten Roboter nicht autonom, sondern durch einen sogenannten Operator ferngesteuert. Dies kann damit erklärt werden, dass in diesen kritischen Situationen, trotz aller technischen Fortschritte, letztendlich doch ein Mensch die Kontrolle behalten und die Verantwortung tragen soll.

Die Verbindung dieser Technik und der Altenpflege ist zunächst nicht naheliegend. Anders als in der Industrie ist der Kontakt zwischen Patient und Pfleger bei Pflegehandlungen von tragender Rolle im Pflegeprozess [Mei17, S. 164] und es könnten ethische Fragen aufgeworfen werden, sollte diese Bindung gekappt werden. Deswegen ist es nicht angebracht eine Roboterlösung vorzuschlagen, welche Pfleger ersetzt oder ihnen den Kontakt zu Patienten verwehrt. Es zeigen sich dennoch Parallelen zwischen industriellen Anwendungen und der möglichen Anwendung von Telerobotik in der Altenpflege. Obwohl in der Altenpflege normalerweise keine direkten Lebensgefahren oder lebensfeindliche Umgebungen auszumachen sind, ist durch die ständige körperliche Überbelastung und dem konstanten psychologischen Stress ein indirektes Gesundheitsrisiko gegeben [JJT<sup>+</sup>14] [NEK16]. Ähnlich der Beispiele aus Katastrophengebieten oder Weltraum können Roboter hier direkt durch Menschen gesteuert werden, um Überbelastungen, also Gesundheitsrisiken, auf den Roboter abzuleiten.

Um den Anforderungen an die Sicherheit gerecht zu werden und den, für die Altenpflege üblichen, Patientenkontakt aufrecht zu erhalten, ist die bereits erwähnte Kollaboration zwischen Mensch und ferngesteuertem Roboter zielführend. Durch das kollaborative Arbeiten am Pflegebett, kann eine Zwei-Pfleger-Situation hergestellt werden. Dabei ist einer der Pfleger in diesem Fall ein Teleoperator, der mithilfe eines Fernsteuerungssystems als direkt gesteuerter Roboter anwesend ist. Belastende Tätigkeiten am Pflegebett können somit durch diese Technologie gemeinsam durchgeführt werden, obwohl nur ein Pfleger vor Ort ist. Der Roboteroperator braucht dafür theoretisch nicht in der Nähe zu sein, sofern eine geeignete Fernsteuerung vorliegt. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit des Operators, sich nacheinander an verschiedene, ebenfalls mit dem Robotersystem ausgestattete, Orte zu schalten. So könnte ein Operator nacheinander an mehreren Pflegebetten durch das Herstellen einer Zwei-Pfleger-Situation für Entlastung bei den real vorhandenen Pflegekräften sorgen. Die Situation, dass zwei Pfleger gemeinsam am Pflegebett arbeiten, mag in der Praxis selten vorkommen. Sofern eine zweite Pflegekraft nötig ist, und diese durch einen ferngesteuerten Roboter simuliert ist, deren Operator keine Anfahrtswege zu bewältigen hat, stellt dies aber eine erhebliche Reduktion des Personalaufwand dar. Weiterhin ist Belastung, welche durch Roboteraktoren übernommen wird und potenziell Pflegekräfte schont, in jedem Fall der Personalsituation zuträglich, da Krankheitsausfälle aufgrund von Überbelastungen angegangen werden.

Dieser Ansatz stellt hohe Anforderungen an alle potenziell beteiligten Systeme, wie Roboter, Fernsteuerung und Netzwerkinfrastruktur. In einem solchen System müssen die verschiedenen Subsysteme auf den Anwendungsfall Altenpflege zugeschnitten sein.

**Aufgabendefinition 1:** Es muss ein ferngesteuertes Telerobotersystem entwickelt werden, welches in einer hypothetischen Zwei-Pfleger-Situation am Pflegebett einen der Pfleger simuliert. Der Teleroboter muss direkt durch einen Operator steuerbar sein. Der fernsteuernde Operator muss aktiv, mit einer am Pflegebett arbeitenden Pflegekraft, Patiententransfers kollaborativ durch das Robotersystem durchführen.

## 3.2 Machbarkeit: Sensible und leistungsfähige Roboteraktorik

Zunächst muss geklärt werden, ob es möglich ist, geeignete Komponenten für den aktiven Teil des Gesamtsystems, die Roboteraktorik, zu finden. Hierbei müssen einige Anforderungen erfüllt werden: Durch den direkten Kontakt zwischen Patient, Pfleger und Roboter, bei der hohen Komplexität und Situationsabhängigkeit von Pflegehandlungen, ist ein direktes Fernsteuerungskonzept gegenüber Roboterautonomie zu bevorzugen. Deswegen benötigt der Roboter eine Schnittstelle, um seine Funktionen aus der Ferne zu kontrollieren. Des Weiteren muss das Robotersystem genügend Kräfte aufbringen, um ferngesteuert effektiv im Pflegeprozess mitzuarbeiten, was ein weiteres Argument für den Einsatz einer direkten Steuerung durch den Mensch darstellt. Da physische Entlastung mithilfe von Technik Aktorik einschließt, die potenzielle Verletzungsrisiken birgt, muss die Sicherheit der Menschen bei der Benutzung des Systems oberste Priorität haben. Das System darf unter keinen Umständen zur Gefahr für Patient oder Pfleger werden. Am Roboter wirkende und von ihm ausgehende Kräfte müssen daher überwacht werden. Diese Daten müssen den fernsteuernden Operator als Feedback mit möglichst geringer Latenz erreichen.

Ein Blick in andere Branchen offenbart die Existenz von Robotersystemen, welche zumindest einige dieser Anforderungen bereits im heutigen Arbeitsalltag erfüllen. Komplexe Aufgaben, bei denen Lasten getragen oder bewegt werden, oder bei denen repetitiv gearbeitet werden muss, sind in der Industrie vielseitigen Roboterarmen zugeteilt. Weiterhin arbeiten diese in der Industrie nicht ausschließlich in abgesperrten Bereichen, sondern sind durch technische Innovationen mittlerweile in der Lage, mit Menschen kollaborativ zusammenzuarbeiten [HAMA19].

Diese Roboterarme, die für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine infrage kommen, besitzen jene Eigenschaften, die auch für den Einsatz bei Patiententransfers in der Altenpflege von Bedeutung sind. Laut eines Literaturreviews über Mensch-Roboter-Interaktion bei industriellen Robotern von Hentout et al. verfügen die Roboter dieser Kategorie über sensible Kraftsensorik und können daher auf Kollisionen reagieren und externe Kräfte messen [HAMA19]. Des Weiteren sind sie, unter der Berücksichtigung von Hebelgesetzen, in der Lage, für Pflegetransfers relevante Kräfte aufzubauen. Die theoretische Kraft von Roboterarmen dieser Kategorie übersteigt die Herstellerangaben bei weitem [BB18]. Im Pflegealltag werden bisherige Geräte wie Patientenlifter mithilfe von Elektromotoren bewegt. Die Freiheitsgrade sind allerdings beschränkt und zumindest bei Hebehilfen wird auf einen isolierten Anwendungsfall abgezielt. Diese Einseitigkeit ist beim Einsatz vielseitiger, anthropomorpher Roboterarme nicht gegeben. Für den Anwendungsfall in der hier vorliegenden Arbeit scheinen diese aufgrund der Ähnlichkeit zu menschlichen Armen und den nötigen

Gelenken und Freiheitsgraden, um Bewegungen menschlicher Arme nachzuempfinden, besonders geeignet.

Die körperliche Belastung des Teleoperators ist aufgrund der Tatsache, dass er nur eine Steuerung bedienen würde, zu vernachlässigen. Für den Pfleger vor Ort, welcher üblicherweise den Pflegeprozess ohne weitere Hilfe meistert, kann mithilfe der leistungsstarken und sensiblen Robotertechnologie eine maßgebliche Entlastung erreicht werden, da kollaborativ im Pflegeprozess gearbeitet werden kann.

**Aufgabendefinition 2:** Die Roboteraktuatorik muss leistungsstark genug für den Pflegeprozess sein und über Kraftsensorik verfügen, um Kollisionen und Berührungen zu erkennen. Des Weiteren muss das Robotersystem eine ausreichende Reichweite und genügend Freiheitsgrade aufweisen, damit es die Aufgaben einer zweiten Pflegekraft am Bett übernehmen kann. Es muss daher ein anthropomorpher Aufbau gewählt werden.

### 3.3 Praxistauglichkeit: Einbettung in vorhandene Pflegeabläufe

Laut des Pflegewissenschaftlers Prof. Dr. Hülsken-Giesler muss bei technischer Gerätschaften für die Pflege „die Technikentwicklung an die Logik des praktischen Handelns anschließen“ [Hü10, S. 330]. Dies muss von Anfang an auch bei der Entwicklung des ferngesteuerten Robotersystems berücksichtigt werden, welches in der hier vorliegende Arbeit beschrieben wird.

Die Nutzung des System darf für den Pfleger am Pflegebett die zu entlastende Pflegehandlung nicht maßgeblich verkomplizieren. Dies bedeutet, dass ein Pfleger in den gewohnten Abläufen von der Entlastung des Systems profitieren soll, ohne dass eine Abwägung zwischen Aufwand und Nutzen nötig ist. Auch Schulungen für den, am Pflegebett befindlichen, Pfleger sollen möglichst kurz, im Optimalfall sogar unnötig, sein. Das Pflegepersonal sollte nicht stärker als ohne System zeitlich belastet werden. Dies scheint jedoch bei herkömmlichen technischen Geräten wie Liftern der Fall zu sein [Keh18, S. 62]. Die Altenpflege ist weiterhin an besondere ethische Verpflichtungen gebunden [Gie18, S. 28]. Die technische Lösung darf den persönlichen Kontakt zwischen Pfleger und Patient nicht einschränken oder diese Beziehung verschlechtern.

Wie in Abschnitt 3.1 bereits angedeutet, soll mit dem System eine Art Zwei-Pfleger-Situation erzeugt werden, ohne dass tatsächlich zwei Pfleger vor Ort sind. Hier kann eine Zusammenarbeit zwischen Pfleger und ferngesteuertem Roboter nicht dem Vergleich mit der Zusammenarbeit zweier Pfleger standhalten. Durch die Roboteraktuatorik und eine angemessene Fernsteuerung kann der zweite Pfleger am Pflegebett jedoch simuliert werden und trotzdem aktiv an der Pflegehandlung teilhaben. Im Idealfall ändert sich dadurch die Durchführung der Pflegehandlung gegenüber der Durchführung mit zwei Pflegern vor Ort kaum. Weil sich die natürlichen Bewegungen eines Menschen nicht vollständig auf die eines Roboters, der nicht eins-zu-eins dem steuernden Menschen entspricht, übertragen lassen, kann nicht davon ausgegangen werden, dass dieses Ideal in Gänze erreicht wird. Die Aktuatorik eines geeigneten Roboters verfügt jedoch über ein fest definiertes Kraftpotential, welches möglicherweise höher ist als bei einer Pflegekraft.

Mithilfe einer geeigneter Aktorik und einer Fernsteuerung, die intuitiv gestaltet ist, kann es jedoch möglich sein, dem Ziel, das ferngesteuerte Robotersystem nahtlos in den Pflegeprozess einzubinden, nahezukommen.

**Aufgabendefinition 3:** Bestehende Transferabläufe mit Beteiligung von zwei Pflegern sollen bei der Nutzung des Robotersystems möglichst unverändert bleiben. Der Einsatz des Roboters soll die Transfers möglichst nicht verkomplizieren.

## 3.4 Realisierung: Immersive Telerobotik und Telepräsenz

Ferngesteuerte Robotersysteme müssen dem Operator, dem Anwendungsfall entsprechend, ein ausreichend gutes Feedback bereitstellen. Gerade im Hinblick auf das Konzept eines Avatars, also das hineinschlüpfen in den Roboter, muss die Fernsteuerung möglichst nahe an der Realität sein und durch visuelle und haptische Rückkopplung ein Situationsbewusstsein erzeugen. Weiterhin muss eine möglichst geringe Latenz zwischen Operatoreingabe und Roboterausführung sowie Sensordatenakquise und Eintreffen der Daten beim Operator gegeben sein. Es sind daher zunächst grundlegende Überlegungen anzustellen, auf welche Technologien potenziell zurückgegriffen werden kann.

Bei der Fernsteuerung von Robotern wird seit jeher das Feedback durch Kamerasysteme genutzt (siehe z.B. [GMG<sup>+</sup>95]). Bei der Steuerung von Bildschirmen aus, gehen allerdings Informationen für den Operator verloren. Ohne die, für einen Menschen übliche, stereoskopische Sicht ist der Operator potenziell eingeschränkt. Es ist fraglich, ob, die Optik betreffend, so eine geeignete Rückkopplung für den Operator vorhanden ist, um ihm genügend Situationsbewusstsein zu vermitteln, um durch einen Roboter an einem kollaborativen Pflegeprozess teilzuhaben. Eine Möglichkeit dieses Manko zu eliminieren ist der Einsatz von Virtual-Reality (VR)-Technologie.

Mit VR ist in der hier vorliegenden Ausarbeitung eine Immersion in eine computergenerierte Umgebung durch visuelles Feedback gemeint. Durch zwei Bildschirme pro Auge in einem Head-Mounted-Device (HMD), einer sogenannten VR-Brille, wird dem Operator eine andere Realität angezeigt. Auch die Translations- und Rotationsdaten des Kopfes können von diesen Systemen verfolgt werden, sodass sich eine Immersion einstellt.

Mittlerweile ist diese Technologie in der Forschung und vielen industriellen Feldern angekommen (siehe Abschnitt 4.2). Dabei muss unterschieden werden zwischen rein computergenerierten Anwendungen (VR) einerseits, welche verbreitet sind [BV17] und andererseits auf Grundlage von Sensordaten generierten Umgebungen. Die natürliche stereoskopische Sicht eines Menschen harmoniert sowohl mit virtuellen dreidimensionalen Umgebungen als auch mit dreidimensionalen Sensordaten. Sie ermöglicht in beiden Fällen Größe und Abstand von Objekten besser, jedoch nicht perfekt [KCK<sup>+</sup>18], einzuschätzen. Bei der Auswahl der Sensoren müssen geeignete Geräte ausgewählt werden, durch die sich dreidimensionale Daten ableiten lassen. Diese können durch computergenerierten Szenen erweitert werden. In diesem Zusammenhang wird dann von Mixed-Reality (MR) gesprochen.

Diese Technologien können für den Einsatz bei der Robotersteuerung genutzt werden. Telemanipulation mithilfe intuitiver, immersiver Technologien wie zum Beispiel einem HMD verbessert die Performance des Operators [WRP<sup>+</sup>20] [OZM<sup>+</sup>20]. Zu weiterer Forschung über die Steuerung von Telerobotern mithilfe immersiver Technologie, siehe Abschnitt 4.2.

Zur Steuerung eines Roboters zählt neben dem visuellen Feedbacks und dem damit verbundenen Situationsbewusstsein auch die Art wie die Roboteraktuatorik bewegt wird. Neben General-Purpose-Eingabegeräten wie Joysticks, Tastatur und Maus können auch die natürlichen menschlichen Bewegungen auf den Roboter übertragen werden (siehe Abschnitt 4.3.2). Durch diese Bewegungen, in Kombination mit anthropomorphen Roboterarmen, kann eine intuitive Steuerung realisiert werden. Ein haptisches Feedback, beispielsweise sobald der Roboter mit einem Objekt kollidiert, ist eine weitere Art des Feedbacks, welches das rein visuelle erweitert. In Kombination mit den bereits genannten sensiblen Roboterarmen (siehe Abschnitt 3.2) kann so eine geeignete Rückkopplung erfolgen.

Schlussendlich sind alle Arten von Feedback von geringem Wert, sollten die Sensordaten den Operator zu spät erreichen. Gleiches gilt für die vom Operator ausgehenden Steuerungssignale des Roboters. Deswegen muss eine geeignete Netzwerkinfrastruktur ausgewählt werden, die es ermöglicht, latenzarm Feedback zum Operator und Steuerungssignale vom Operator zu übertragen. Auch bei potenziellen Verbindungsabbrüchen muss das Verhalten des Roboters am Pflegebett deterministisch sein und eine Gefährdung für Menschen ausgeschlossen sein.

Neben dem Ansatz das Robotersystem fernzusteuern, wäre eine Steuerung vor Ort ebenfalls eine Option. Dies eliminiert jedoch die Möglichkeit des Teleoperators, ohne selbst zu reisen nacheinander mehrere Roboter an unterschiedlichen Orten zu steuern. Dies könnte den Personalmangel in der Altenpflege zusätzlich verschärfen.

**Aufgabendefinition 4:** Die Fernsteuerung des Robotersystems soll über eine immersive VR-Technologie erfolgen. Das dreidimensionale visuelle Feedback soll über ein VR-Headset angezeigt werden. Für die Akquise dreidimensionaler Daten muss ein geeignetes Sensorsystem entwickelt werden. Die Steuerung des Robotersystems soll durch menschliche Bewegungen des Operators erfolgen. Die Latenz der Datenströme muss eine direkte Steuerung bei Pflege transfers zulassen.

### 3.5 Evaluation: Messbare Entlastung

Nur durch eine messbare Entlastung für den Pfleger, der üblicherweise allein am Pflegebett arbeitet, kann ein positiver Effekt der Roboterfernsteuerung festgestellt werden. Die Reduktion der körperlichen Belastung ist schließlich das Ziel des, in dieser Forschungsarbeit beschriebenen, ferngesteuerten Robotersystems. Die Belastungen müssen daher sowohl bei herkömmlichen Pflege transfers, als auch bei Pflege transfers mit Roboterbeteiligung gemessen werden. Im direkten Vergleich muss eine Entlastung sichtbar sein.

Für die Messung der Belastung muss auf Sensorik zurückgegriffen werden, die auf Grundlage der Literatur für die Quantifizierung dieser Belastung geeignet scheint. Jäger et al. nutzen für die

Messung der Lumbalbelastung bei Pflegern beim Pflgegetransfer am Pflegebett eine Kombination mehrerer Sensorsysteme [JJT<sup>+</sup>14]. Durch Infrarot- und Videokameras wird die Körperhaltung des Pflegers bestimmt, während die wirkenden Kräfte über Kraftmessinstrumente am Bett, Stuhl und im Boden gemessen werden [JJT<sup>+</sup>14]. Auch andere Arbeiten nutzen Bodenreaktionskräfte zur Messung von Belastung [SRDB14] [CHU<sup>+</sup>13]. Eine weitere Möglichkeit ist die Quantifizierung der Muskelaktivität. Ob und wie stark Muskeln beansprucht werden, kann durch den Einsatz von Oberflächenelektromyographie (SEMG) bestimmt werden. Hierfür werden ausgewählte Muskeln mit Elektroden beklebt und eine Spannung abgelesen, welche sich bei Muskelkontraktionen ändert. Auch hier lassen sich Beispiele finden in denen Belastungen durch den Einsatz von SEMG gemessen werden (z.B. [CP16] [AAB<sup>+</sup>13] [HBCM17]). Die Kombination aus SEMG und Bodenreaktionskräften scheint auch für die Belastungsmessung zur Evaluation des ferngesteuerten Robotersystems, welches in der hier vorliegenden Ausarbeitung beschrieben wird, angemessen zu sein.

Die Messung der Entlastung muss in Experimenten und Studien durchgeführt werden, welche Pflegekräfte als Probanden einbezieht und typische Pflgegetransfers abbildet. Hierfür müssen Studiendesigns erstellt und Experimente geplant werden. Vor Studiendurchführung mit Probandenteiligung müssen des Weiteren Ethikvoten für die Studiendesigns eingeholt werden.

**Aufgabendefinition 5:** Um die Relevanz und den Nutzen des angestrebten ferngesteuerten Robotersystems nachweisen zu können, muss die Belastung eines Pflegers, der allein einen Patiententransfer durchführt, mit der Belastung bei der Zusammenarbeit mit dem ferngesteuerten Robotersystem verglichen werden. Die Messung der Belastung ist mit Kraftsensorik und SEMG im Rahmen von Studien und Experimenten zu bestimmen und zu bewerten.





# Kapitel 4

## Stand der Technik

Dieses Kapitel dokumentiert den Stand der Technik und dient der Einordnung in die bestehenden Forschungsfelder. Des Weiteren werden Ansätze auf Gebieten vorgestellt, die relevant für die Entstehung des hier vorgestellten ferngesteuerten Robotersystems sind. Der Einstieg findet über Roboter in der Pflege statt (Abschnitt 4.1). Anschließend wird in Abschnitt 4.2 auf die, für die hier vorliegende Arbeit elementare, immersive Robotersteuerung und den Stand der Technik in diesem Bereich geblickt. Forschungen in relevanten Gebieten, welche die Subsysteme einer immersiven Roboterfernsteuerung für die Pflege betrifft, sind in Abschnitt 4.3 angeschnitten, bevor das Kapitel mit einer kritischen Auseinandersetzung des Stands der Technik schließt (Abschnitt 4.4).

### 4.1 Roboter in der Pflege

Durch Fortschritte in der Robotertechnologie in den letzten Jahren, werden zunehmend mehr Roboter oder roboterähnliche Systeme auch für den Gesundheitssektor erforscht und eingesetzt. Dabei können die Roboter aufgrund ihrer Merkmale, ihres Zwecks oder ihrer Fähigkeiten in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Diese Einteilung ist über unterschiedliche Forschungsarbeiten jedoch nicht konsistent. In dieser Ausarbeitung wird die Einteilung auf Grundlage des Berichts des Büros für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestags (TAB) mit dem Titel „Robotik und assistive Neurotechnologien in der Pflege - gesellschaftliche Herausforderungen“ vorgenommen. In dem Dokument erfolgt dies basierend auf den Anwendungszwecken wie folgt [Keh18, S. 54-55]:

- „Physische Assistenz bei alltäglichen Aufgaben“
- „Soziale und emotionale Dienstleistungen“
- „Mobilitätshilfen“

Diese Unterscheidungen ergeben sich aus den Modulen des Instruments *Neues Begutachtungsassessment* (NBA) für die Pflege, welches die Pflegebedürftigkeit anhand pflegerelevanter Lebensbereiche festlegt [Keh18, S. 54] [Med17, S. 4-5]. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird diese

Einteilung, unter Berücksichtigung der Lebensbereiche, größtenteils übernommen. Da die „physische Assistenz“ bei alltäglichen Aufgaben das erklärte Ziel des hier beschriebenen ferngesteuerten Robotersystems ist, wird am Ende dieses Abschnitts der Fokus auf diesen Aspekt gerichtet. Es soll daher im Folgenden zunächst auf Robotersysteme im Bereich der sozialen und emotionalen Dienstleistungen und auf Mobilitätshilfen eingegangen werden. Abschließend folgt die Betrachtung der Robotersysteme, die der physischen Assistenz zugeordnet werden.

#### 4.1.1 Soziale und Emotionale Dienstleistungen

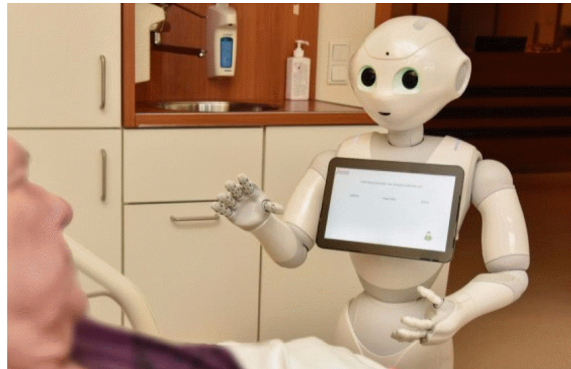
Robotersysteme, die laut TAB-Bericht der Kategorie „Soziale und emotionale Dienstleistungen“ zugeschrieben werden, sind laut des Instruments *Neues Begutachtungsassessment* (NBA) zur Feststellung des Pflegebedarfs auf die folgende Lebensbereiche anzuwenden [Keh18, S. 55]:

- „Kognitive und kommunikative Fähigkeiten“
- „Verhaltensweisen und psychische Problemlagen“
- „Gestaltung des Alltagslebens und sozialer Kontakte“

Es wird weiterhin unterschieden zwischen sozialassistiven Robotern, also jenen die als Interaktionsmedium fungieren und jenen die selbst Interaktionspartner sind [Keh18, S. 55]. Diese werden „sozialinteraktive Roboter“ genannt [Keh18, S. 55]. Teilweise verschwimmt diese Grenze jedoch, da die Roboter unterschiedliche Betriebsmodi aufweisen, die sie je nach Anwendungsfall zum Medium oder zum eigentlichen Partner der Interaktion machen.

Spezielle Therapieroboter wie die motorisierte Stofftierrobbe *Paro* [WSS<sup>+</sup>05] oder *JustoCat* [GSM15], in Form einer Katze, sind ausschließlich als Interaktionspartner gedacht, können aber nur im weitesten Sinne als Roboter in der Pflege verstanden werden. Ihre Funktionen beschränken sich auf einfache Sensorik wie zum Beispiel zur Erkennung, ob sie gestreichelt werden [Keh18, S. 65-67]. Die Aktorik beschränkt sich auf kleine Bewegungen, wie das Öffnen der Augen oder die Bewegung des Kopfes [Keh18, S. 65-67]. Geräte wie *Paro* haben den Zweck, zu beruhigen, positive Emotionen auszulösen und soziale Interaktionen anzuregen [Keh18, S. 65]. Der Einfluss und die Sinnhaftigkeit dieser Geräte wird in der Forschung kontrovers diskutiert [LNR<sup>+</sup>16] [PKA18] [HBH<sup>+</sup>20].

Eher der Robotik zugeordnet werden, können fahrende Tabletcomputer inklusive Sensorik und Aktorik zur Manipulation der Umwelt. Diese Roboter werden in Altersheimen, Pflegeheimen oder ähnlichen Einrichtungen für unterschiedliche Zwecke eingesetzt. Der Roboter *HOBBIT* ist in der Lage Notsituationen, wie Stürze zu erkennen, Objekte zu bringen und den Boden aufzuräumen [FEP<sup>+</sup>16]. Weiterhin kann er Unterhaltung bieten und mit Menschen interagieren. Dies wird durch ein Touch Display, Spracherkennung, Gestenerkennung und Sprachsynthese erreicht [FEP<sup>+</sup>16]. Auch als Interaktionsmedium kann der Roboter fungieren, da er Videotelefonieservices ermöglicht [FEP<sup>+</sup>16]. Hervorzuheben ist die Möglichkeit mit einem Greifer den Boden von Objekten zu befreien oder zuvor erlernte Objekte zu bringen, was eher der physischen Assistenz zuzuschreiben ist, die später erläutert wird [FEP<sup>+</sup>16].



**Abbildung 4.1:** Der Roboter *Pepper* beim Einsatz im Krankenhaus [vBN<sup>+</sup>19] © 2019 IEEE.

Der Kategorie der sozialen Roboter können weitere zugeordnet werden, die wie *HOBBIT* allesamt keine kommerziellen Systeme, sondern eher Forschungsplattformen darstellen. Dazu zählt *Care-O-Bot*, eine vom Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung entwickelte Forschungsplattform, die ebenfalls Notfälle, wie Stürze, erkennen und kleinere Objekte tragen kann [GRH<sup>+</sup>09]. Weitere Vertreter dieser Gruppe sind *Mario* [KCR<sup>+</sup>17] und *Hector* [SMV<sup>+</sup>13]. Viele weitere, im Forschungsstadium befindliche, Systeme dieser Art lassen sich finden, die sich nur leicht anhand ihrer Funktionalitäten und Anwendungszwecke unterscheiden, grundsätzlich aber ähnliche Prinzipien verfolgen, wobei auch die Navigation in häuslichen Umgebungen ein Forschungsfeld darstellt [Isk14]. Übersichten liefern beispielsweise Martinez et al. [MMd18] oder Hosseini et al. [HG17].

Bei kommerziellen Systemen, also jenen, die wirklich Marktreife erreicht haben, sind neben den bereits vorgestellten Systemen wie *Paro* und *JustoCat* auch die Roboter von Softbank Robotics [Sof21] zu nennen. Der Roboter *Pepper* ist ein prominentes Beispiel eines Interaktionsroboters dieses Unternehmens. Er kann mit Menschen durch Sprache und Gesten interagieren, Informationen auf einem integrierten Tabletcomputer anzeigen und somit unter anderem für Unterhaltung sorgen. Im Krankenhaus (siehe Abbildung 4.1) wird die Einbindung dieses Roboters ausprobiert [vBN<sup>+</sup>19]. Auch im Pflegekontext wird sein Einsatz erprobt. Es wird untersucht, wie offen und aufgeschlossen Pflegeheimbewohner und Pflegekräfte dieser Art neuer Technologie sind [Spr18, S. 49]. Der ähnlich aussehende Roboter *Nao* des selbigen Herstellers wird in verschiedenen Forschungsprojekten eingesetzt und leitet körperliche oder geistige Betätigung an [PPTD20] [ASMN20]. Dabei kann *Nao* Parameter wie beispielsweise Blutdruck überwachen und gegebenenfalls das Pflegepersonal informieren [VCR<sup>+</sup>13]. Literaturreviews zum Thema der sozialen Roboter liegen von Abdi et al. [AAH<sup>+</sup>18] und Papadopoulos et al. [PKA18] aus dem Jahr 2018 vor. Pu et al. kommen in einem Review aus dem Jahr 2019 zu dem Schluss, dass positive Effekte dieser Roboter für ältere Erwachsene erwartbar sind, obwohl es nach der Analyse der Autoren für den Beleg dieser keine statistische Signifikanz gibt [PMJT19].

### 4.1.2 Mobilitätshilfen

Um auch mit typischen Erkrankungen, die den Bewegungsapparat betreffen, im Alter mobil zu bleiben, werden üblicherweise Gehhilfen wie Rollatoren oder Rollstühle eingesetzt. Es geht in diesem Bereich daher um Roboter oder technische Geräte, die direkt vom Patienten genutzt werden. Diese Geräte können durch Sensorik und Aktorik erweitert werden, um dem Menschen, der diese Geräte nutzt, mehr Selbstständigkeit im Alltag ermöglichen. Teilweise können durch diese auch Fähigkeiten zurückerlangt werden, die verloren schienen. Die Lebensbereiche beschränken sich auf die folgenden NBA-Module [Keh18, S. 54-55].

- „Mobilität“
- „Außerhäusliche Aktivitäten“

Im BMBF-Forschungsprojekt MAID (Mobilitätsassistent zur Unterstützung bewegungseingeschränkter Personen) wurde im Zeitraum von 2012 bis 2015 die Entwicklung eines rollatorähnlichen System gefördert, welches mit Umfeldsensorik Gefahren erkennen, mittels Vital-sensorik an den Griffen Vitalparameter erfassen und durch Aktorik Unterstützung für den Nutzer bereitstellen soll [MAI18] [Keh18, S. 71]. Auch der *c-walker* ist ein weiterentwickelter Rollator, der es Menschen mit physischen und geistigen Einschränkungen ermöglicht, sich in öffentlichen Räumen zu bewegen, wobei sein Fokus aufgrund fehlender Aktorik auf der Navigation liegt [RMP<sup>+</sup>16]. Diese Rollatoren sind bereits marktreif und außerhalb der Forschung erhältlich. Der elektrische Rollator *ello* zieht laut Produktwerbung mit einem Hinterradantrieb bergauf und bremst bergab, wobei sich die Geschwindigkeit intuitiv einstellen lassen soll [emo21]. Durch diese Funktionen soll das Gerät den Alltag für Menschen, welche auf die Nutzung eines Rollators angewiesen sind, erleichtern [VDI19]. In der Literatur lassen sich weitere Beispiele finden, die sich in ihren Funktionalitäten meist ähneln.

Elektrische Rollstühle sind hingegen weitestgehend etabliert. Hier wird daher an Steuerungskonzepten und Autonomiefunktionen geforscht. Dies erfordert unter Umständen eine Neuentwicklung des Rollstuhl Systems oder zumindest Anpassungen. Beim Roboterrollstuhl *SENA* von Galindo et al. (siehe Abbildung 4.2) wird ein kommerzieller Rollstuhl mit Sensorik und Aktorik ausgestattet, welche über einen Laptop genutzt werden kann [GGF06]. In diesem Kontext ist auch der Roboterrollstuhl *EDAN* des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) zu nennen. *EDAN* ermöglicht durch das Auslesen von schwachen EMG-Signalen einen, am Rollstuhl befindlichen, Roboterarm zu kontrollieren [VHI<sup>+</sup>20]. Dieses System lässt sich jedoch nicht streng nach den initial vorgestellten Kategorien des TAB-Berichts [Keh18, S. 55] klassifizieren, da es sowohl eine Mobilitätshilfe ist, als auch der physischen Assistenz dient. Bei der reinen Betrachtung der Roboterrollstühle als Mobilitätshilfe scheinen sich die Forschungsarbeiten entweder auf die Steuerungskonzepte oder eine intelligente Navigation zu fokussieren. Die Weiterentwicklung eines Brain-Computer-Interfaces zur Rollstuhlnavigation wird von Xiaoyan Deng et al. gezeigt [DYL<sup>+</sup>20]. Weitere verwandte Arbeiten lassen sich finden, bei denen das Steuerungskonzept für Menschen, die mit der typischen Steuerung nicht arbeiten können, im Vordergrund steht [KOKS17]



**Abbildung 4.2:** Der Roboterrollstuhl *sena*. Ein kommerzieller Rollstuhl ist mit Sensorik und Aktorik ausgestattet, welche über einen Microcontroller mit einem Laptop kommunizieren [GGF06] © 2006 IEEE.

[KMLB18]. Fernandez et al. stellen einen Review über mit Brain-Computer-Interface gesteuerte Rollstühle vor [FRV<sup>+</sup>16]. Für Elektromyografie- und Elektrokulografiesteuerung liegt ein Review von Kaur vor [Kau20]. Bei der Navigation zeigen Bin Hua et al. wie sie Sensordaten nutzen, um neuronale Netzwerke trainieren, sodass ein selbstfahrender Roboterrollstuhl menschenähnliche Navigation an den Tag legt [HHC<sup>+</sup>17]. Die Navigation betreffend, wird die sogenannte Intelligenz [LL13] [BAK<sup>+</sup>13] oder Autonomie [MKS<sup>+</sup>13] des Systems angestrebt. Dabei spielt auch die Teilautonomie und die Interaktion eines Menschen mit dem Robotersystem eine Rolle [LZD<sup>+</sup>17]. Ein weiteres Feld der Rollstuhlentwicklung betrifft die physische Benutzbarkeit der Geräte. Bei Menschen mit Rückenmarksverletzungen, welche aufgrund ihrer Einschränkungen handelsübliche Rollstühle nicht nutzen können, kann *Wheelchair Robot for Active Postural Support* von Ophaswongse et al. aktiv bei der Nutzung des Rollstuhls helfen, indem das Gewicht des Torsos gehalten wird [OMS<sup>+</sup>19].

Neben der bisherigen Einteilung zwischen Gehhilfen und Rollstühlen nimmt der TAB-Bericht [Keh18] auch Exoskelette mit auf. Inwieweit sich jedoch diese Geräte für den Patienten eignen, ist fragwürdig und wird auch von den Autoren des Berichts diskutiert [Keh18, S. 76]. Dennoch sind einige Beispiele in diesem Zusammenhang zu nennen, welche sich auf die Mobilität von Patienten spezialisieren. Dazu zählt beispielsweise die Unterstützung der Rehabilitation nach einem Schlaganfall [VJM<sup>+</sup>19] [ZSZ<sup>+</sup>17]. Bei Menschen mit Multipler Sklerose können sie ebenfalls angewendet werden [AKN<sup>+</sup>19] oder allgemein zur Prävention dienen [XKP<sup>+</sup>20]. Sharma et al. stellen einen Review über Exoskelette im biomedizinischen Bereich vor [SSP<sup>+</sup>18]. Tabti et al. [TKA<sup>+</sup>19] befassen sich in ihrem Review mit der Steuerungshard- und software und der Sensorik medizinischer Exoskelette für die unteren Gliedmaßen. Die Exoskelette sind ebenfalls für den Pfleger als Nutzer vor dem Hintergrund ihrer potenziell leistungsfähigen Aktorik interessant. Sie sind deswegen im nächsten Abschnitt anzusiedeln.

### 4.1.3 Physische Assistenz

Bei diesem Anwendungsfeld für Roboter muss differenziert werden, wer die Fähigkeiten und Möglichkeiten des Roboters nutzt. Die Anforderungen entscheiden sich maßgeblich vor dem Hintergrund, wer der spätere Anwender ist. Dieser Aspekt wird im TAB-Bericht für diese Roboter erwähnt und ihre Art wird auf die folgenden NBA-Module beschränkt [Keh18, S. 54-55].

- „Selbstversorgung“
- „Bewältigung und selbstständiger Umgang mit krankheits- oder therapiebedingten Anforderungen und Belastungen“
- „Gestaltung des Alltagslebens und sozialer Kontakte“
- „Haushaltsführung“

Es wird im Bericht zwischen häuslichem und stationären Einsatz und damit stellvertretend für den Patienten als Nutzer und dem Pfleger als Nutzer unterteilt. Dass diese Unterteilung zu viele Ausnahmen erzwingt, wird in den folgenden Unterabschnitten deutlich, in denen die Unterscheidung zwischen Patient und Pfleger als Anwender vorgenommen wird.

#### Physische Assistenz für Patienten

Für einen eingeschränkten Menschen ist ein Robotersystem, welches die Herausforderungen des Alltags erleichtern kann, wünschenswert und hilfreich. Die oben angesprochenen NBA-Module für die physische Assistenz im Alltag sind bis auf die „Bewältigung und [dem] selbstständige[n] Umgang mit krankheits- oder therapiebedingten Anforderungen und Belastungen“ [Keh18, S. 54] uneingeschränkt relevant. Dieser Punkt mag in speziellen Fällen auch für einen Patienten von Bedeutung sein, scheint aber aufgrund der implizit vorausgesetzten Kompetenz bei Therapien oder Krankheiten bei professionellem Personal eher besser aufgehoben zu sein. Demnach muss sich ein Robotersystem für physische Assistenz vor allem auf Funktionalitäten wie Füttern, Anreichen, Bringen oder ähnliches spezialisieren.

Menschen, die selbst nicht in der Lage sind, Nahrung oral aufzunehmen, sind auf Pfleger oder auf entsprechende Geräte angewiesen. Sowohl in der Forschung als auch kommerziell sind entsprechende Roboter oder Geräte vorhanden. So beschreiben Thinh et al. beispielsweise ein System um Parkinsonpatienten zu füttern [TTT17]. Das Gerät, welches auf einem Tisch steht und durch einfache Tasten ferngesteuert wird, verfügt über einen Manipulator, der einen Löffel hält, der die Nahrung aus Schalen entnimmt und dem Patienten vor den Mund führt [TTT17]. Einen komplexeren Ansatz verfolgen Perera et al. mit einem ähnlichen Robotersystem, wobei die Kontrolle über ein Elektroenzephalograf realisiert ist [PLK17]. Hierbei wird optisch die Mundposition und dessen Öffnung erkannt und somit der Inhalt und die Positionierung des Löffels auf den Nutzerwunsch anpasst [PLK17]. Kommerzielle Produkte, welche ähnliche Ansätze verfolgen, sind beispielsweise *Meal Time Partner* [Mea19] oder *mySpoon* [SEC21]. Eine Übersicht über Roboter zur Assistenz

bei der Nahrungsaufnahme aus dem Jahr 2015 liefern Naotunna et al., in der sie unter anderem Fütterungstechnologien und Steuerungsmethoden untersuchen [NPS<sup>+</sup>15]. Diese Geräte sind entgegen der Einteilung des TAB-Berichts sowohl im häuslichen als auch im stationären Umfeld denkbar.

Auch das Anreichen von, oder die Interaktion mit, Gegenständen stellt eine Art der physischen Assistenz dar. Einige der genannten Roboter im Abschnitt 4.1.1 können auch Gegenstände wegräumen [FEP<sup>+</sup>16] [GRH<sup>+</sup>09] und sind damit auch zur physischen Assistenz geeignet. Die Art, mit der die Roboter mit ihrer Umwelt physisch interagieren, ist oft ähnlich. Meistens werden Roboterarme eingesetzt, sofern sie den Zweck haben Gegenstände zu greifen, anzureichen oder aufzuheben. Dass dieser Robotertyp vielversprechend ist, wird beispielsweise von Maheu et al. anhand einer Studie gezeigt, in der die Studienteilnehmer mit einem Joystick den Roboterarm *JACO* (siehe Abbildung 4.3) steuern müssen, um unter anderem alltägliche Objekte zu greifen [MAFR11]. Die Studie zielt darauf ab den Roboterarm für Rollstuhlfahrer mit Einschränkungen in den oberen Extremitäten zu evaluieren [MAFR11]. Die bereits vorgestellte Mobilitätshilfe *Edan* verfügt ebenfalls über einen Roboterarm, der es ermöglicht herkömmliche Türen zu öffnen [VHI<sup>+</sup>20]. Im BMBF-Forschungsprojekt *ROBINA* wird an einem armbasierten Anreichroboter geforscht, der Menschen, die an amyotropher Lateralsklerose (ALS) leiden, ein Stück Selbstständigkeit zurückgegeben. Durch Hand-, Zungen-, Kiefer-, Kopf- oder Augensteuerung können Alltagsgegenstände und Getränke angereicht werden [BMB20]. Der mobile Roboter *Lio*, welcher von Mišeikis et al. vorgestellt wird, ist für den Einsatz im Pflegekontext konzipiert und soll den Patienten als auch den Pflegern in Einrichtungen des Gesundheitswesens täglich zur Seite stehen und mit einem Roboterarm unter anderem Türen öffnen oder Objekte greifen [MCD<sup>+</sup>20]. Einen ähnlichen Roboter, bestehend aus einer mobilen Plattform, auf der ein Roboterarm montiert ist, evaluieren Fattal et al. für Menschen die an Tetraplegie leiden [FLL<sup>+</sup>19]. Die genannten Forschungsarbeiten unterscheiden sich in ihren Anwendungsfällen, weisen in ihrem Aufbau jedoch Ähnlichkeiten auf. Weitere verwandte Ansätze sind in der Literatur zu finden. In einem Review aus dem Jahr 2017 grenzen Bilyea et al. aus 3475 Datenbankeinträgen zum Thema robotischer Assistenzsysteme 15 Studien ein, bei denen die Roboter die Bewältigung der Aktivitäten des täglichen Lebens fokussieren und bereits klinische Tests durchlaufen haben [BSNA17]. Hierzu zählen laut der Autoren unter anderem die bereits genannten Systeme wie *JACO* [MAFR11] oder *HOBBIT* [FEP<sup>+</sup>16] [BSNA17]. Der Einsatz von Roboterarmen für die feinmotorischen Aufgaben scheint weit verbreitet.



**Abbildung 4.3:** Der *Jaco* Roboterarm. Innerhalb einer Studie von Maheu et al., die der Evaluation zum Einsatz bei Rollstuhlfahrern dient, wird der Roboterarm gesteuert, um alltägliche Gegenstände zu greifen [MAFR11] © 2011 IEEE.

### Physische Assistenz für Pfleger

Aufgrund der Belastungssituation des Pflegepersonals (siehe Kapitel 2) liegt die Überlegung nahe, Roboter aufgrund ihrer Vielseitigkeit und potenziell entlastenden Eigenschaften für die Pfleger einzusetzen. Dabei ist zunächst zu unterscheiden, ob die Roboter für logistische Aufgaben oder die Reduktion der körperlichen Belastung genutzt werden sollen.

Bei der Logistik stehen die Reduktion der Laufwege und somit eine Effektivitätssteigerung des Pflegepersonals im Vordergrund. Diese Idee wurde in Krankenhäusern durch das *HelpMate* Projekt 1992 in Form eines mobilen Krankenhausroboters realisiert, welcher Pharmazeutika und Patientenakten in der Einrichtung transportierte [EKB<sup>+</sup>92]. An ähnlichen Systemen, die mobilen Schränken nahekommen, wird heutzutage von Forschern [STT17] und Unternehmen [Pan15] gearbeitet. Diese werden teilweise bereits kommerziell vertrieben [Mob15] [JBT21]. Diese fahrerlosen Transportsysteme sind auf die Situationen in Krankenhäusern zugeschnitten. Für den Einsatz in stationären Altenpflegeeinrichtungen existieren ebenfalls Ansätze. Die Belastung wird dort beispielsweise indirekt durch Roboter angegangen, welche die Bewohner mit Snacks und Getränken versorgen. Im BMBF-Forschungsprojekt *SeRoDi* werden mit Fokus auf diesen Anwendungsfall Roboter entwickelt, um den Pflegern diese Art von Arbeit abzunehmen [BJG18]. Im gleichen Projekt ist auch ein intelligenter Pflegewagen entstanden, der es zur Aufgabe hat, Pflegeutensilien automatisch anzuliefern, deren Verbrauch zu dokumentieren und diese nachzufüllen, was eine Entlastung der Pfleger darstellt [GKR<sup>+</sup>18]. Die nicht direkt den Pflegehandlungen zuzurechnenden Arbeitsabläufe, wie das Befüllen eines herkömmlichen Pflegewagens, sind für die, im *SeRoDi* Projekt teilnehmenden, stationären Einrichtungen durch den Roboter optimierbar [GS20, S. 197-198]. Auch wenn diese Art der physischen Assistenz für Pfleger relevant ist und die Arbeitsbelastung reduziert, muss



darüber hinaus eine Reduktion von körperlichen Überbelastungen (siehe Abschnitt 2.3) erreicht werden.

Um wirklich die physische Belastung von Pflegekräften zu minimieren, bedarf es leistungsstarker und komplexer Robotik. Als körpernahe Systeme sind dabei Exoskelette für Pfleger zu nennen, die, anders als jene für die Patienten im vorherigen Abschnitt, zur Entlastung dienen. Durch diese Augmentierung von Pflegepersonal, zum Beispiel durch Exoskelette von Cyberdyne [Cyb21] oder Innophys [Inn18], können schwere Lasten im Pflegealltag leichter bewegt werden. Der Bedarf, mögliche Einsatzszenarien und Limitierungen für Exoskelette werden bei an Operationen beteiligtem Personal von Cha et al. untersucht [CMS<sup>+</sup>20]. Die Autoren halten fest, dass Angestellte von diesen Geräten profitieren können, die längere Zeit in einer bestimmten Position stehen müssen, um beispielsweise Instrumente zu halten [CMS<sup>+</sup>20]. Viele dieser Exoskelettsysteme sind bereits kommerziell verfügbar und können, je nach Typ, verschiedene Muskelgruppen unterstützen. Die Nutzerakzeptanz in der Altenpflege ist ebenfalls forschungsrelevant und beispielsweise bei den Systemen *Smart Suit* und *Rakunie* von Hein et al. untersucht [HPL16].

Ausgelagerte, nicht am Körper getragene Systeme, welche die Arbeit des Pflegepersonals erleichtern sollen, sind ebenfalls Gegenstand der Forschungen. Das Gerät *Smart Hoist* (siehe Abbildung 4.4) von Ranasighe et al. ist ein umfunktionierter handelsüblicher mobiler Patientenlifter, der in einer Art Krankonstruktion Patienten in einem Tuch transferiert [RDT<sup>+</sup>14]. Durch das nachträgliche Einbauen von Sensorik, Aktorik und einem Userinterface für den bedienenden Pfleger fällt das Schieben des Geräts weg und das Manövrieren leichter [RDT<sup>+</sup>14].



**Abbildung 4.4:** Das Gerät *Smart Hoist*, mit dem Patiententransfers für Pfleger erleichtert werden sollen. Der umfunktionierte Patientenlifter ist mit mehreren Sensoren und Aktoren ausgestattet. Die Griffe ermöglichen eine Steuerung des Geräts über Dehnungsmessstreifen (Front RGB-D Camera: Vordere Farb- und Tiefenbildkamera, Sling: Trage, Reverse Camera: Rückwärtskamera, Strain Gauges: Dehnungsmessstreifen, Tablet (UI): Tablet (Nutzerinterface), Batteries: Batterien, eStop: Notaus, Powered Wheels: Angetriebene Räder) [RDT<sup>+</sup>14] © 2014 IEEE.

Der mobile Roboter *Robohelper SASUKE* kann an einem Bett pflegebedürftige Menschen mit einer Trägerkonstruktion, bestehend aus einer Hängemattenkonstruktion zwischen zwei Auslegern, anheben [KW17, S. 469]. Das ganze Robotersystem, inklusive Patient, kann von einer Pflegekraft bewegt werden und ermöglicht auch den Transfer in einen Rollstuhl [KW17, S. 469]. Ein ähnliches System beschreibt das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) mit dem Evelon Projekt, bei dem ein mobiler Roboter ebenfalls einen Menschen tragen und halten kann [Fra21b]. Ein Gerät mit gleichem Anwendungsfall aber anderem Aufbau stellt der Roboter *RIBA* (siehe Abbildung 4.5) dar, der Patienten mit seinen beiden Roboterarmen transferieren kann und von Mukai et al. vorgestellt [MHN<sup>+</sup>10] und Ding et al. weiterentwickelt [DIM<sup>+</sup>12] wird. Er ist in der Lage, Patienten mit einem getesteten Gewicht von bis zu 63 kg zu tragen, wobei er selbst 180 kg wiegt [DIM<sup>+</sup>12]. Das von Panasonic entwickelte Bett *Resyone* ist eine Art Pflegebett, welches sich in einen elektrischen Rollstuhl transformiert und es so den Transfer für den Pfleger erleichtert [KW17, S. 467-468]. Dies soll weiterhin ermöglichen, dass der Patient die Entscheidung, wann er das Bett verlassen möchte, eigenständig trifft [KW17, S. 468]. Ein Roboter, der einer Aufstehhilfe ähnelt, ist das System *HUG* von Fuji Machine [KW17, S. 469]. Der Patient lehnt sich in seiner Ausgangsposition mit der Brust an den Roboter an, welcher den Patienten dann mit zwei unbeweglichen Armen fixiert und in den Stand bringt [KW17, S. 469]. Da die Füße des Patienten ebenfalls auf dem Roboter ruhen, kann das ganze System samt Patient nun vom Pfleger an einen anderen Ort gefahren werden [KW17, S. 469]. Hier wird, ähnlich wie beim *Robohelper SASUKE* eine Konstruktion aus Gurten und Roboteraktuatorik genutzt, um Menschen zu transferieren.

All diese hier vorgestellten Roboter haben gemeinsam, dass sie in erster Linie der körperlichen Entlastung der Pfleger dienen. Dies geschieht entweder unmittelbar am Pfleger selbst (Exoskelette) oder aber indem der Pfleger bei schweren, körperlichen Aufgaben unterstützt und entlastet wird (Aufstehhilfen, Betten etc.). Es lässt sich rückblickend festhalten, dass Roboter, mit dem Ziel Entlastung für den Pfleger zu erreichen, in breit gefächerten Bereichen in der Forschung Relevanz inne haben. Die Technik ist teilweise bereits bis zur Marktreife entwickelt und findet Anwendung. Im direkten Vergleich mit Robotern für soziale und emotionale Zwecke (siehe Abschnitt 4.1.1), finden sich für Roboter zur physischen Assistenz zur Entlastung von Pflegern jedoch weniger Beispiele. Die vorgestellten, für die Entlastung der Pflegekräfte entwickelten, Robotersysteme sind oftmals Großgeräte und im Handling als schwerfällig und langsam einzuschätzen. Aktuellere Roboteransätze zur körperlichen Entlastung, wie sie beispielsweise in anderen Branchen mithilfe von kollaborativen Roboterarmen zum Einsatz kommen (siehe Abschnitt 5.2), sind nicht vertreten. Diese Umstände legen nahe, dass Eigenentwicklungen unter Berücksichtigung innovativer Technologien nötig sind, um effektive Geräte zur körperlichen Entlastung bei Pflegehandlungen anbieten zu können.



**Abbildung 4.5:** Der Roboter *RIBA* trägt einen Menschen in seinen Armen [MHN<sup>+</sup>10] © 2010 IEEE.

## 4.2 Immersive Roboterfernsteuerung

In diesem Abschnitt werden Arbeiten vorgestellt, die eine Art immersive Roboterfernsteuerung oder zumindest eine immersive Telemanipulation als Forschungsschwerpunkt haben. Es handelt sich hierbei nicht um Robotersysteme, die speziell für die Pflege entwickelt wurden, sondern um Roboter aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen und Forschungsgebieten, die repräsentativ für immersive Roboterfernsteuerung sind. Dabei liegt der Fokus auf Systeme, die mit Virtual-Reality (VR) Systemen gesteuert werden, wobei auch Augmented-Reality (AR) und Mixed-Reality (MR) betrachtet werden. Von dieser Art der Robotersteuerung sind sowohl Forschungsarbeiten als auch kommerzielle Beispiele zu finden. Neben der Nutzung virtueller Szenen bei der Kontrolle, kann auch auf Sensordaten zurückgegriffen werden, die Tiefeninformationen enthalten. Eine Abgrenzung kann dabei zwischen mobilen Robotersystemen, einschließlich unbemannten ferngesteuerten Land-, Luft- oder Wasserfahrzeugen (siehe Abschnitt 4.2.1), und Systemen gezogen werden, deren Hauptaufgabe es ist, die Umwelt durch Manipulatoren zu verändern (siehe Abschnitt 4.2.2). Letztere können ebenfalls mobil sein, wobei jedoch ihre Fähigkeiten durch robotische Aktoren mit der Umgebung zu interagieren im Vordergrund stehen. Zuletzt werden in Abschnitt 4.2.3 Arbeiten einer weiteren Klasse von immersiv ferngesteuerten Robotern vorgestellt, durch deren Nutzung direkt mit Menschen kollaborativ gearbeitet werden kann.

### 4.2.1 Fahrzeugfernsteuerungen

Unbemannte ferngesteuerte Land-, Luft- oder Wasserfahrzeuge können an gefährlichen oder unzugänglichen Orten eingesetzt werden, in denen die Steuerung der Systeme durch einen Menschen

erwünscht ist. Dabei ist Effektivität des Einsatzes von der Qualität der Kommunikation, der Robustheit der Robotersteuerung und der Erfahrung des Operators abhängig [OZM<sup>+</sup>20]. Deswegen widmen sich einige Forschungsarbeiten diesen Aspekten mit dem Ziel die Fernsteuerung zu verbessern.

Martins et al. beschreiben, dass das Retten und Suchen von Menschen durch Robotersysteme durch den Einsatz von VR-Technologien, wie beispielsweise HMDs erleichtert wird, da diese Steuerungsart einfacher zu bedienen und weniger fehleranfällig als herkömmliche Steuerungssysteme ist [MV09]. In dem Versuch wird ein Stereokamerasystem zusammen mit einem HMD-Gerät mit Kopf-Tracking in einer simulierten Search-And-Rescue-Operation getestet, wobei ein Landroboter zum Einsatz kommt [MV09].

Bei der Steuerung eines unbemannten Kartografieroboters auf Rädern, wählen Krückel et al. den Ansatz, eine spherische Kamera mit einem HMD-Gerät zu kombinieren, um somit eine intuitive Steuerung zu realisieren [KNFS15]. Aufgrund des Datenaufkommens und der Netzwerkinfrastruktur, erreichen die Autoren eine Latenz von 0,7 s und eine Bildwiederholrate von 5,3 Bildern pro Sekunde für das visuelle Feedback [KNFS15].

Selbst bei der Steuerung von Straßenfahrzeugen können handelsübliche Komponenten eine immersive Telepräsenz realisieren, was Shen et al. zeigen [SCP<sup>+</sup>16]. Durch HMD und eine aktuierte stereoskopische Kamera können über WLAN, 3G und 4G Netzwerke ferngesteuerte Fahrmanöver realisiert werden [SCP<sup>+</sup>16]. In Latenzmessungen geben die Autoren im Durchschnitt bei der Nutzung von 4G für die Übertragung des Kamerabildes 183,9 ms, bei der Fahrzeugkontrolle 110,3 ms und bei der Steuerung der Kameraneigung 107,2 ms an [SCP<sup>+</sup>16]. Bei den Maximalwerten tauchen, je nach Netzwerk, allerdings auch Werte über 500 ms auf.

Eine mobile Roboterplattform, ausgestattet mit einem Roboterarm, welcher eine Tiefenbildkamera hält, stellen Stotko et al. vor [SKS<sup>+</sup>19]. Die Immersion erfolgt hier durch das Zusammenspiel von Tiefenbilddaten aus der Kamera in Kombination mit einem HMD-Gerät, was bei der Steuerung des Geräts im Gegensatz zu herkömmlichen Kamerabildern laut den Autoren Vorteile bietet [SKS<sup>+</sup>19]. Der Roboterarm wird anscheinend ausschließlich für das Halten der Kamera verwendet.

Chen et al. erforschen den Einsatz von immersiver Telemanipulation in Echtzeit für die Roboter in der Landwirtschaft und zeigen die Herausforderungen, welche sich im Freien im Gegensatz zu Anwendungen in Räumen ergeben [CZZW20]. In der Arbeit wird nur die theoretische Machbarkeit untersucht, ohne dass ein Roboter zum Einsatz kommt.

Einen breiteren Einblick verschaffen Opiyo et al. in einem Review, in dem die Architekturen und die Strategien des Situationsbewusstseins bei der Teleoperation mobiler Landroboter untersucht werden [OZM<sup>+</sup>20]. Die im Review ausgewählten Forschungsarbeiten zur Verbesserung des Situationsbewusstseins und der Reduktion der kognitiven Belastungen für den Operator nutzen überwiegend Kamerasysteme, welche Tiefenbilddaten liefern, wie zum Beispiel stereoskopische Kameras oder Technologien wie Light Detection and Ranging (LiDaR). Ähnliche Ansätze lassen sich auch bei Wasserfahrzeugen finden.

Unter der Wasseroberfläche kann der Einsatz immersiver Technologien bisherige Steuerungsparadigmen ablösen. Dies zeigen García et al., indem sie die traditionelle Steuerung eines unbe-

mannten Unterwasserfahrzeugen in einer Simulationsumgebung durch VR-Technologien ablösen [GPA<sup>+</sup>17].

Unbemannte Luftfahrzeuge können laut eines Artikels von Aleotti et al. in Kombination mit einem visuell-haptischen AR-Interface eingesetzt werden, um ferngesteuert aus der Luft Strahlungsquellen zu orten [AMC<sup>+</sup>17]. Der Einsatz der Steuerungstechnologie erhöht laut den Autoren das Situationsbewusstsein und reduziert die mentale Belastung für den Operator [AMC<sup>+</sup>17].

Allgemein zielen neben den genannten Arbeiten viele weitere auf die Verbesserung der Nutzung, beziehungsweise Fernsteuerung unbemannter Fahrzeuge ab, wobei oft ähnliche Systeme, wie HMDs (siehe z.B. [SKS<sup>+</sup>19] [GPA<sup>+</sup>17]), zum Einsatz kommen, um die Fernsteuerung zu erleichtern. Die Fernsteuerung unbemannter Fahrzeuge durch immersive Technologien ist, aufgrund der Vielseitigkeit der Anwendungsbereiche, offenbar ein gut ausgeleuchtetes Forschungsfeld, in dem diese Form von Steuerung angebracht scheint.

### 4.2.2 Telemanipulation und Telepräsenz

Hier soll es um Ansätze gehen, bei denen nicht die Mobilität des Geräts im Vordergrund steht, sondern dessen Möglichkeiten durch ferngesteuerte Manipulatoren mit der Umwelt zu interagieren und dem Operator ein Gefühl von Telepräsenz zu vermitteln. Diese Art von Präsenz kann entstehen, wenn dem Nutzer eines Systems durch verschiedene Stimuli das Gefühl gegeben wird, sich an einem anderen Ort zu befinden. Deswegen liegt der Fokus erneut auf den Geräten, welche durch visuelle, auditive oder haptische Interfaces eine Art Immersion ermöglichen. Teleoperation erfordert nicht zwingend Telepräsenz, wird durch diese jedoch erweitert. Systeme, die Telepräsenz vorweisen ohne Telemanipulation zu ermöglichen sind nicht Teil der Untersuchung. Damit sind beispielsweise fahrende Kommunikationsroboter gemeint, die Videoanrufe ermöglichen. Weiterhin wird unterschieden zwischen Systemen, deren Möglichkeit zur Immersion sich ausschließlich auf computergenerierte, virtuelle Umgebungen beschränken und jenen, die Sensordaten zu diesem Zweck nutzen oder Sensordaten mit virtuellen Umgebungen kombinieren (MR).

Für Anwendungen bei Wartungs- und Reparaturarbeiten im Weltraum ist die Kombination eines ABB-Roboters und eines off-the-shelf VR-Systems von Wang et al. gedacht [WMZ17]. Diese Kombination wird in der Arbeit in einem Experiment genutzt, in dem der Operator mithilfe der VR-Controller den Roboter, welcher einen Stift hält, fernsteuert, um ein Muster zu zeichnen [WMZ17]. Die Sicht des Operators beschränkt sich hierbei auf eine Simulationsumgebung, weswegen dieser nur in der virtuellen Umgebung eine Telepräsenz- und Telemanipulationserfahrung machen kann. In einem Aufbau von Krupke et al. wird ein robotischer Greifer mit einer Handgestensteuerung vom Operator ferngesteuert, der ein HMD-Gerät trägt [KEL<sup>+</sup>16]. Laut den Autoren kann so der Greifer vom ersten zum dritten Stock eines Gebäudes ferngesteuert werden, wobei eine Latenz von circa 40 ms erreicht wird. Das visuelle Feedback entsteht durch ein herkömmliches Kamerabild, welches in eine virtuelle Umgebung gestreamt wird, in der die Repräsentation der Hand des Operators, sowie ein virtuelles Model des Roboters vorhanden sind [KEL<sup>+</sup>16]. Dieser Ansatz scheint für Telemanipulation geeignet, jedoch aufgrund des einfachen Kamerabildes nicht für Telepräsenz.

Einen anderen Ansatz wählen Yew et al., indem sie die immersive Telemanipulation mit einem AR-System für einen Wartungsroboter nutzen [YON17]. In der Arbeit wird eine Rekonstruktion der Roboterumgebung für den Operator mithilfe virtueller Objekte und real vorhandener Objekte angezeigt, was ihm helfen soll, die Situation am Roboterort einzuschätzen und intuitiv Wartungsarbeiten durchzuführen. Der Operator hält einen physisch vorhandenen Gegenstand in Händen, der durch eine Kombination von HMD und Kamera in der AR-Szene als Roboterendeffektormodell erscheint [YON17]. Laut den Autoren ermöglicht dies eine natürliche Kontrolle des Roboterarms [YON17]. Aufgrund des Einsatzes des HMDs und Sensordaten, kombiniert mit virtuellen Objekten kann hier zumindest eingeschränkt von Telepräsenz in Kombination mit Telemanipulation gesprochen werden.

Dreidimensionale Sensordaten in Kombination mit stereoskopischen HMDs ermöglichen hingegen das Erfassen von Tiefen- und Farbdaten aus der realen Welt. In einer Arbeit von Chen et al. werden diese Daten genutzt, wobei Tiefenbildkameras sowohl in einem Roboterarm integriert als auch an einer erhöhten Position montiert sind [CGY<sup>+</sup>17]. Durch die Verbindung der IMU-Sensorik eines HMDs und eines Motors, welcher die ausgelagerte Tiefenbildkamera bewegen kann, wird die Kopfbewegung des Operators auf die Ausrichtung der Kamera übertragen [CGY<sup>+</sup>17]. Zusätzlich wird ein haptisches Interface genutzt, um ein Force-Feedback zu generieren [CGY<sup>+</sup>17]. Auch hier geben die Autoren an, dass in Tests des Geräts die Nutzer diese Art der Steuerung gegenüber jener mit Maus und Tastatur bevorzugen [CGY<sup>+</sup>17]. Aufgrund der Kombination von haptischem Feedback, der dreidimensionalen Daten der Tiefenbildkamera und der, durch Kopfbewegungen induzierten, Bewegung der Kamera ist eine Telepräsenz bei der Fernsteuerung dieses Roboters gegeben.

Der Roboter *GITAI* eines japanischen Startups befindet sich bereits in einem fortgeschrittenem Stadium [GIT21]. Er soll von der Erde aus gesteuert werden und im Weltraum Astronauten ersetzen, was die Kosten und die Dauer zur Erfüllung von Aufgaben im Weltraum verringern kann [GIT21]. Die Umgebung des Roboters wird durch ein Kamerasystem, bestehend aus zwei Kameras, aufgenommen und an ein VR-Headset, welches der Operator trägt, gesendet [IEE21]. Der Operator kann so diese Telepräsenz- und Telemanipulationsfähigkeiten in weiter Entfernung nutzen.

Die humanoide Roboterplattform *WALK-MAN* von Tsagarkis et al. kann semiautomatisch oder ferngesteuert betrieben werden [TCN<sup>+</sup>17]. Das System soll nach Katastrophenfällen in der Lage sein, sich in unstrukturierten Umgebungen und auf schwierigen Untergründen wie Gebäuderesten oder Schutt stabil fortzubewegen und seine Umwelt durch Manipulatoren zu verändern [TCN<sup>+</sup>17]. Dies kann bei der Rettung von Menschen und der Beseitigung von Gefahren nützlich sein. Für die optische Sensorik werden Stereo Kameras und Laserscanner genutzt [TCN<sup>+</sup>17]. Trotz Sensorik wie Stereokamera, Laserscanner, IMU und Kraftsensorik wird der Roboter über Bildschirme ferngesteuert [TCN<sup>+</sup>17]. Dies stellt nur eingeschränkt eine Telepräsenz dar.

Bei der Online-Steuerung von Robotern kann auch ein Mischung aus der Darstellung der virtuellen und realen Welt zielführend sein (MR). So zeigen Sun et al., dass diese Kombination gerade durch die immersive Erfahrung für die Teleoperation von Robotern geeignet ist [SKL<sup>+</sup>20]. Laut den Autoren leiden VR-basierte Steuerungen an schwerer Manövrierbarkeit, sofern sie nicht mit haptischem Feedback oder physischen Konstruktionen erweitert werden [SKL<sup>+</sup>20].

Neben der Überbrückung von Distanzen ist auch die Augmentierung der menschlichen Fähigkeiten ein Anwendungsfall von Telemanipulation. Ein stark wachsendes Anwendungsfeld für Roboterfernsteuerungen sind roboterunterstützte Operationen im medizinischen Bereich [RT20]. Die dort eingesetzten Systeme sind für spezielle Anwendungen konzipiert und ihr Hauptzweck ist nicht primär die Manipulation oder Präsenz um Entfernungen zu überbrücken, sondern die Verbesserung menschlicher Fähigkeiten. Ein prominentes Beispiel ist der Chirurgieroboter *DaVinci* [IS21]. Mithilfe des Chirurgieroboters *DaVinci* von Intuitive Surgical Inc. führt ein Chirurg durch ein Eingabesystem Operationen am Menschen durch. Die direkten Steuerungsbefehle, die am Eingabesystem durch den Chirurgen mittels joystickähnlicher Eingabegeräte eingegeben werden, führt der angeschlossene Roboter aus. Dieser verfügt über vier unabhängig steuerbare Arme, die mit Instrumenten ausgestattet werden können. Durch die Eingabe wird die Arbeit des Chirurgen präziser, ungewollte Bewegungen werden abgefangen und die Operation ist für den Patienten schonender [MRM<sup>+</sup>10]. Als visuelles Feedback erhält der Chirurg ein stereoskopisches Kamerabild, welches die Szene vergrößert darstellt.

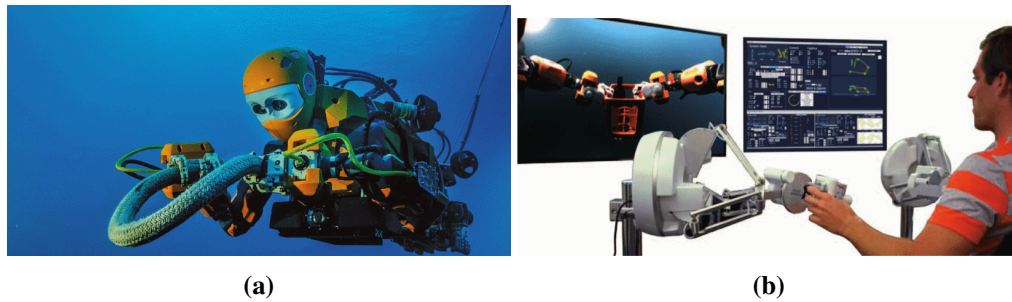
Zum Einsatz von Chirurgieroboter existieren zahlreiche Reviews, die sich beispielsweise auf die chirurgische Eingriffe an der Leber [GBD<sup>+</sup>16], der Wirbelsäule [FQF<sup>+</sup>20] oder im Bereich der Gynäkologie [LML17] beziehen, wobei der *DaVinci* Roboter oft als prominentes Beispiel erwähnt wird.

### 4.2.3 Ferngesteuerte Mensch-Roboter-Interaktion

Bei dem in der hier vorliegende Arbeit vorgestellten Robotersystem wird eine ferngesteuerte Mensch-Roboter-Interaktion angestrebt. Die Herausforderung besteht darin, es dem Operator durch geeignete Steuerung, Aktorik, Feedback und Kommunikationsmöglichkeiten zu ermöglichen, mithilfe eines ferngesteuerten Roboters mit einem Menschen zusammenzuarbeiten.

Ein Teleoperationsinterface wird von Wu et al. vorgestellt, welches an der mobilen kollaborativen Roboterplattform *MOCA* eingesetzt werden soll [WBL<sup>+</sup>19]. Das Gerät besitzt zwei unterschiedliche Betriebsmodi, durch die der Operator entweder Fortbewegungen oder Telemanipulationen steuern kann [WBL<sup>+</sup>19]. Bei der Steuerung der Fortbewegung wird der Schwerpunkt des Operators geschätzt, durch dessen Verlagerung die Position der mobilen Roboterplattform verändert wird [WBL<sup>+</sup>19]. Beim Telemanipulationsbetriebsmodus wird durch den Einsatz von Oberflächenelektromyographie (SEMG) ein, auf der Plattform montierter, Roboterarm ferngesteuert [WBL<sup>+</sup>19]. In beiden Betriebsmodi werden die Aktionen am Bildschirm anhand von herkömmlichen Kameradaten verfolgt, welche von einer, auf dem Roboter befindlichen, Kamera aufgenommen werden [WBL<sup>+</sup>19]. Obwohl in der Arbeit kein Experiment bezüglich der Interaktion von Mensch und ferngesteuertem Roboter stattfindet, ist diese, aufgrund der Nutzung eines kollaborativen Roboters als Ziel anzunehmen.

Der von Toyota vorgestellte humanoide Roboter *T-HR3* wird von einer Fernsteuerungsstation aus von einem Operator, der ein HMD trägt, bewegt [Toy21]. Das System besteht aus dem Roboter (*T-HR3*), welcher vom Körper her einem Menschen gleicht und dem sogenannten *Master Maneuvering System*, mit dem der Roboter ferngesteuert wird [Toy21]. Dieses Fernsteuerungsinterface



**Abbildung 4.6:** Der Unterwasserroboter *Ocean One* (a) und die dazugehörige Steuerungskonsole (b) [KYB<sup>+</sup>16] © 2016 IEEE.

ermöglicht es laut Hersteller den Roboter instinktiv zu steuern, indem Hand-, Arm- und Fußbewegungen auf den Roboter übertragen werden und die Roboterperspektive durch das HMD eingenommen wird [Toy21]. Laut Hersteller stellt dieser Roboter eine Evolution humanoider Robotern dar, die Menschen sicher zu Hause, in medizinischen Einrichtungen, Baustellen, Katastrophenregionen oder Weltraum unterstützten können [Toy21].

Der Roboter *Ocean One*, der in einer Arbeit von Khatib et al. vorgestellt wird, ist ein humanoid anmutender Unterwasserroboter [KYB<sup>+</sup>16]. Dieser ist mit Unterwasserantrieben und menschenähnlichen Greifarmen ausgestattet, welche durch ein visuell-haptisches Interface Telemanipulation ermöglichen (siehe Abbildung 4.6) [KYB<sup>+</sup>16]. Weiterhin wird ein stereoskopisches Display und ein grafisches Nutzerinterface eingesetzt, um dem Operator geeignetes Feedback zu geben [KYB<sup>+</sup>16]. Laut den Autoren ist dieser Roboter in der Lage, Unterwasser durch Fernsteuerung mit einem Taucher kollaborativ zusammenzuarbeiten, wobei er mittels Gesten mit dem Taucher kommuniziert [KYB<sup>+</sup>16].

Der humanoide Roboter *Alter-Ego*, der von Lentini et al. beschrieben wird, ermöglicht es einem Operator ebenfalls ferngesteuert mit Menschen zu interagieren [LSC<sup>+</sup>19]. Der Roboter, welcher sich auf zwei Rädern bewegt und über menschenähnliche, aktuierte Roboterarme verfügt, ist mit Sensorik ausgestattet, die eine Immersion des Operators ermöglicht [LSC<sup>+</sup>19]. Stereoskopische Kameradaten, welche in einem HMD angezeigt werden, und haptisches Feedback ermöglichen die Kontrolle des Roboters, was über die Position des HMDs, IMUs, Armbänder zur Gestenerfassung und ein Wii Balance Board erfolgt [LSC<sup>+</sup>19]. Laut den Autoren kann der Roboter ferngesteuert unter anderem ein Paket vom Paketboten entgegen nehmen und bezahlen, bei Angehörigen die Temperatur mit einem Thermometer messen, Essen anbieten oder mit Kindern interagieren [LSC<sup>+</sup>19]. Die Steuerung des Roboters findet in einem ROS-Netzwerk drahtlos statt, während der Operator die stereoskopischen Daten der Sensorik erhält [LSC<sup>+</sup>19]. Die Steuerungsbefehle des Operators werden mit 100 Hz und einer Latenz von 15 ms an den Roboter gesendet, während der Operator die stereoskopischen Daten mit einer Bildwiederholfrequenz von 25 Hz erhält.

Für die Anwendung in der Telepflege speziell eignet sich ein Ansatz von Lv et al., bei dem der ABB-Roboter *YuMi* mit einem tragbaren Motion Capturing Gerät ferngesteuert wird, um demen-



te Menschen zu unterstützen [LYZ<sup>+</sup>20]. Auch hier wird ein ROS-Netzwerk eingesetzt, welches die Steuerungssignale vom Operator über eine Internetverbindung an den Roboter an einem entfernten Ort überträgt [LYZ<sup>+</sup>20]. Als Anwendungsfälle sind das Aufheben einer Flasche und das Assistieren beim Anheben einer Tasse genannt [LYZ<sup>+</sup>20]. Die Autoren geben an, mit einer Ansteuerungsfrequenz von 7,5 Hz die besten Ergebnisse bezüglich der Abweichung in der Distanz zwischen Operator und Roboter zu erreichen [LYZ<sup>+</sup>20]. Obwohl der Roboter in diesem Fall direkt ferngesteuert wird, wird als visuelles Feedback für den Operator nur auf ein herkömmliches Kamerabild zurückgegriffen. Angaben über die Latenz der Steuerung fehlen.

Beim Einsatz in medizinischen Anwendungen kann, anders als bei den bereits angesprochenen Operationsrobotern wie *Da Vinci*, explizit die kollaborative Arbeit zwischen Mensch und ferngesteuertem Roboter angestrebt werden. Darauf zielt ein System von Su et al. ab, bei dem ein industrieller Roboterarm ferngesteuert mit Menschen, die an der Operation beteiligt sind, zusammenarbeitet [SYFD19]. In der Arbeit wird eine Roboterregelung vorgestellt, durch die es möglich ist, dass Operationspersonal und Fernsteuernder zusammenarbeiten, wobei ersterer den Roboter direkt durch physische Interaktion bewegt und letzterer die Steuerung über ein haptisches Interface durchführt [SYFD19]. Laut den Autoren ist bei Experimenten der minimalinvasiven Chirurgie, bei der die Öffnung am Körper des Patienten schmal ist, der Druck auf diese Öffnung bei Nutzung der Robotersteuerung akzeptabel und weitet diese nicht [SYFD19]. Dies wird durch einen, von den Autoren entwickelten, Algorithmus erreicht [SYFD19]. Der Operator steuert den Roboter wie bereits erwähnt mit einem haptischen Eingabeinterface, wobei ein ROS-System, Kraftsensorik und eine Endoskopkamera zum Einsatz kommen [SYFD19]. Das visuelle Feedback wird über einen herkömmlichen Bildschirm übertragen, wobei die Bildwiederholfrequenz 30 Hz beträgt und die Steuerungssignale eine Frequenz von 500 Hz aufweisen [SYFD19].

Mit Menschen kollaborativ zusammenarbeitende Roboter sind demnach bereits Gegenstand von Forschungen auf unterschiedlichen Gebieten, wobei häufig ROS-Netzwerke eingesetzt werden und die Qualität der Implementierung durch Angaben der Latenz, Bildwiederholrate oder ähnlichem angegeben wird.

### 4.3 Subsysteme

Wie bereits im Kapitel 3 durch die Aufteilung angedeutet, wird es bei dem ferngesteuerten Robotersystem, welches hier beschrieben wird, unter anderem um die Integration unterschiedlicher Subsysteme gehen. In einigen Forschungsarbeiten werden diese Subsysteme dediziert behandelt und sind nicht Teil eines Teleroboters, der immersiv gesteuert wird. Oftmals ist ein anderer Anwendungsfall gegeben. Die Subsysteme, bei denen der Forschungsstand von Bedeutung ist, lassen sich in zwei Felder unterteilen. Zum einen werden Tiefenbildkamarasysteme und die damit verbundenen Strategien zur Kombination mehrerer Sensorquellen untersucht (Abschnitt 4.3.1), zum anderen Robotersteuerungskonzepte, bei denen eine direkte Steuerung zum Tragen kommt (Abschnitt 4.3.2).

### 4.3.1 Tiefenbildkamarasysteme

Die im Abschnitt 4.2 genannten Roboterfernsteuerungen nutzen für ein immersives visuelles Feedback oftmals Sensorik, die das Erfassen dreidimensionaler Daten ermöglicht. Diese Daten eignen sich aufgrund ihrer Dreidimensionalität dafür, in stereoskopischen HMDs angezeigt zu werden. Sofern dabei Stereokameras genutzt werden, ist die Möglichkeit den Blickwinkel durch Kopfdrehung zu ändern, beschränkt, sofern keine Kopplung zwischen Kamerablickrichtung und HMD-Blickrichtung existiert. Bei dreidimensionalen Punktwolken, die aus Tiefenbildkamaras oder Laserscannern entstammen, ist der Blickwinkel beim Betrachten dieser Daten hingegen theoretisch frei wählbar, da es sich um eine Art 3D-Modell handelt. Deswegen lässt sich nach nötigen Vorverarbeitungsschritten eine dreidimensionale Punktwolke in einem HMD so anzeigen, dass die Dreidimensionalität erhalten bleibt und auch Kopfbewegungen den Blickwinkel beeinflussen.

Bei der Betrachtung komplett virtueller Objekte in einem HMD sind diese Effekte Normalität. Sensoren, welche dreidimensionale Daten in Form von Punktwolken liefern, können wie herkömmliche Kameras verdeckt werden, weswegen in der Literatur viele Forschungsarbeiten zu finden sind, die Sensordaten mehrerer Sensorsysteme fusionieren. Da diese Art der Akquise dreidimensionaler Daten für die intuitive Steuerung von Robotern auch für die hier vorliegende Arbeit geeignet scheint, werden einige Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Aufnahme, Verarbeitung und Darstellung von Tiefenbildinformationen aus Punktwolken beschäftigen. Die Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der genutzten Sensortechnologie. Selbst beim Einsatz gleicher Sensorik werden über die unterschiedlichen Arbeiten die Sensordaten grundlegend anders behandelt. Ob dreidimensionale Punktwolken verarbeitet, reines Motion-Capturing angewendet oder dynamische Szenen mit Tiefenbilddaten rekonstruiert werden, hängt vom Anwendungsfall ab.

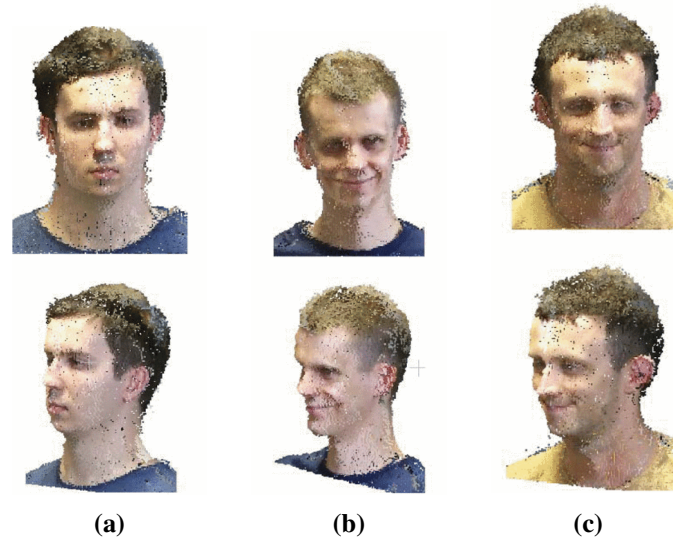
Für die Kollisionserkennung zwischen Robotern, Objekten und Menschen können dreidimensionale Daten herangezogen werden. Dass Laserscanner die Möglichkeit geben, Kollisionen bei automatisch verkehrenden Fahrzeugen in Lagerhallen zu verhindern, wird von Giorgini et al. gezeigt [GA18]. Die Szene wird durch einen terrestrischen Laserscanner erfasst und kann als Punktwolke in einer VR-Umgebung visualisiert werden [GA18]. Zur Vermeidung der Kollision von Mensch und Roboterarm nutzen Mohammed et al. beispielsweise eine Kombination aus zwei Microsoft *Kinect v1* Tiefenbildkamaras [MSW17]. Die Punktwolkeninformationen aus dem Sensorsystem können laut den Autoren zur Kollisionsvermeidung genutzt werden, wobei die Kollisionsabfrage hier zwischen einer Repräsentation des Menschen als Teilmenge einer dreidimensionalen Punktwolke und einem Robotermodell stattfindet [MSW17]. Auch Pan et al. befassen sich mit der automatisierten Erkennung und Vermeidung von Kollisionen in Szenen, die von optischen Systemen erfasst werden, welche Punktwolken liefern [PCM17]. Die automatische Erkennung dieser Art von Kollisionen ist ein relevantes Forschungsgebiet und wird von weiteren Arbeiten, wie zum Beispiel von Schauer et al. [SBMN16], Wang et al. [WYC<sup>+</sup>19] oder Huang et al. [HZZ<sup>+</sup>18] abgedeckt.

Das Abbilden von dynamischen Szenen, in denen es zu Verdeckungen kommen kann, benötigt mehrere Sensoren. Durch die Kombination mehrerer Tiefenbildkamaras, welche eine Szene aus unterschiedlichen Richtungen abbilden, kann ein dreidimensionales Modell der Szene entstehen, welches auch Bewegungen und Veränderungen in der Szene abbildet. In einer Veröffentlichung nut-

zen Kang et al. eine Kombination aus fünf herkömmlichen Farbkameras und drei TOF-Kameras [KH10]. Kameras des selben Typs sind bei dieser Veröffentlichung in einer Reihe angeordnet und die daraus resultierenden zwei Reihen sind dicht übereinander platziert [KH10]. Die Verarbeitung und Zusammenführung der Sensordaten erlaubt es den Autoren, eine, laut ihren Aussagen, hochqualitative Disparitätskarte zu erstellen, welche genaue und stabile Tiefenbildinformationen liefert [KH10]. Das *LiveScan3D*-System von Kowalski et al. kombiniert die kolorierten Punktwolken, welche aus den Daten mehreren Microsoft *Kinect v2* entstehen und registriert diese so, dass sie übereinander liegen [KND15]. Es wird gezeigt, dass dies akkurat genug ist, um auf Grundlage dieser Daten Gesichter von Menschen anzuzeigen (Abbildung 4.7) und die Bilderwiederholffrequenz gut genug ist, um einen geworfenen Ball zu verfolgen [KND15]. Auch bei der Überwachung von Milchkühen wurde von Salau et al. gezeigt, dass Beckenknochen und die Zitzen durch ein System, bestehend aus mehreren dieser TOF-Kameras, vermessen werden können [SHJT16].

Einige Arbeiten befassen sich explizit mit der Erkennung von Menschen in tiefenbildkameraüberwachten Räumen. Um die Bewegung von Menschen nachverfolgen zu können, nutzen Shafei et al. ebenfalls mehrere *Kinect v2* [SL16]. Die Autoren geben an, dass das von ihnen trainierte System effektiv in der Erkennung von Posen ist und Gelenkpositionen in Echtzeit liefert [SL16]. Shuai et al. entwickeln ein Motion-Capturing-Framework, bei dem abermals mehrere *Kinect* genutzt werden, um das Erkennen von Posen zu optimieren [SLG<sup>+</sup>17]. In der Literatur finden sich weitere Beispiele bei denen die *Kinect*-Versionen *v1* und *v2* für das Erfassen von Menschen genutzt werden. Clark et al. stellen 2019 einen Review über Nutzung, Validität, aktuelle Entwicklung und *Kinect*-Alternativen vor, bei dem unter anderem auf die Möglichkeiten der zu dieser Zeit erhältlichen *Kinect*-Versionen 1 und 2 eingegangen wird [CMHP19]. Die Nachfolgerversion der *Kinect* ist Microsofts *Azure Kinect (K4A)*. Diese ist seit 2019 erhältlich. In der Forschung wird die neuere Version bereits genutzt. Von Ma et al. werden beispielsweise zwei K4As zur Ganganalyse in einer Studie eingesetzt [MSHZ20].

Markerbasierte Systeme, wie das *VICON*-System [Vic21], bei denen das Tragen eines Anzugs oder ähnliches vorausgesetzt wird, werden bei kommerziellen Motion-Capturing-Anwendungen ebenfalls eingesetzt. Das Anlegen dieser Systeme benötigt jedoch Zeit und aufwendiges Kalibrieren und scheint auch aufgrund des vorhandenen Platzes für den Einsatz in der Pflege nicht geeignet. Sensorsysteme, die eine dreidimensionale Bildgebung ermöglichen scheinen für verschiedene Anwendungszwecke geeignet und stechen bei der Erkennung von Kollisionen hervor. Die Rolle von Tiefenbildkameras und Systemen, die aus mehreren Kameras dieses Typs bestehen, ist in diesem Kontext hervorzuheben.



**Abbildung 4.7:** Drei verschiedene Gesichter, aus je zwei verschiedenen Blickwinkeln, dargestellt als Punktwolken mit dem *LiveScan3D*-System von Kowalski et al. [KND15] © 2015 IEEE.

### 4.3.2 Direkte Robotersteuerung

Einige der im Abschnitt 4.2 genannten Roboter werden mit speziellen Eingabeinterfaces gesteuert, die es dem Operator ermöglichen, den Roboter intuitiv zu bewegen. Bei der direkten Steuerung der Roboter können verschiedene Wege eingeschlagen werden, deren Erforschung und Weiterentwicklung Gegenstand eigenständiger Forschungsarbeiten sind. Diese Felder sollen auch in der hier vorliegenden Ausarbeitung angeschnitten werden, weswegen hier einige relevante Ansätze zu diesem Thema vorgestellt werden. Es wird hier zwischen General-Purpose-Eingabegeräten, Replikanten und Steuerung durch menschliche Bewegung unterschieden. In den meisten Arbeiten kommt das Master-Slave-System zum Einsatz, bei dem ein untergeordnetes Slave-System die Bewegungen, welche vom Master aus kommuniziert werden, nachahmt.

Die Kontrolle eines Roboters kann über die direkte Steuerung des Endeffektors oder anderen Roboterteilen über General-Purpose-Eingabegeräte stattfinden. Maus, Tastatur, Joysticks oder Gamepads zählen zu diesen Geräten, die sich aufgrund ihrer Vielseitigkeit anbieten. In der Literatur gibt es viele Anwendungsbeispiele von General-Purpose-Eingabegeräten. Für Joysticks lassen sich, neben vielen weiteren, Arbeiten von Pierce et al. zur Verbesserung des Mappings [PK12], von Ha et al. zur Steuerung von mobilen Robotern [HPH<sup>+</sup>15] oder von Mavridis et al. zur Verbesserung von Trainings und Assessments für die Bedienung joystickgesteuerter Roboter nennen [MPG<sup>+</sup>15]. Zur Steuerung von Robotern im Pflegekontext liegen in diesem Zusammenhang ebenfalls Forschungsarbeiten von Gliesche et al. vor [GKP<sup>+</sup>20].

Auch Kombinationen von General-Purpose Eingabegeräten bei gleichzeitiger Nutzung von VR-Technologien für das visuelle Feedback sind möglich. So zeigen Rodehutsors et al., wie mit ei-

ner für Computerspiele konzipierten Kombination aus Handbewegungssteuerung und Joystick ein Roboter mit dem visuellem Feedback eines HMD gesteuert werden kann (siehe Abbildung 4.8) [RSB15].

Haptische Eingabegeräte wie *Falcon 3* [Ana18], *omega.7* [For21] und *Touch* [3D 21] sind zugänglich geworden. Sie versprechen Vielseitigkeit bei unterschiedlichen Anwendungen, bei denen ein haptisches Feedback notwendig ist.

Sofern die Gesamtheit der Bewegung des Roboters stärker im Fokus steht, kann das Replizieren des zu steuernden Roboters, um ein Eingabeinterface zu erhalten, eine Möglichkeit der direkten Robotersteuerung sein. In einem Master-Slave-System kann so durch die Bewegung des replizierten Roboters eine Bewegung am eigentlichen Roboter induziert werden. Der Slave-Roboter spiegelt die Bewegungen des Roboter-Masters, der vom Operator bewegt wird, wider. Das Eingabeinterface muss dabei nicht immer im Detail dem Roboter entsprechen, jedoch seinem mechanischen Aufbau gleichkommen. Dazu zählen beispielsweise Eingabesysteme von Kim et al. [KOLH13] oder von Winck et al. [WEB15], welche der intuitiven Steuerung von Baggararmen dienen. Auch die Steuerung der Roboterarme mittels eines Master-Slave-Systems in den Arbeiten von Glover et al. [GRW<sup>+</sup>09] oder Abi-Farraj et al. [AOP<sup>+</sup>17] zählen zu dieser Kategorie. Einen Roboter nach menschlichem Vorbild zu konstruieren und das Eingabeinterface auf Grundlage des Roboters zu entwickeln, erfolgt in zwei Replizierungsschritten. Dennoch wird der Roboter in letzter Konsequenz von einem, ihm ähnlichen Eingabeinterface gesteuert. Dies ist beispielsweise beim bereits vorgestellten Roboter *T-HR3* [Toy21] von Toyota angewandt. Die Nachbildung von real existierenden Robotern in virtuellen Umgebungen kann im weiteren Sinne auch zu dieser Kategorie hinzugezählt werden. Die Begrenzung der mechanische Gegebenheiten eines replizierten Roboters können jedoch in virtuellen Umgebungen theoretisch jederzeit umgangen werden.

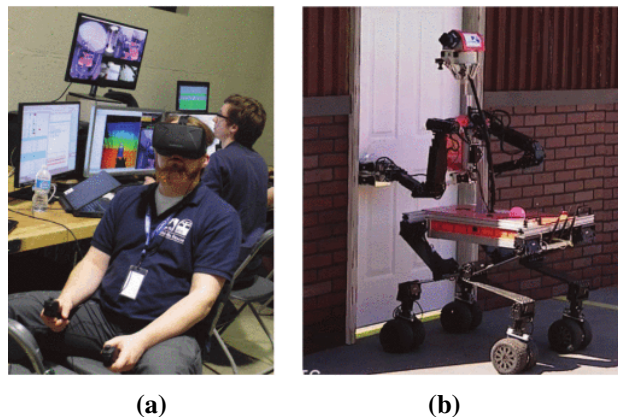
Die natürlichen Bewegungen von Menschen in Steuerungssignale für Roboter umzuwandeln ist ebenfalls möglich. Das „Hineinschlüpfen“ in den zu steuernden Roboter, beziehungsweise in den Roboterarm, kann auch durch das Verfolgen der Posen und Bewegungen eines Menschen erfolgen. In diesem Zusammenhang kann auch von einem Avatar gesprochen werden. Diese Steuerung wird durch die Nutzung von tragbarer Sensorik oder optischem Motion-Capturing erreicht, welche die natürlichen Bewegungen des Menschen nicht oder im geringen Maße beeinträchtigen. Dazu existieren Untersuchungen zum Vergleich herkömmlicher General-Purpose-Eingabegeräte und neuerer Technologien, wie der Steuerung durch Kopfbewegung in einer Arbeit von Doisy et al. [DRE17] oder Handgestensteuerung in einer Arbeit von Bonaiuto et al. [BCP<sup>+</sup>17]. Auch Long et al. stellen einen Vergleich auf, bei dem Studienteilnehmer mithilfe eines Gamepads oder einer Handgestensteuerung einen Roboterarm fernsteuern sollen, um Knöpfe und Schalter zu betätigen [LB16]. Durch bewegungssensitive Handschuhe können in Arbeiten von Fang et al. [FGS<sup>+</sup>15] oder Park et al. [PJB16] Roboter durch Handbewegungen teleoperiert werden, was ein Mapping natürlicher Bewegungen eines Menschen auf einen Roboter darstellt. Ein tragbares Motion-Capturing-System wird auch von Gong et al. eingesetzt, um einen Roboterarm für Ausgrabungen fernzusteuern [GWYZ19]. Hierbei sind Roboterarm und Menschenarm verschieden, weswegen Umrechnungen erfolgen müssen, um den Roboterarm intuitiv fernsteuern zu können [GWYZ19]. Auch durch die Nutzung von EMG-Signalen ist es möglich, Aktivierungen von menschlichen Muskeln in Steuer-

signale für Roboter umzuwandeln, was von Liao et al [LTCW18] oder Shin et al [SKS14] gezeigt wird.

Optische Systeme, die Motion-Capturing erlauben, können ohne das Tragen von Sensorik menschliche Bewegungen erfassen, woraus sich Steuerungssignale von Robotern ableiten lassen. Um den Roboterarm eines Roboters des Typs *Baxter* zu bewegen, nutzen Zhao et al. die Motion-Capturing-Möglichkeiten einer *Kinect v2* Kamera [ZLW<sup>+</sup>16]. Dabei müssen, laut den Angaben der Autoren, die zunächst unterschiedlich großen Arbeitsbereiche von Roboterarm und Menschenarm so gemappt werden, dass ähnliche Arbeitsbereiche entstehen [ZLW<sup>+</sup>16]. Weitere dieser Ansätze existieren, bei denen auch Kombinationen aus optischen Systemen und Beschleunigungssensoren zum Einsatz kommen [MS13].

Ein neueres Steuerungskonzept stellen VR-Systeme dar, bei denen optisches Tracking in Verbindung mit Beschleunigungssensorik zum Einsatz kommt. Die Nutzer können VR-Controller oder HMDs tragen. Somit können bei der Robotersteuerung die VR-Geräte zur Verfolgung der menschlichen Bewegung genutzt werden sowie ergänzend die Knöpfe an den Controllern. Laut den Ergebnissen einer Studie von Whitney et al. ist die Steuerung eines Roboters mit VR-Technologie im Gegensatz zur Steuerung mit Maus und Tastatur überlegen, was anhand der Dauer des Stapelns von Tassen gezeigt wird [WRP<sup>+</sup>20]. Weiterhin ist es möglich, reale Roboter direkt über die VR-Geräte oder über einen Zwischenschritt aus virtuellen Umgebungen zu steuern. Starke et al. kontrollieren beispielsweise einen simulierten Roboter mithilfe eines VR-System innerhalb einer virtuellen Umgebung [SHKZ17]. Das virtuelle Modell des Roboters folgt dabei den den VR-Controllern. Lipton et al. nutzen zur Steuerung eines *Baxter* Roboters einen virtuellen Kontrollraum, den der Operator beim Tragen eines HMDs sieht und virtuell benutzen kann [LFR18]. Die Autoren geben an, dass in einer Studie neue Nutzer schneller und genauer mit diesem System umgehen können als mit der direkten Steuerung des Roboters [LFR18].

Es zeigt sich, dass die direkte Fernsteuerung von Robotern ein definiertes Forschungsfeld ist, in dem es unterschiedliche Ansätze gibt, welche auch für den Einsatz bei immersiv gesteuerten Robotern vielversprechend sind.



**Abbildung 4.8:** Ein teleoperierter Roboter, der zur Telemanipulation eingesetzt werden kann. **(a):** Der Operator steuert den Roboter mithilfe eines HMDs und Controllern fern. **(b):** Der gesteuerte Roboter [RSB15] © 2015 IEEE.

#### 4.4 Kritik am Stand der Technik

Wenn von Robotereinsatz in der Pflege die Rede ist, werden oft Roboter für emotionale und soziale Dienstleistungen (siehe Abschnitt 4.1) erwähnt. Roboter wie *Pepper* [Rob21] sind menschenähnlich und möglicherweise deswegen für die Öffentlichkeit von Interesse. Leider können diese die alltägliche körperliche Belastung bei Patiententransfers nicht reduzieren und haben somit einen geringen Effekt auf die, aus körperlicher Überbelastung resultierenden, Arbeitsausfälle bei den Berufsangehörigen der Pflege. Geräte, die auf die Selbstständigkeit der Gepflegten abzielen, können zumindest eine Reduktion der nötigen Pflegehandlung bei der Versorgung verringern (siehe Abschnitt 4.1.2 und 4.1.3). Weiterhin ist die Zustimmung zur Nutzung von Technik seitens der Pflegekräfte abhängig vom Anwendungsgebiet [ZKS<sup>+</sup>20]. Technische Assistenz bei körperlich schwerer Pflegearbeit wird akzeptiert, wohingegen ein Technikeinsatz im emotionalen oder sozialen Bereich eher abgelehnt wird [ZKS<sup>+</sup>20]. Um direkt die Belastungssituation des Pflegepersonals zu verbessern, ist physische Assistenz bei Patiententransfers nötig. Einige der im Abschnitt 4.1.3 vorgestellten Geräte haben genau dieses Ziel, sind aber in Hinblick auf die nahtlose Einbindung in bestehende Pflegeabläufe kritisch zu hinterfragen.

**Schlussfolgerung:** Bei Robotern, die in der Pflege eingesetzt werden oder werden sollen, fehlt es an intuitiv bedienbaren, sich in Pflegeprozesse einfügenden, Robotersystemen, welche eine messbare physische Entlastung bei Patiententransfers erreichen können.

Diesem Problem durch den Einsatz von ferngesteuerter Telerobotik zu begegnen, ist erklärtes Ziel des hier vorgestellten Systems. Zur Zeit ist keine weitere Arbeit bekannt, die es sich zum Ziel gesetzt hat, durch ein ferngesteuertes Robotersystem eine physische Entlastung bei Patiententransfers

zu erreichen. Dennoch existieren Forschungsarbeiten für andere Bereiche, die ein ähnliches Konzept verfolgen. Der Blick in die immersive Telerobotik in andere Branchen offenbart zwar Ansätze, welche für die speziellen Anwendungsfälle in den jeweiligen Arbeiten passgenau erscheinen, jedoch für die Pflege ungeeignet sind.

Um die für die hier vorliegende Arbeit angestrebten Zielen zu erreichen, muss eine immersive Robotersteuerung bestimmte Anforderungen erfüllen. Zunächst muss ein gewisses Situationsbewusstsein beim Operator vorhanden sein, was beispielsweise durch geeignetes visuelles oder haptisches Feedback erreicht werden kann. Dies kann nicht ausschließlich über herkömmliche Bildschirme erfolgen, wie bei den bereits in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten Systemen von Lv et al. [LYZ<sup>+</sup>20] oder Wu et al [WBL<sup>+</sup>19]. Latenzen von 700 ms und Bildwiederholraten von 5,3 Bildern pro Sekunde für das visuelle Feedback, wie für den Kartografierroboter von Krüchl et al. [KNFS15], sind nicht ausreichend für Fernsteuerung von Robotern, die mit Menschen interagieren. Auch die Zeit, die benötigt wird, bis eine Eingabe eine Bewegung am Roboter auslöst, muss gering sein. Werte von 40 ms wie bei dem Aufbau von Krupke et al. [KEL<sup>+</sup>16] oder 15 ms, wie bei Lentini et al. [LSC<sup>+</sup>19] sind dafür erstrebenswert. Die Roboteraktorkik muss des Weiteren aufgrund von Informationen aus Sensordaten, welche die tatsächliche Umgebung des Roboters abbilden, bewegt werden. Das Feedback darf sich nicht auf rein virtuelle Umgebungen beschränken, wie bei der Arbeit von Wang et al. [WMZ17], in der der Robotereinsatz für Wartungsarbeiten im Weltraum angestrebt ist. Auch der Roboter muss für den Einsatz in der Nähe von Menschen geeignet sein, wie es beispielsweise bei Lv et al. [LYZ<sup>+</sup>20], bei der Assistenz von Demenzerkrankten, gezeigt wird. Zur Forschung auf dem Gebiet der immersiven Telerobotik, die ein kollaboratives Arbeiten mit einem Menschen zulässt, sind nur wenige Beispiele zu finden (siehe Abschnitt 4.2.3). Keiner dieser Ansätze könnte eine messbare physische Entlastung bei Patiententransfers ermöglichen. Auch alle anderen Arbeiten des gesamten Abschnitts 4.2, zu immersiver Robotersteuerung, lassen sich nicht ohne Weiteres auf die Altenpflege übertragen. Das Komplettsystem *T-HR3* von Toyota ist eine Ausnahme, über die jedoch hinsichtlich der Verfügbarkeit und des Potentials nicht viel bekannt ist.

**Schlussfolgerung:** Es ist kein teleoperiertes Robotersystem bekannt, durch das explizit physische Entlastungen bei Patiententransfers im Kontext der Pflege angestrebt wird. Bei den Ansätzen der immersiven Telerobotik sind keine Beispiele zu finden, die sowohl situationsbewusstseinsfördernde Steuerung als auch geeignete Robotik nutzen, um für einen kollaborativen Einsatz in der Altenpflege infrage zu kommen.

Es stellt sich die Frage, ob außerhalb der integrativen Ansätze isolierte Systeme existieren oder erforscht werden, welche sich als Subsysteme für ein ferngesteuertes Robotersystem eignen. Die Untersuchung verwandter Arbeiten bezüglich der beiden Hauptkomponenten, der Fernsteuerung und der Aktorik, offenbart vielversprechende Ansätze.

Auf dem Gebiet der Akquise, Verarbeitung und Präsentation dreidimensionaler Sensordaten zeigt sich der häufige Einsatz von TOF-Kameras. Weiterhin können Punktwolken zur Kollisionsvermeidung



derung herangezogen werden, die sofern sie mit einer ausreichend hohen Wiederholfrequenz dargestellt werden, auch zur Nutzung innerhalb von HMDs geeignet scheinen.

Bei der direkten Steuerung von Robotern, zeigen sich unterschiedliche Konzepte, die über Eingabe von General-Purpose-Geräten bis hin zum Motion-Capturing von menschlichen Bewegungen reichen, um Steuerungssignale für Roboter abzuleiten. Viele der im Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Systeme, bei denen neuartige Technologien wie VR-Controller oder tragbare Sensorik eingesetzt werden, versprechen bessere Ergebnisse bei der Steuerung unterschiedlicher Geräte [DRE17] [LFR18] [WRP<sup>+</sup>20].

**Schlussfolgerung:** Für visuelles, auf dreidimensionalen Daten basiertes, Sensorfeedback sind einige Ansätze zu finden. Gleiches gilt für intuitive direkte Robotersteuerung. Eine integrative Arbeit zur Kombination dieser Bestandteile, um das Forschungsfeld der immersiven Roboterfernsteuerung zu erweitern, ist denkbar.



# Kapitel 5

## Komponentenauswahl

In diesem Kapitel werden die Komponenten und Subsysteme, die in dem hier vorgestellten ferngesteuerten Robotersystem Anwendung finden, vorgestellt. Die Entscheidungen, die zur Auswahl der später genutzten Komponenten führen, werden in den einzelnen Abschnitten erläutert. Zunächst ist das allgemeine Setup, welches sich aus dem Anwendungsfall ergibt, beschrieben (Abschnitt 5.1). Anschließend wird in Abschnitt 5.2 die Auswahl der Roboteraktuatorik erläutert. Die Überlegungen, die zur Auswahl einer geeigneten Netzwerkinfrastruktur führen, sind in Abschnitt 5.3 dargelegt. In Abschnitt 5.4 ist die Auswahl der Komponenten für die Fernsteuerung, welche hauptsächlich aus einem optischen System und einem VR-System besteht, beschrieben. Das Kapitel schließt mit einer Gesamtübersicht (Abschnitt 5.5).

### 5.1 Grundlegendes Physisches Setup

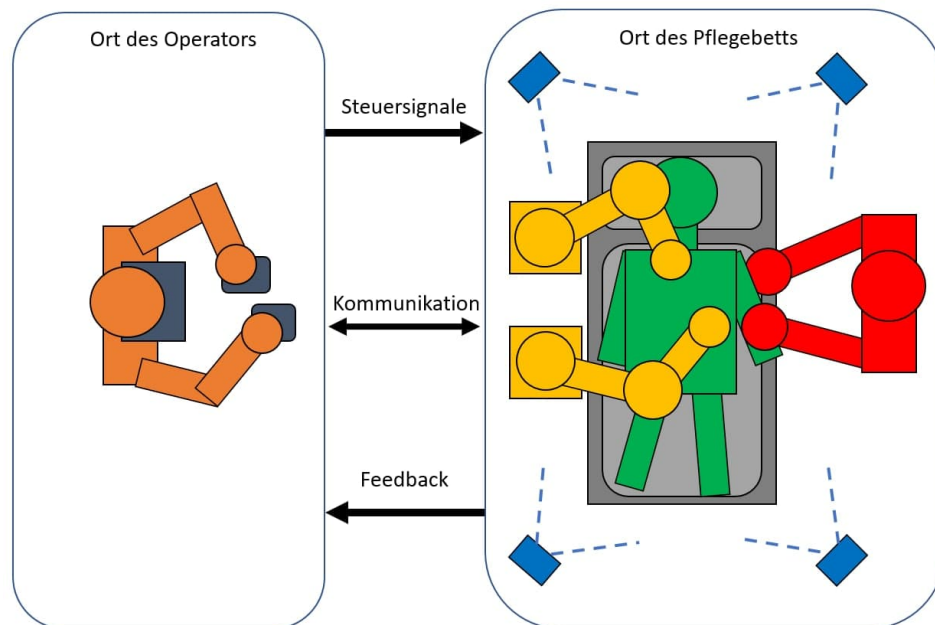
Das Robotersystem soll aus der Ferne von einem Operator ferngesteuert werden, damit dieser aktiv an Pflegeprozessen am Pflegebett teilhaben kann, ohne selbst vor Ort zu sein. Die Fernsteuerung erfolgt durch ein VR-System, bestehend aus HMD, VR-Controllern und VR-Trackern. Durch das HMD erreichen den Operator dreidimensionale visuelle Daten. Mithilfe der Controller und Tracker werden die Bewegungen des Operators auf eine zweiarmige Roboterkonstruktion gemappt. Abbildung 5.1 stellt das ausgewählte Setup vereinfacht dar.

Dies verlangt zunächst nach der Installation von Roboteraktuatorik in der Nähe eines Pflegebettes. Zu diesem Zweck müssen alle, für den Betrieb der Roboter nötigen, Komponenten in dem betreffenden Zimmer installiert sein. Eine zweiarmige Roboterkonstruktion wird angepeilt, welche am Pflegebett installiert ist. Idealerweise folgt das Robotersystem in Höhe und Ausrichtung der Aktuatorik des Pflegebettes. Das heißt, sobald das Pflegebett hochgefahren wird, sollen sich auch die Positionen der Roboterarme dementsprechend ändern. Dies vereinfacht später die Fernsteuerung, da die Höhe von Robotersystem und Bett mit diesem Aufbau nicht unterschiedlich ist und damit auch nicht abgestimmt werden muss. Da eine Fernsteuerung realisiert werden soll, die auf Basis von optischen Sensordaten funktioniert, sind am Bett weiterhin die nötigen Sensoren zu positionieren.

nieren. Dies schließt die nötige Hardware ein, die für die Funktion der Sensorik gebraucht wird. Vor Ort muss daher das Robotersystem bestehend aus Sensoren, Roboterarmen sowie die benötigte Hard- und Software installiert sein.

Auf der Seite des Operators muss die Steuerung für das Robotersystem realisiert werden. Da eine VR-Technologie eingesetzt wird, müssen die nötigen Geräte für die Funktion dieses System vorhanden sein. Dies schließt Computerhardware ein, die es ermöglicht, die visuellen Daten auf dem HMD in ausreichender Qualität darzustellen.

Das System wird in das Pflegelabor der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg installiert. Eine de facto räumliche Trennung von Operator und Robotersystem findet durch die Raumaufteilung des Pflegelabors statt. Im Pflegelabor ist es möglich, relevante Belastungsmessungen für Altenpfleger in einer experimentellen Umgebung durchzuführen und auf Sensorik zur Belastungsanalyse zurückzugreifen (siehe eigene Veröffentlichungen [BFL<sup>+</sup>20b] [HBF<sup>+</sup>21]).



**Abbildung 5.1:** Vereinfachte Darstellung des ausgewählten Setups für die Roboterfernsteuerung. Ein am Pflegebett befindlicher Pfleger (rot) führt den Transfer eines Patienten (grün) gemeinsam mit einem ferngesteuerten Roboter (gelb) durch. Der Roboter wird direkt von einem Operator (orange) durch ein immersives Eingabeinterface, bestehend aus VR-Geräten (grau), gesteuert. Die Tiefenbildkameras (blau) erlauben ein visuelles Feedback. Steuerungssignale erreichen das Robotersystem vom Ort des Operators aus. Haptisches Feedback aus Kraftsensordaten des Robotersystems und visuelles Feedback aus den Kameras erreicht den Operator vom Ort des Pflegebetts aus. Zwischen beiden Orten ist ein Kommunikationskanal geöffnet, damit sich Pfleger (rot) und Operator (orange) austauschen können.

### 5.2 Robotersystem

Die Auswahl eines geeigneten Robotersystems ergibt sich aus dem Anwendungsfall. Zunächst muss der eingesetzte Roboter die Anforderungen für die Zusammenarbeit mit Menschen gewährleisten. Gleichzeitig sind aufgrund des Ziels, ähnlich wie ein sich vor Ort befindlicher Mensch, am Pflgetransfer aktiv teilzunehmen, weitere Ansprüche zu stellen. Das Robotersystem muss demnach ebenfalls anthropomorph sein und bestenfalls den Armen eines Menschen nachempfunden sein. Weiterhin muss genügend Kraft mit dem Robotersystem aufwendbar sein um eine messbare Entlastung zu erzielen.

Roboter dieser Art sind, wie bereits anfangs in Abschnitt 3.2 erwähnt, im industriellen Umfeld bereits etabliert. Aufgrund des hohen Aufwands, einen kollaborativen Roboter zu entwickeln, der jahrzehntelange Forschung und Entwicklung beinhaltet, muss in dem hier beschriebenen ferngesteuerten Robotersystem, was den physischen Aufbau betrifft, auf ein bereits vorhandenes System zurückgegriffen werden. Der Anwendungsfall Patiententransfer stellt gewissermaßen eine Zweckentfremdung der Roboter dar, die eigentlich für Montagearbeiten und ähnliche Aufgaben konzipiert sind. Aktuell verfügbare kollaborative Robotersysteme sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Diese Tabelle beschränkt sich auf kollaborative Leichtbauroboter. Dies ist Voraussetzung, weil das Gerät, aufgrund der Installation an einem motorisierten Teil des Bettes, der Nutzlast des Bettes hinzugefügt werden muss. Die Aktorik des Bettes muss demnach sowohl Patient als auch Roboter bewegen können. Weiterhin befindet sich das System dicht am Patienten, weswegen es nicht zu laut sein darf. Diese Anforderungen werden von allen vorgestellten Robotern erfüllt.

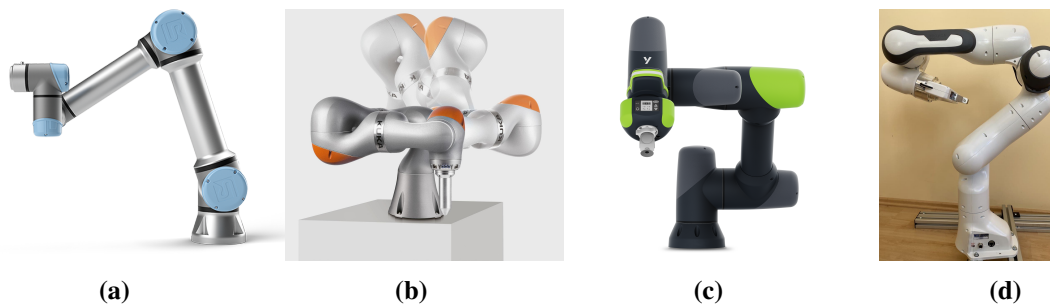
Alle in Tabelle 5.1 aufgelisteten Systeme verfügen über Kraftsensorik, mit der es möglich ist, Kollisionen zu erkennen. Die Systeme *Yumi*, *Sawyer Black Edition*, *APAS* und *Yu+5/100* verfügen zudem über optische Systeme.

Da für das hier beschriebene ferngesteuerte Robotersystem Roboter genutzt werden sollen, um menschliche Arme zu imitieren, müssen die Roboter menschenähnliche Dimensionen aufweisen und über ähnliche Kräfte verfügen. Bei der Bewertung der Roboter hinsichtlich des letzteren Aspekts, muss zunächst klargestellt werden, dass aus den angegebenen Werten für die maximalen Nennnutzlasten nicht automatisch auf die maximal möglichen Kräfte der Roboter geschlossen werden kann. Busson et al. zeigen in diesem Zusammenhang für den Kuka *LBR iiwa 14 R820*, dass unter bestimmten Bedingungen die Herstellerangaben zur maximalen Traglast weit übertroffen werden können [BB18]. Die Werte sind wahrscheinlich niedrig angesetzt, weil von den Herstellern sichergestellt werden muss, dass bei den angegebenen Werten und schlechtmöglichsten Hebelverhältnissen der Roboter ausreichend genau arbeitet und langlebig bleibt. Verglichen mit den Möglichkeiten eines Menschen sind strenge Genauigkeiten im Submillimeterbereich unnötig, sofern konstant nachgeregelt werden kann. Einen 16 kg schweren Gegenstand im Stehen im ausgestreckten Arm zu halten, wie es beim Fanuc *CRX-10iaL* möglich ist, dürfte darüber hinaus für viele Menschen eine Schwierigkeit darstellen. Deswegen können die Roboter aus Tabelle 5.1 mit über 10 kg Nennnutzlast als „Nice-to-Have“ bewertet werden. Ihre Fähigkeiten bei der Kraftentfaltung übersteigen jedenfalls in der Theorie die eines Menschenarmes.

**Tabelle 5.1:** Kollaborative Robotersysteme, welche sich aktuell für den Einsatz bei dem in dieser Ausarbeitung beschriebenen ferngesteuerten Robotersystem eignen. Der Wert **NL** bezeichnet die angegebene maximale Nennnutzlast des Roboters; **R** die angegebene maximale Reichweite. Von einigen Systemen sind mehrere Versionen mit unterschiedlichen Werten hinsichtlich dieser beiden Werte erhältlich.

Hersteller	Robotersystem	Version	NL [kg]	R [cm]	Ref
ABB	Yumi	IRB 14000	0,5	55,9	[ABB21]
		IRB 14050	0,5	55,9	
Kuka	LBR iiwa	7 R800	7	80	[KUK21a]
		14 R820	14	82	
Universal Robots	UR	3e	3	50	[Uni21]
		5e	5	85	
		10e	10	130	
		16e	16	90	
Fanuc	CRX-	10ia	10	124,9	[Fan21]
		10iaL	10	141,8	
Rethink Robotics	Sawyer	Black Edition	4	126	[Ret21]
Bosch	APAS		7	91,1	[BOS20]
Franka Emika	Panda		3	85,5	[Fra21a]
Yuanda	Yu+5/100		7	85	[Yua21]

Auch die Reichweite der Roboter muss im direkten Vergleich zu Menschenarmen bewertet werden. Die Armspannweite eines Menschen korrespondiert ungefähr mit seiner Körpergröße. Die durchschnittlichen Körpergröße beträgt 1,635 m bei Frauen und 1,77 m bei Männern in Deutschland im Jahr 2011 [Sta21c] [Sta21d]. Weil die, ungefähr gleich großen, Armspannweiten auch die Breite des Rumpfes enthalten, sind für durchschnittliche Armlängen Werte von weit unter 81,75 cm, beziehungsweise unter 88,5 cm zu erwarten. Dies führt zu der Erkenntnis, dass Roboter über 90 cm Reichweite mehr bieten als notwendig und sinnvoll. Die Bewertung der Reichweite muss dennoch auch unter der Annahme erfolgen, dass sich die Roboterbasis in der Nähe des Pflegebetts befindet. Roboter, mit denen es aufgrund zu geringer Reichweiten und Kraftwerte nicht möglich ist, Menschenarme zu imitieren, müssen ausgeschlossen werden. Die ABB-Roboter oder der *UR3e* von Universal Robotics weisen zu geringe Reichweiten auf. Außerdem sind sowohl bei dem zweiarmligen System *IRB 14000* als auch bei dem einarmigen *IRB 14050* von ABB aufgrund der angegebenen Nennnutzlast zu geringe Kräfte für den Anwendungsfall in dieser Arbeit zu erwarten. Sofern aus der Tabelle 5.1 die Robotersysteme ignoriert werden, die entweder nicht ausreichen oder die Anforderungen hinsichtlich Traglast und Reichweite bei Weitem übersteigen, bleiben vier Systeme übrig. Es handelt sich hierbei um Kuka *LBR iiwa 7 R800*, Universal Robots *UR5e*, Franka



**Abbildung 5.2:** Die vier Roboter, deren Einsatz für den Anwendungsfall sinnvoll erscheint. **(a):** Universal Robots *UR5e* © Universal Robotics (Germany) GmbH. Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Universal Robotics (Germany) GmbH. **(b):** Kuka *LBR iiwa 7 R800* © Kuka AG. Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Kuka AG. **(c):** Yuanda *Yu+5/100* © Yuanda Robotics GmbH. Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Yuanda Robotics GmbH. **(d):** Franka Emika *Panda*.

Emika *Panda* und Yuanda *Yu+5/100*. Welcher dieser Roboter letztendlich ausgewählt wird, muss in einem direkten Vergleich entschieden werden. Bei dem Vergleich werden die Aspekte abgefragt, die beim Einsatz in der Pflege relevant erscheinen.

Die Form der Roboter ist, aufgrund der Tatsache, dass zwischen ihm und Menschen Berührungen stattfinden, von Bedeutung. Die vier Modelle sind in Abbildung 5.2 abgebildet. Üblicherweise entsteht der Kontakt von Roboter und Werkstück in der Industrie durch ein Werkzeug, welches am Endeffektorflansch des Roboters montiert ist. Übertragen auf einen in der Altenpflege arbeitenden Menschen bedeutet dies, dass die Pflegekraft den Gepflegten ausschließlich mit den Händen berühren würde. Bei Patiententransfers kann dies als unüblich betrachtet werden. Auch bei der Fernsteuerung des Roboters ist demnach davon auszugehen, dass es mehrere Berührungspunkte geben kann. Deswegen muss ein Roboter ausgewählt werden, der aufgrund seiner äußeren Beschaffenheit hohe punktuelle Belastung vermeiden kann. Weiterhin soll es mithilfe des Roboterarms möglich sein, einen Menschenarm abzubilden. Vereinfacht gesagt, soll es für den Operator möglich sein, mit seinem Arm in den Roboterarm hineinzuschlüpfen. Der Grad der Ähnlichkeit des Roboterarms mit einem menschlichen Arm muss also möglichst hoch sein.

Der Roboter, durch dessen Aufbau ein Mapping auf einen menschlichen Arm am ehesten zu erreichen erscheint, ist der Kuka *LBR iiwa 7 R800*. Bereits veröffentlichte Forschungsarbeiten von Ficuciello et al. [FRL<sup>+</sup>14] und Nocco et al. [NCZ<sup>+</sup>17], zum Mapping menschlicher Arme auf Roboterarme dieses Robotermodells, belegen dies. Es ist neben dem Franka Emika *Panda* das einzig verbleibende Robotermodell, welches keine Kanten aufweist. Auch aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den beiden Kuka *LBR iiwa* Ausführungen, im Gegensatz zu den Modellen der anderen Herstellern, um etablierte Systeme mit hoher Verbreitung sowohl in der Forschung (z.B. [NMB21] [LLLC20] [NCZ<sup>+</sup>17] [FRL<sup>+</sup>14]) als auch für Anwendungszwecke im Gesundheitssektor, teilwei-

se mit entsprechenden medizinischen Zulassungen [KUK21b], handelt, fällt die Wahl auf den Kuka *LBR iiwa 7 R800*.

### 5.3 Netzwerkinfrastruktur

Die Netzwerkinfrastruktur ist entscheidend, um geringe Latenzen bei der Anzeige des Feedbacks und der Übertragung der Steuerungssignale zu erhalten. Es müssen grundlegende Entscheidungen zur Netzwerktopologie und der verwendeten Software zur Übertragung der Daten getroffen werden.

Zwei voneinander getrennte Systeme müssen installiert werden. Am Ort des Pflegebetts ist dies das Robotersystem mit der nötigen Hard- und Software, welche Steuerungssignale empfängt und die Feedbackdaten an den Ort des Operators zurücksendet. Auf der anderen Seite ist das Fernsteuerungssystem für das Empfangen der Feedbackdaten und das Senden der Steuerungssignale zuständig.

Aufgrund des Anspruchs, die Fernsteuerung des Robotersystems von einem fernen Ort zu realisieren, müssen Technologien eingesetzt werden, die über das vorhandene öffentliche Netzwerk realisierbar sind. Demnach muss der Datenaustausch sowohl bei den Steuerungsdaten als auch bei den Feedbackdaten über Ethernet stattfinden. Da geringe Latenzen und Stabilität angestrebt werden, sollte die Übertragung über kabellose Schnittstellen möglichst vermieden werden.

Die Steuerung der Roboter am Pflegebett wird mit dem *Robot Operating System* (ROS) realisiert. Es ermöglicht innerhalb des Netzwerks am Pflegebett die Kommunikation mit den Roboterarmen in standardisierten Formaten. Dies erleichtert sowohl das Auslesen der Werte der roboterinternen Kraftsensorik, als auch die Eingabe der Steuerungsdaten.

Aufgrund des hohen Datenaufkommens, welches durch den Einsatz mehrerer Tiefenbildkameras zu erwarten ist, wird mit Google *Protocol Buffers* (ProtoBuf) [Goo21] eine Serialisierung verwendet, die es ermöglicht die Datenmengen über Ethernet an den Operator zu senden. ProtoBuf ist als Serialisierungsprotokoll in Hinblick auf den Austausch großer Datenmengen geeignet und bietet gegenüber ähnlichen Ansätzen Vorteile [PPMT16] [GDK11]. Die Serialisierung mit ProtoBuf ist flexibel über verschiedene Betriebssysteme und Programmiersprachen nutzbar, was bei der Integration der verschiedenen Systeme hilfreich ist. Für die Nutzung von ProtoBuf muss eine Datei angelegt werden, welche die gewünschten Datenfelder definiert. Diese Datei wird anschließend von einem Compiler in eine nutzbare Struktur umgewandelt, wobei die Zielprogrammiersprache vom Anwender definiert wird. Datenströme, die eine hohe Bandbreite benötigen werden in der Implementierung des hier beschriebenen Systems mit ProtoBuf versendet und empfangen. Daten, deren Versand keine Herausforderungen für Netzwerke darstellen, nutzen die Implementierung innerhalb von ROS.



### 5.4 Immersive Fernsteuerung

Die Fernsteuerung besteht aus zwei Komponenten. Zum einen ist das im Head-Mounted-Device (HMD) angezeigte visuelle Feedback für das Situationsbewusstsein zu nennen, zum anderen die Steuerung des Robotersystems über die VR-Geräte, wie Controller und Tracker. Für die Fernsteuerung des Robotersystems am Pflegebett muss eine Auswahl hinsichtlich der genutzten Sensoren für das Feedback und der Eingabegeräte getroffen werden. Aufgrund der Erkenntnisse aus der Literatur, dass die Nutzung von immersiven Technologien zur Fernsteuerung von Robotern geeignet ist (siehe z.B. [WRP<sup>+</sup>20]), wird diese Technologie bei der Implementierung des hier vorgestellten ferngesteuerten Robotersystems ebenfalls gewählt.

#### 5.4.1 Virtual Reality System

Es ist naheliegend, ein VR-System zu verwenden, das für visuelles Feedback geeignet ist und gleichzeitig die Möglichkeit bietet, über Controller Eingaben zu tätigen. Diese Geräte werden seit einigen Jahren für Unterhaltungszwecke kommerziell vertrieben. Die VR-Systeme unterschiedlicher Anbieter unterscheiden sich im generellen Aufbau dabei kaum. Systeme wie HTC *Vive*, Oculus *Quest*, Valve *Index* oder HP *Reverb* können mit zwei Handcontrollern erworben werden. Mit den Controllern werden Bewegungen in die virtuelle Szene übertragen. Integrierte Knöpfe können darüber hinaus mit zusätzlichen Funktionen belegt werden.

Aufgrund der Möglichkeit, die Controller mit weiteren Trackern zu ergänzen, wodurch eine höhere Auflösung möglich ist, wird in der Implementierung des hier vorgestellten ferngesteuerten Robotersystems der Typ HTC *Vive* eingesetzt. Weiterhin ist das System HTC *Vive* hinsichtlich der Genauigkeit der Position und Orientierung für wissenschaftliche Zwecke von Diederick et al. evaluiert [NLL17]. Auch Borges et al. bescheinigen diesem System eine hohe Genauigkeit von beispielsweise weniger als 0,5 mm Fehler in statischen Szenen [BSC<sup>+</sup>18].

Das VR-System HTC *Vive* besteht aus zwei Sensoren (*Lighthouse*), die für das Tracking zuständig sind, einem HMD und zwei VR-Controllern. Zusätzlich können Tracker hinzugefügt werden, die beispielsweise an den Unterarmen des Operators befestigt sind, womit das System die Möglichkeit bietet, neben den Händen weitere Körperteile zu verfolgen. Dies scheint bei der Steuerung von Robotern zielführend.

Somit ist ein System ausgewählt, welches eine hohe Genauigkeit bietet [BSC<sup>+</sup>18] und gleichzeitig mit zusätzlichen Trackern erweiterbar ist. Außerdem handelt es sich um ein etabliertes System, welches bereits verbreitet ist und sich nicht im Forschungsstadium befindet.

#### 5.4.2 Sensorik für optisches Feedback

Das HMD wird für die Darstellung der Sensordaten genutzt, welche die Grundlage des Feedbacks bilden. Die Kombination von Sensoren, die visuelle dreidimensionale Daten liefern und einem HMD ist für das Erhalten des nötigen Situationsbewusstseins für die Vorgänge vor Ort passend.

Die Arbeiten zur immersiven Robotersteuerung in Abschnitt 4.2 und den Tiefenbildkamerasystemen aus Abschnitt 4.3.1 belegen die Vorteile visueller dreidimensionaler Daten. Aus den unterschiedlichen Möglichkeiten diese Daten zu gewinnen, muss diejenige ausgewählt werden, die sich als Feedback zur Steuerung von Robotern eignet. Stereoskopische Sensoren, welche ähnlich wie beim menschlichen Sehapparat eine Abstandsinformation aus zwei versetzten Kameras ableiten, sind kostengünstig, leiden jedoch ab wenigen Metern Abstand zum erfassten Objekt unter zu hoher Ungenauigkeit [tSH<sup>+</sup>17] [HLH<sup>+</sup>17].

Bei Light Detection and Ranging (LiDaR)-Sensoren hingegen wird die Szene durch einen Laser gescannt, welcher intern durch einen Spiegel abgelenkt wird [CH07]. Dies ermöglicht gegenüber stereoskopischen Kameras höhere Genauigkeit bei höherer Auflösung und höherem Arbeitsabstand. Diese Technologie wird zum Beispiel für das Kartografieren von Terrain aus Flugzeugen genutzt [CH07]. Eine Bildwiederholrate, die videoähnliches Material ermöglicht, wird oftmals nicht erreicht. Mit dem Sensor Intel RealSense LiDaR [Rea21] ist ein erschwingliches LiDaR-System angekündigt, welches die Tiefenbilddaten mit Farbdaten mit einer akzeptabler Bildwiederholrfrequenz, Auflösung und Arbeitsabstand darstellt.

Ein ähnliches Prinzip wird bei Sensoren mit der Technologie Time-Of-Flight (TOF) angewandt. Hierbei wird ein Lichtimpuls von der Kamera ausgesendet, dessen Reflexion von Photodetektoren gleichzeitig empfangen wird. Durch die Verzögerung kann die Tiefeninformation abgeleitet werden [Mic21c]. Für den Einsatz im Innenraum und in Robotik ist diese Technologie für die Microsoft *Kinect v2* evaluiert [FBR<sup>+</sup>15]. Die Genauigkeit des Modells ist sowohl für Einzel- als auch Mehrkamerasysteme ausreichend [FBR<sup>+</sup>15] [KND15]. Der Einsatz eines Tiefenbildkamerasystems, bestehend aus mehreren Microsoft *Kinect v2* zur Erfassung von Patiententransfers in der Pflege ist innerhalb eigener Publikationen belegt [FBO<sup>+</sup>18] [FBF<sup>+</sup>21]. Auch die Nachfolgerversion *Azure Kinect (K4A)* ist nach ihrer Veröffentlichung im Jahr 2019 in Forschungsarbeiten zu finden. So zeigen Sohn et al. wie mithilfe einer K4A einem Robotermodell menschliche Bewegungsabläufe beigebracht werden können [SOLK20]. Dabei werden die Bewegungsabläufe eines Menschen von der Kamera aufgezeichnet und anschließend auf die Gelenke des Robotermodells übertragen [SOLK20]. In einer Gegenüberstellung der K4A, *Kinect v1* und *Kinect v2* bescheinigen Tölgyessy et al. der K4A eine Überlegenheit [TDCH21].

Der gleichzeitige Einsatz mehrerer *Azure Kinect (K4A)* ist zur Überwachung von Roboterbewegung aufgrund der Forschungsergebnisse mit dem Vorgängermodell [FBR<sup>+</sup>15] [KND15] [FBO<sup>+</sup>18] und der bisherigen Forschung zur erst 2019 veröffentlichten K4A [MSHZ20] [SOLK20] opportun. Für das visuelle Feedback der Umgebung am Pflegebett wird in dem hier vorgestellten ferngesteuerten Robotersystem eine Kombination aus mehreren K4As genutzt, welche um das Pflegebett verteilt werden und die Liegefläche des Betts erfassen. Die kolorierte dreidimensionale Punktwolke, die diesen Sensoren entstammt, wird dem Operator in einem HMD angezeigt.

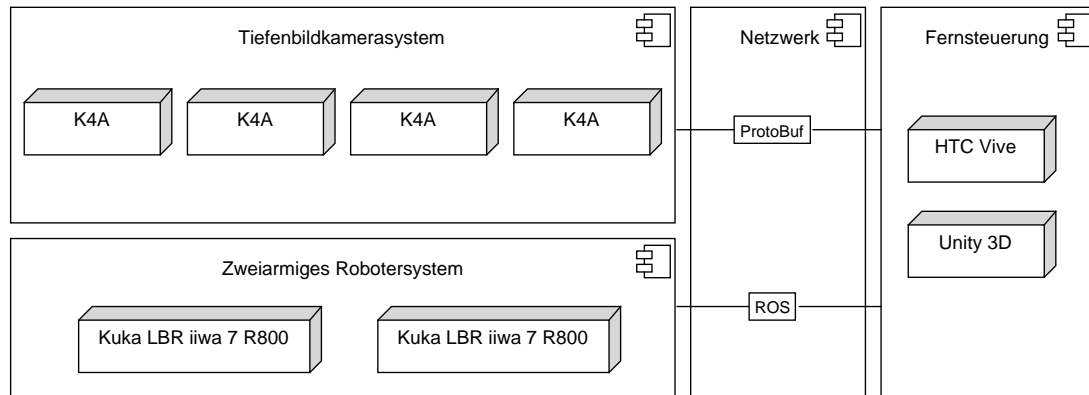
### 5.4.3 3D-Framework

Das Anzeigen dreidimensionaler Daten in einem HMD und die Erfassung der Bewegung des Nutzers des VR-Systems benötigt eine geeignete Softwareinfrastruktur. Für die Entwicklung von Com-

puterspielen oder Animationen werden üblicherweise Entwicklungsplattformen wie Unity Technologies *Unity 3D* oder Epic Games *Unreal Engine* genutzt. Diese Plattformen ermöglichen es, mit geringem Aufwand virtuelle Szenen zu erschaffen. Weiterhin funktioniert das Einbinden von VR-Systemen im Plug-and-Play-Prinzip, ohne das Programmieraufwand für die Einbindung der VR-Geräte notwendig wird. Aufgrund der Anforderung an diese Plattformen, Spiele und Animationen möglichst ressourcenschonend darzustellen, ist deren Einsatz bei der Anzeige von dreidimensionalen Punktwolken ebenfalls angebracht. Eine komplette Eigenentwicklung inklusive einer Plattform für 3D-Anwendungen und VR ist nicht zielführend. Obwohl die Plattformen *Unity 3D* und *Unreal Engine*, von der technischen Seite her betrachtet, wahrscheinlich ähnliche Ergebnisse liefern würden, wird zur Erreichung der Ziele des, in dieser Arbeit beschriebenen, ferngesteuerten Robotersystems *Unity 3D* gewählt. Hierfür spricht unter anderem, dass in der Roboterforschung oft auf die Plattform *Unity 3D* zurückgegriffen wird [BSFS15] [JCAA18] [YBZ20] und so bereits Erkenntnisse aus vorhandenen Forschungsarbeiten mit einbezogen werden können. In Kombination mit ROS sind ebenfalls einige Beispiele zu finden, in denen die Funktionen von *Unity 3D* zum Tragen kommen [HGO18] [CFS<sup>+</sup>14].

### 5.5 Komponentenübersicht

Das Robotersystem besteht aus mehreren Hauptkomponenten. Vor Ort, am Pflegebett, ist der zweiarmige Roboter installiert, durch den der Operator einen zweiten Pfleger nachbilden kann. Das Pflegebett und dessen Umfeld wird von einem Tiefenbildkamerasystem überwacht. Die Fernsteuerung, die vom Operator genutzt wird um die Roboter auf Grundlage der Daten des Tiefenbildkamerasystems zu bewegen, kann sich an einem räumlich getrennten Ort befinden. Die Verbindung der beiden getrennten Systeme findet über herkömmliche Ethernetverbindungen in einem spezialisierten Netzwerk statt, wobei die Daten mit den Netzwerkprotokollen von ROS und ProtoBuf ausgetauscht werden. In Abbildung 5.3 sind die Komponenten des Gesamtsystems dargestellt, die zur Realisierung ausgewählt wurden.



**Abbildung 5.3:** Die ausgewählten Hauptkomponenten des Gesamtsystems in einer groben Geräteübersicht. Das Tiefenbildkammersystem basiert auf den vier Tiefenbildkameras vom Typ K4A. Das Robotersystem wird durch zwei Roboterarme des Typs Kuka *LBR iiwa 7 R800 touch electrical* realisiert. In einem spezialisierten Netzwerk werden Daten mithilfe der Protokolle von *Robot Operating System (ROS)* und *Protocol Buffers (ProtoBuf)* ausgetauscht. Für die Fernsteuerung wird das VR-System *HTC Vive* eingesetzt und die Entwicklungsplattform *Unity 3D* wird zur Programmierung eingesetzt.

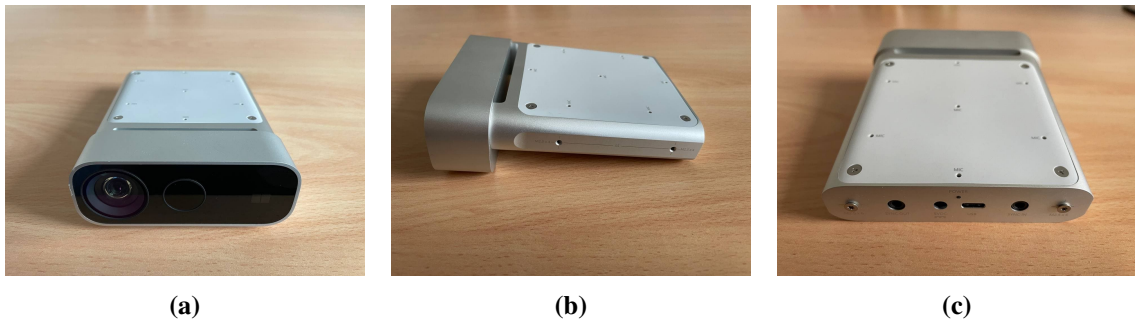
# Kapitel 6

## Implementierung

Dieses Kapitel beschreibt die Implementierung des, in den vorangegangenen Kapiteln konzeptuell beschriebenen, ferngesteuerten Robotersystems. Das System besteht aus drei Subsystemen. Für das visuelle, dreidimensionale Feedback, welches dem Operator in einem HMD angezeigt wird, ist zunächst das Multi-K4A-System zu entwickeln (Abschnitt 6.1). Die Realisierung der Robotersteuerung, die ebenfalls die Installation des zweiarmigen Robotersystems beinhaltet, ist in Abschnitt 6.2 beschrieben. Die Integration dieser beiden Systeme in eine VR-Umgebung und die Steuerung der Roboter in dieser verbindet die beiden Subsysteme (Abschnitt 6.3). Das Kapitel schließt mit einer Übersicht über das Gesamtsystem mit Abschnitt 6.4.

### 6.1 Multi-K4A-System

Tiefenbildkamarasysteme können im Gegensatz zu herkömmlichen Kameras die Positionen von Objekten im Raum ermitteln. Ist auf einem herkömmlichen Bild eine Reihe von Gegenständen zu sehen, ist ohne zusätzliche Hilfsmittel oder Informationen deren Position in Relation zur Kamera nicht eindeutig bestimmbar. Eine Tiefenbildkamera hingegen erlaubt es einen Abstandswert zur Kamera anzugeben. Aus den Tiefenbilddaten kann eine dreidimensionale Punktwolke errechnet werden. Weiterhin kann diese Punktwolke mit den Farbdaten einer herkömmlichen Kamera kolloriert werden. Aufgrund dieser Daten bieten sich bei der Auswahl eines Kameratyps für die Fernsteuerung von Robotern Tiefenbildkamaras an. Durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Tiefenbildkamaras können Verdeckungen einzelner Kameras abgefangen werden und die Datendichte erhöht werden. Aus diesem Grund fällt die Wahl auf ein Tiefenbildkamarasystem bestehend aus vier Tiefenbildkamaras des Typs *Azure Kinect* (K4A). Die Spezifikationen der Kamera, das Hardwaresetup des Multi-K4A-Systems sowie die Registrierung und die softwareseitige Realisierung werden in diesem Abschnitt vorgestellt.



**Abbildung 6.1:** Die Azure Kinect (K4A) von verschiedenen Seiten ohne die mitgelieferte Abdeckung. Bei der Vorderseite (a) ist links am äußersten Rand die Farbkamera und rechts daneben die Tiefenkamera zu sehen. Seitlich (b) sind Fassungen für die Montage eingelassen. Die Anschlüsse sind in Abbildung (c) zu erkennen. Von links nach rechts im Bild sind diese SyncOut, Spannungsversorgung, USB-C und SyncIn. Auf der Oberseite der K4A sind die Mikrofone eingelassen.

### 6.1.1 Azure Kinect Spezifikationen

Die Microsoft K4A ist eine von Microsoft entwickelten Tiefenbildkamera. Es ist bereits die dritte Version dieser Art, die von Microsoft veröffentlicht wurde. Die vorherigen Versionen sind ursprünglich für den Einsatz an Spielkonsolen vorgesehen gewesen. Diese wurden jedoch auch in vielen weiteren Anwendungsfällen, beispielsweise in der Roboterforschung [FBR<sup>+</sup>15], genutzt. Die K4A, welche 2019 veröffentlicht wurde, ist nicht mehr für Computerspiele beworben, sondern für Anwendungen in den Fachbereichen Gesundheitswissenschaften, Verkauf, Logistik und Robotik [Mic21a].

#### Aufbau und Funktion

Die K4A ist ein multimodaler Sensor, welcher verschiedene Sensordaten liefern kann. Neben der Rot-Grün-Blau (RGB)-Kamera und der Tiefenbildkamera, die gleichzeitig eine Infrarotkamera ist, sind Gyroskop und Accelerometer sowie ein Mikrofonfeld verbaut (siehe Abbildung 6.1). Durch eine 3,5 mm Buchse an der Rückseite der Kamera können mehrere K4As zusammenschaltet werden, um Interferenzen zwischen den Kameras zu vermeiden [Mic21d] [Mic21e] (siehe Abschnitt 6.1.1). In der Implementierung des hier beschriebenen ferngesteuerten Robotersystems werden nur die Tiefenbilddaten und RGB-Daten verarbeitet. Der intern verbaute Tiefenbildsensor ist von Bamji et al. beschrieben [BMT<sup>+</sup>18].

Die K4A nutzt die Time-Of-Flight (TOF)-Methode zur Datenakquise [Mic21c]. Bei dieser Art der Datenakquise wird ein modulierte Nahinfrarotlicht emittiert und die Verzögerung der Reflexion gemessen. Dadurch entsteht eine Tiefenkarte [Mic21c]. Die Infrarotdaten können weiterhin für Applikationen mit wenig Licht für 2D-Bildgebung verwendet werden.

### Betriebsmodi

Die K4A kann in verschiedenen Betriebsmodi eingesetzt werden. Diese unterscheiden sich in Auflösung, Blickwinkel und Bildwiederholfrequenz [Mic21d]. Die Tabellen 6.1 und 6.2 enthalten jeweils eine Übersicht über die Betriebsmodi von Tiefenbildsensor und RGB-Kamera. Die Bezeichnung „binned“ bedeutet, dass mehrere Pixel (hier  $2 \times 2$  [Mic21d]) zusammengefasst werden. Aufgrund des Anwendungsfalls in dieser Arbeit müssen Betriebsmodi ausgewählt werden, welche den Arbeitsraum am Pflegebett abbilden können und über eine genügend hohe Bildwiederholfrequenz verfügen. Es wird sich daher im Verlauf der Arbeit hauptsächlich auf Near Field of View (NFOV) unbinned und 30 fps-Varianten des Tiefenbilds beschränkt. Dies setzt ein Seitenverhältnis von 10:9 fest. Um die im nächsten Abschnitt erklärte Überlagerung von Farbbild- und Tiefenbilddaten zu optimieren, müssen sich die Seitenverhältnisse von Farbbild und Tiefenbild ähneln. Deswegen wird für die RGB-Kamera der Modus  $2048 \times 1536$  gewählt.

**Tabelle 6.1:** Mögliche Modi der Tiefenbildkamera [Mic21d]. **Modus:** Tiefenbildmodus, Near Field of View (NFOV), Wide Field of View (WFOV), binned: Zusammengefasst, **A:** Auflösung, **BR:** maximale Bildwiederholfrequenz, **BW:** Blickwinkel, **AA:** Arbeitsabstand.

Modus	A [px]	BR [fps]	BW [°]	AA [m]
NFOV unbinned	640 * 576	30	75 * 65	0,5 - 3,86
NFOV binned	320 * 288	30	75 * 65	0,5 - 3,86
WFOV binned	512 * 512	30	120 * 120	0,25 - 2,88
WFOV unbinned	1024 * 1024	15	120 * 120	0,25 - 2,21

**Tabelle 6.2:** Mögliche Modi der RGB-Kamera [Mic21d]. **A:** Auflösung, **BR:** maximale Bildwiederholfrequenz, **BW:** Blickwinkel, **VH:** Verhältnis.

A [px]	BR [fps]	BW [°]	VH
3840 * 2160	30	90 * 59	16:9
2560 * 1440	30	90 * 59	16:9
1920 * 1080	30	90 * 59	16:9
1280 * 720	30	90 * 59	16:9
4096 * 3072	15	90 * 74,3	4:3
2048 * 1536	30	90 * 74,3	4:3

### Generierung von kolorierten dreidimensionalen Punktwolken

Für die Arbeit mit VR-Technologien ist der Eindruck der Tiefe erforderlich. Dieser kann entstehen, wenn die Tiefenbilddaten der K4A zu Punktwolken umgewandelt werden. Für jede einzelne K4A ist intern eine Look-Up-Table (LUT) hinterlegt, mit der dreidimensionale Punkte aus den Tiefenbilddaten generiert werden können.

Weiterhin sollen diese Punktwolken koloriert werden, was mithilfe der internen RGB-Kamera erreicht wird. Da RGB-Kamera und Tiefenbildkamera an der K4A versetzt montiert sind, muss eine Transformation zwischen den Koordinatensystemen erfolgen.

Zwei unterschiedliche Möglichkeiten, diese Transformation durchzuführen, stehen zur Verfügung:

- **Tiefenbild zu Farbbild:** Hierbei wird die Tiefeninformation vom Koordinatensystem der Tiefenbildkamera ins Koordinatensystem der RGB-Kamera transformiert. Die Auflösung des Tiefenbildes wird artifiziell erhöht, da Tiefenwerte mithilfe des RGB-Bildes geschätzt werden. Das so entstehende Tiefenbild hat die Auflösung des ausgewählten RGB-Kamera Modus [Mic21f].
- **Farbbild zu Tiefenbild:** Die Farbinformation vom Koordinatensystem der RGB-Kamera wird hier ins Koordinatensystem der Tiefenbildkamera transformiert. Die Auflösung des Farbbildes wird dabei verringert und auf den Wert des Tiefenbildes gebracht. Die Auflösung des Tiefenbildes und dessen Pixelwerte werden nicht verändert [Mic21f].

Die Wahl der Transformation beeinflusst die Auflösung des Tiefenbilds und damit letztendlich auch die Anzahl der Punkte in der dreidimensionalen Punktwolke. In dieser Arbeit wird die Transformation **Farbbild zu Tiefenbild** genutzt, da durch sie keine artifiziellen Tiefenbildinformationen entstehen.

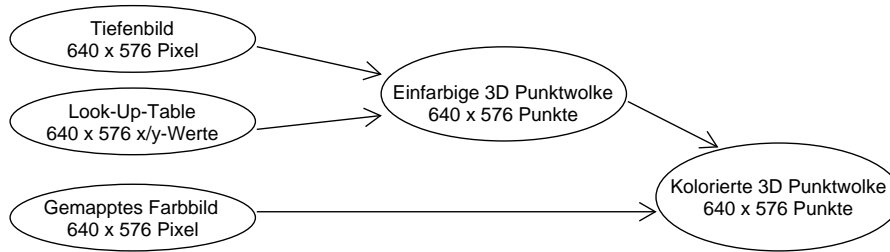
Aus den transformierten Daten kann mithilfe der Linsenparametern der K4A eine dreidimensionale, kolorierte Punktwolke entstehen, welche eine Auflösung je nach Transformationsmethode und gewählten Kameramodi besitzt. Diese Parameter sind innerhalb jeder K4A in einer Look-Up-Table (LUT) gespeichert.

In Gleichung 6.1 besteht die LUT  $L$  beim Tiefenbildkameranodus NFOV unbinned und Transformation von Farbbild zu Tiefenbild aus  $640 * 576$  Zweiertupeln, welche jeweils mit den  $640 * 576$  Pixeln des Tiefenbildes  $D$  multipliziert werden. Der Ablauf ist in Abbildung 6.2 schematisch dargestellt<sup>1</sup>. Für jedes Pixel im Tiefenbild wird so ein Punkt  $P_{XYZ}$  im dreidimensionalen Raum errechnet, siehe Gleichung 6.1.

$$P_{XYZ} = L(z) * D(z); 0 \leq z < 368640 \quad (6.1)$$

<sup>1</sup>**Anmerkung:** Neben der Umrechnung von Tiefenbilddaten zu Positionsdaten mithilfe der LUT ist es auch möglich, durch externe Programme unter Zuhilfenahme von Mustern zu kalibrieren. Hierfür können Schachbrettmuster genutzt werden. In der Entstehung der hier vorliegenden Forschungsarbeit durchgeführte Tests liefern bei dieser Methode, verglichen mit der Verrechnung mithilfe der LUT, mangelhafte Ergebnisse bezüglich der Genauigkeit der Punktwolke, sodass von ihr abgesehen wird.





**Abbildung 6.2:** Kombination der Datenstreams mit der Look-Up-Table (LUT) im Modus Near Field of View (NFOV) unbinned. Für die Erzeugung einer kolorierten dreidimensionalen Punktwolke wird das Tiefenbild mit der LUT verrechnet. Anschließend wird das gemappte Farbbild für die Kolorierung auf die dreidimensionalen Daten gelegt.

### Externe Synchronisierung

Das von der K4A ausgesendete Licht zur Erfassung der Tiefeninformation stört möglicherweise andere K4As, die den selben Raum erfassen. Bei Aufbauten mit mehreren K4A muss daher eine externe Synchronisierung stattfinden. Dies findet in einem Master-Slave-System statt, wobei die Slaves als Subordinaten bezeichnet werden. Zu diesem Zweck sind in der Rückseite der K4A Synchronisierungsports eingelassen (siehe Abbildung 6.1). Es ist sowohl ein eingehender Anschluss SyncIn als auch ein ausgehender Anschluss SyncOut vorhanden. Im Zusammenschluss der K4As gibt es einen Master und (mehrere) Subordinaten [Mic21e]. Zwischen der Master-K4A und der darauffolgenden Subordinaten-K4A wird eine feste Verzögerung eingestellt, sodass sich die beiden Kameras bei der Aufnahme der Tiefeninformation nicht interferieren. Durch die physische Verkablung kann so eine Kette oder ein Sternnetzwerk von K4As erstellt werden [Mic21e]. In der Implementierung in dieser Arbeit wird eine Kette gewählt, in der von Kamera zu Kamera eine feste Verzögerung eingestellt ist. In der Dokumentation der K4A wird aufgrund der technischen Daten des Tiefenbildsensors eine Verzögerung von mindestens 160  $\mu\text{s}$  empfohlen [Mic21e], welche hier ebenfalls gewählt wird.

### 6.1.2 Hardwaresetup

Auch wenn Tiefenbildkameras mehr Informationen bieten als herkömmliche Kameras, können sie weiterhin leicht verdeckt werden. Dies kann beispielsweise geschehen, wenn ein Pfleger vor einer der Tiefenbildkameras steht. Der Einsatz mehrerer Tiefenbildkameras in einer beweglichen Szene hat daher entscheidende Vorteile gegenüber Einzelkamelalösungen. Wird die Tiefenbildkamera durch Menschen, Gegenstände oder Roboterarme verdeckt, so kann der Operator das Geschehen nicht mehr wahrnehmen und die Robotersteuerung müsste deaktiviert werden. Aufgrund dieser Überlegung werden insgesamt vier K4As zusammengeschaltet. Diese Anzahl ist gewählt, weil dadurch bis zu drei Verdeckungsquellen wie zum Beispiel Pfleger, Patient oder Roboterarm kom-

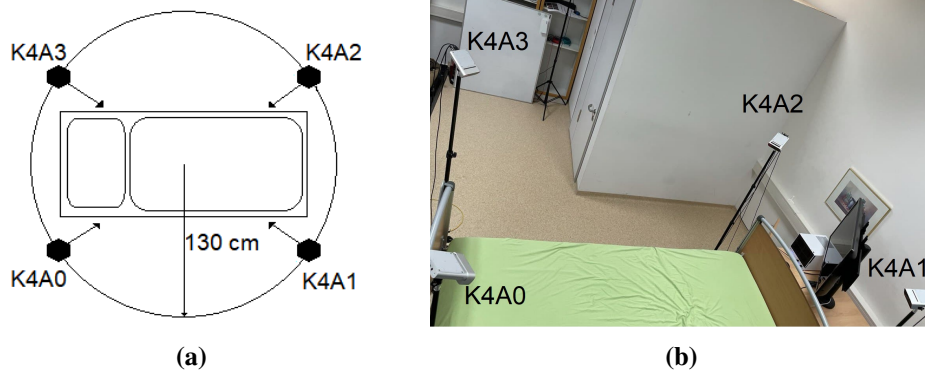
pensiert werden können. Die Wahrscheinlichkeit, dass unbeabsichtigt alle vier Tiefenbildkameras verdeckt werden, wird als gering angesehen. Weitere Tiefenbildkameras würden die Datenqualität unerheblich verbessern und den ohnehin großen Rechen- und Darstellungsaufwand unnötig erhöhen.

### **Kamerapositionierung**

Bei der Positionierung der vier K4As gilt es, den Arbeitsraum am Pflegebett abzudecken und gleichzeitig die Spezifikationen der offiziellen Dokumentation [Mic21c] zu berücksichtigen. Die Erkenntnisse zur Qualität der Tiefenbildaten von Tölgyessy et al. [TDCH21] und die Fehlerberechnung der K4A-Dokumentation [Mic21c] müssen in die Überlegung mit einbezogen werden (siehe Abschnitt 7.1.1). Tests mit der vorherigen Kameraversion *Kinect v2* von Fankhauser et al. [FBR<sup>+</sup>15] sollten aufgrund der ähnlichen Funktion der Sensoren ebenfalls berücksichtigt werden. Es empfiehlt sich aufgrund der zu erwartenden Abnahme der Qualität der Tiefeninformation, mit erhöhter Distanz zur Kamera, diese so zu positionieren, dass der voraussichtliche Arbeitsraum fokussiert wird. Da auch am Rand des Tiefenkamerabilds mit verminderter Qualität zu rechnen ist, müssen die K4A das Pflegebett mittig fokussieren. Der Winkel der Kameras gegenüber dem Boden muss einerseits so angepasst werden, dass die Tiefenbildkameras möglichst viele Informationen liefern können und andererseits die genannten Einschränkungen nicht außer Acht gelassen werden. Es wird eine, den anderen übergeordnete, Haupt-K4A ausgewählt (K4A0), die sich am Kopfende, vom Patient aus rechts, befindet. Dies ist für die später erläuterte Synchronisierung der K4As notwendig. Aufgrund der ständigen Okklusion durch das höhenverstellbare Pflegebett, die Roboterarme und die Pflegekraft wird folgendes Setup (siehe Abbildung 6.3) für die Installation der Tiefenbildkameras gewählt:

- Die vier K4As werden in 20 cm Abstand zu den Ecken des Pflegebetts in einem Radius von 130 cm Entfernung vom Mittelpunkt der Liegefläche installiert.
- Die vier K4As befinden sich in einer Höhe von 180 cm.
- Die vier K4As fokussieren den Mittelpunkt der Liegefläche des Betts durch eine Neigung von 52° sofern die Liegeflächenoberkante eine Höhe von 75 cm aufweist.

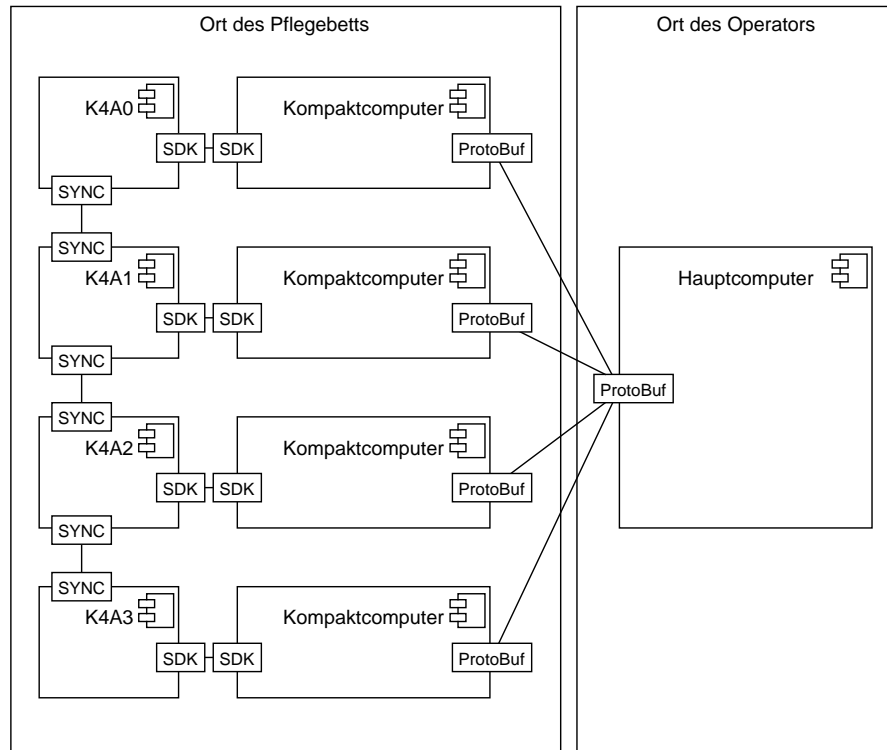
Die Kamerapositionierung kann je nach Größe des Raumes auch anders gewählt werden. Die Angaben des Herstellers bezüglich der Genauigkeit sollten jedoch beachtet werden. In dieser Arbeit wird der beschriebene Aufbau genutzt.



**Abbildung 6.3:** Die Positionierung der vier K4As im Pflegelabor der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Die Kameras sind 130 cm vom Mittelpunkt der Liegefläche entfernt, auf 180 cm Höhe und  $52^\circ$  geneigt. K4A0 ist die Master-K4A.

### Netzwerktopologie

Jede K4A ist über einen Adapter sowohl mit Spannung versorgt und über USB mit jeweils einem Kompaktcomputer, unter der Nutzung des K4A Software Development Kit (SDK), verbunden. Weiterhin werden die K4As mit AUX-Kabeln untereinander synchronisiert. Die vier Kompaktcomputer sind über CAT5 Kabel via Ethernet an einen Hauptcomputer angeschlossen. Es wird die Schnittstelle Google ProtoBuf (siehe Abschnitt 6.1.4) genutzt. Der Hauptcomputer befindet sich auf der Seite des Operators. In Abbildung 6.4 ist die Netzwerktopologie dargestellt.



**Abbildung 6.4:** Die Netzwerktopologie hinsichtlich des gesamten Tiefenbildkameranetsystems. K4A0 ist die Masterkamera, die bei der Synchronisation der Kameras als Master dient.

### Computerkomponenten

Innerhalb des Multi-K4A-Systems existieren zwei Arten von Computern (siehe Abbildung 6.4): Kompaktcomputer und Hauptcomputer. Die Kompaktcomputer sind dafür zuständig, die Daten der K4As zu akquirieren und in geeigneten Datencontainern über das Netzwerk zum Hauptcomputer zu senden. Der Hauptcomputer empfängt die Daten und wandelt sie in Datenformate um, die es ermöglichen eine kolorierte dreidimensionale Punktwolke in einer virtuellen Umgebung anzuzeigen.

Die Kompaktcomputer verfügen über folgende Hardware:

- **Prozessor:** Intel® Core™i5-9500F
- **Mainboard:** Asus PRIME H310I-Plus R2.0/CSM
- **Arbeitsspeicher:** G.Skill DIMM 16GB DDR4-2400 Kit
- **Hintergrundspeicher:** Corsair Force MP510 240 GB, SSD
- **Grafikkarte:** MSI Nvidia GeForce RTX 2070 SUPER VENTUS OC

Diese leistungsfähige Hardware ist notwendig, um die Funktionen der K4A umfänglich zu nutzen. Die Mindestanforderungen an die Hardware, die von Microsoft gestellt werden, sind erfüllt [Mic21b]. Eine Grafikkarte mit einer leistungsfähigen Graphics Processing Unit (GPU) muss gewählt werden, um zwischen der Akquise und dem Versenden der Daten möglichst wenig Latenz zu generieren<sup>2</sup>.

Der Hauptcomputer muss die ankommenden Datenstreams der Kompaktcomputer empfangen und verarbeiten. Zusätzlich müssen aus den ankommenden Daten kolorierte dreidimensionale Punktwolken entstehen. Diese müssen zeitnah nach dem Eintreffen generiert werden. Weiterhin muss vom Hauptcomputer die Integration des VR-Systems übernommen werden. Mit leistungsfähiger Hardware, die allgemein für die VR-Anwendungen geeignet ist, ist es möglich, diesen Aufgaben gerecht zu werden.

Der Hauptcomputer verfügt über folgende Hardware:

- **CPU:** Intel® Core™ i7-10700K
- **Mainboard:** ASUS TUF B460-PLUS
- **RAM:** G.Skill DIMM 32GB DDR4-2933 Kit
- **Hintergrundspeicher:** SanDisk SDSSDA480G
- **GPU:** EVGA GeForce RTX 2080 Super

Zusätzlich ist im Hauptcomputer eine Servernetzwerkkarte verbaut, welche die Gefahr verringert, dass die Übertragung über den Netzwerkport des Mainboards zu einem Flaschenhals wird. Die hohen Datenübertragungsraten könnten den mainboard-eigenen 1 Gbit/s LAN-Port überlasten.

---

<sup>2</sup>**Anmerkung:** Tests mit einer Nvidia *GeForce GTX 1080* GPU statt der Nvidia *GeForce RTX 2070 SUPER* sorgen für eine erhebliche Verringerung des Datenstroms zum Hauptcomputer. Dies äußert sich in verspätet ankommenden Daten und ist auf mangelnde Leistung der GPU zurückzuführen.

### 6.1.3 Registrierung

Bevor die bereitgestellten Daten der vier K4As genutzt werden können, müssen die generierten Punktwolken zueinander ausgerichtet, sprich registriert werden. Diese Registrierung kann auf mehrere Weisen erfolgen. Mit Markierungen beklebte Objekte, wie beim Tiefenbildkamerasystem von Kowalski et al. [KND15], sind möglich. Das Einbringen von Objekten einer bestimmten Form ist ebenfalls zielführend, um die Ausrichtung der K4As zueinander zu berechnen. Bei der Nutzung von Objekten wird direkt auf die dreidimensionalen Punktwolkendaten zugegriffen. Es liegt somit keine Abhängigkeit von möglichen Ungenauigkeiten beim Mapping zwischen Farb- und Tiefenbilddaten vor.

In dieser Arbeit wird ein sphärisches Objekt (Styroporkugel) an drei unterschiedlichen Orten nacheinander in den überwachten Bereich eingefügt. Diese Kugel wird in der Punktwolke jeder einzelnen K4A erkannt und ihr Mittelpunkt berechnet. Dafür muss zunächst jede einzelne Punktwolke segmentiert werden, was durch die Anwendung des Region-Growing-Algorithmus [Poi21a] aus der Point Cloud Library [RC11] geschieht. Von jeder K4A werden drei unterschiedliche Kugelpositionen erfasst. Diese Kugelpositionen sind je Kamera in der aufgenommenen Reihenfolge sortiert ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ). Alle drei aufgenommenen Punkte werden anschließend je Kamera mit der Position des ersten der drei aufgenommenen Punkte subtrahiert, sodass sich  $p_1$  auf dem jeweiligen Kamerakoordinatenursprung befindet. Die Vektoren die von diesem Koordinatenursprung auf die Punkte  $p_2$  und  $p_3$  zeigen, werden als  $x$ - und  $y$ -Achse eines Modellkoordinatensystems herangezogen. Die  $z$ -Achse wird implizit durch die Rechte-Hand-Regel festgelegt. Auf diese Weise entsteht ein Modellkoordinatensystem für jede K4A, welches sich aus den drei gefundenen Positionen des sphärischen Objekts ergibt. Die Transformation der jeweiligen Modellkoordinatensysteme zu den jeweiligen Kamerakoordinatenursprüngen kann bestimmt werden. Eine initiale Transformation vom Basiskoordinatensystem ( $basis$ ) zur K4A, die als Wurzel fungiert (K4A0) ist fest definiert. Sobald die Rotation mit  $Rot_{(basis,k4a_i)}$  für jede K4A ( $i$ ) berechnet ist, kann die Rotation zwischen zwei Modellkoordinatensystemen unterschiedlicher K4As durch die Formel 6.2 berechnet werden.

$$Rot_{(k4a_i,k4a_j)} = Rot_{k4a_i}^{-1} * Rot_{k4a_j} \quad (6.2)$$

Bei der Berechnung der Translation zwischen zwei K4As wird der erste aufgenommene Punkt  $p_1$  herangezogen (siehe Formel 6.3). Dieser wird von zwei unterschiedlichen K4As, vom Kameraursprung aus, an unterschiedlichen Positionen erkannt.

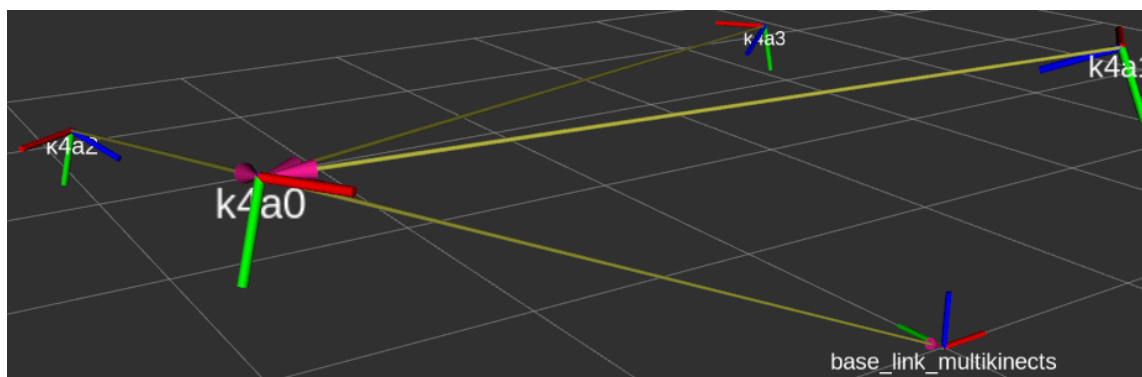
$$Trans_{(k4a_i,k4a_j)} = \begin{bmatrix} p1(x)_{k4a_i} \\ p1(y)_{k4a_i} \\ p1(z)_{k4a_i} \end{bmatrix} - Rot_{(k4a_i,k4a_j)} \begin{bmatrix} p1(x)_{k4a_j} \\ p1(y)_{k4a_j} \\ p1(z)_{k4a_j} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Aus dem Rotations- und Translationsanteil kann eine Transformation zusammengesetzt werden (siehe Formel 6.4), welche es erlaubt eine grobe Transformation zwischen zwei K4As des Systems zu berechnen.

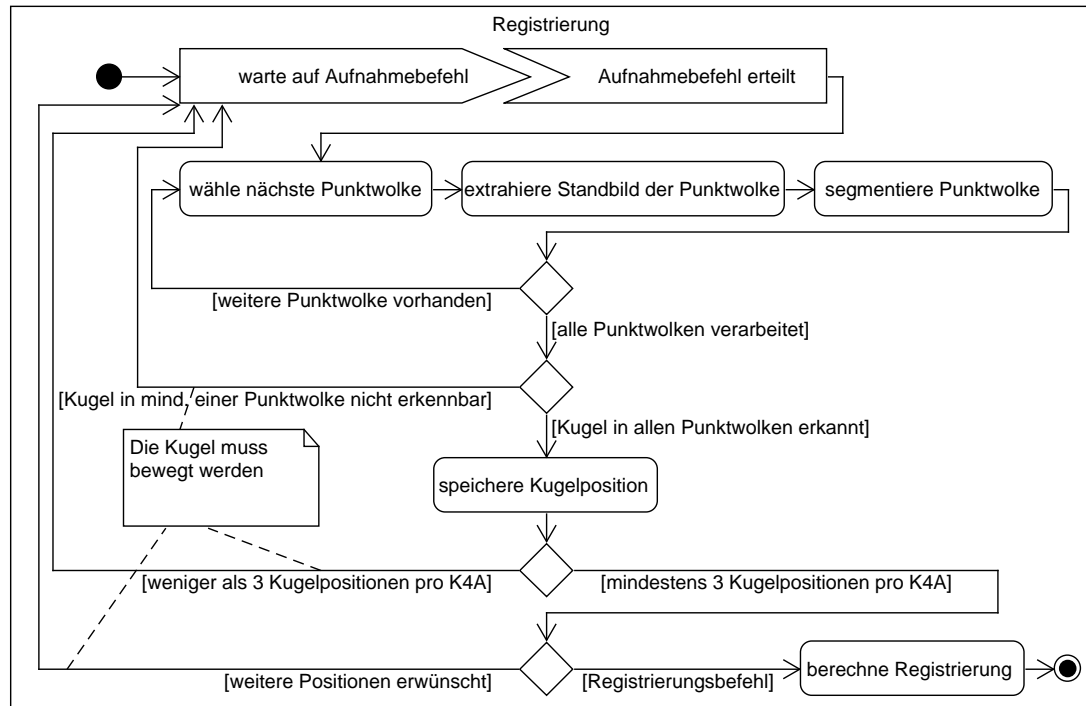
$$T_{(k4a_i, k4a_j)} = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} & t_0 \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} & t_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Alle K4As nehmen demnach das selbe Dreieck aus Kugelpositionen auf, welches jedoch translatiert und rotiert ist. Wenn die vier Dreiecke durch die Transformation der Koordinatensysteme der K4As passend übereinandergelegt werden, entsteht eine Überlagerung der Punktwolken. Dies stellt die grobe Registrierung dar. Die Transformationen sind, wie in Abbildung 6.5 dargestellt, sternförmig von K4A0 ausgehend. Zwischen K4A0 und *base\_link\_multikinects* als Ursprung ist fest die Transformation fest definiert und korrespondiert mit der Montagehöhe von K4A0.

Nach dieser groben Registrierung wird eine Feinpositionierung der vier Punktwolken durch einen Algorithmus zur Überlagerung dreidimensionaler Objekte genutzt. Der Iterative Closest Point (ICP)-Algorithmus, der seit längerer Zeit Anwendung findet [RL01] wird hier in einer Variante [Poi21b] aus der Point Cloud Library [RC11] eingesetzt. Die gesamte Berechnung der Registrierung findet in einem ausgelagerten ROS-System statt. Die Transformationen zwischen dem Ursprungskordinatensystem und den einzelnen K4As (siehe Abbildung 6.5) wird nach Abschluss der Registrierung auf dem Hauptcomputer hinterlegt, sodass die Transformationsdaten innerhalb des später vorgestellten Programms in *Unity 3D* genutzt werden können. In Abbildung 6.6 ist dieser Ablauf dargestellt. Eine Evaluation der Genauigkeit ist in Abschnitt 7.1.1 beschrieben. Unbedingte Voraussetzung dafür ist, dass ein ausreichend großes Volumen des überwachten Raums von allen Kameras abgedeckt wird.



**Abbildung 6.5:** Die Koordinatensysteme der vier K4As im Raum. Die Kamera K4A0 bildet die Wurzel für die weiteren Kameras und ist einem Referenzkoordinatensystem (*base\_link\_multikinects*), welches sich auf dem Basiskoordinatensystem befindet, untergeordnet.



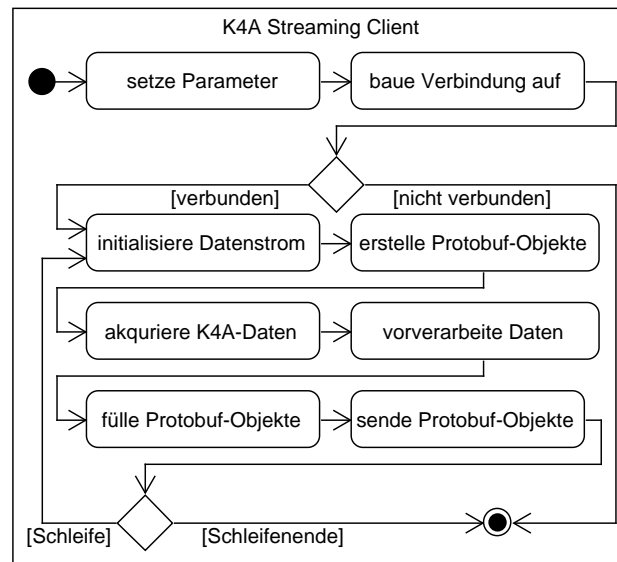
**Abbildung 6.6:** Der Ablauf der Registrierung. Die Styroporkugel muss zunächst in die Szene eingebracht werden. Nach der Eingabe des Aufnahmebefehls wird für jede einzelne *Azure Kinect* (K4A) ein Standbild der nächsten verfügbaren Punktwolke extrahiert und segmentiert. Sofern es weitere zu verarbeitende Punktwolken gibt, werden diese Schritte wiederholt. Anschließend wird in allen verarbeiteten Punktwolken nach der Kugel gesucht. Sollte diese in mindestens einer Punktwolke nicht auffindbar sein, muss die Prozedur nach Korrektur der Kugelposition erneut stattfinden. Sofern die Kugel in allen Punktwolken erkannt wird, werden diese Positionen abgespeichert und der Vorgang muss mit mindestens zwei weiteren Kugelpositionen erneut starten. Sobald mindestens drei Kugelpositionen verarbeitet wurden, kann die Registrierung berechnet werden.

#### 6.1.4 Kompaktcomputer Implementierung

Die Kompaktcomputer dienen der Verarbeitung und dem anschließenden Versenden der K4A-Daten. An diese Computer ist jeweils eine K4A angeschlossen. Eine detaillierte Übersicht der Positionen der Kompaktcomputer im Gesamtnetzwerk kann Abbildung 6.4 entnommen werden. Die Daten der K4As werden mit der Version 1.3 des K4A Software Development Kit (SDK) empfangen. Die Kompaktcomputer werden mit dem Betriebssystem Ubuntu 18.04 betrieben. Jeder Kompaktcomputer ist mit einer K4A via USB 3.0 verbunden. Das SDK bietet Funktionen an, um die Datenstreams zu akquirieren, abzuspeichern oder weiterzuverarbeiten. Der C++ Code, welcher



auf jedem der vier Kompaktcomputer ausgeführt wird, ist in Methoden strukturiert, welche die Abarbeitung der Datenströme Tiefenbild und Farbbild sequentiell durchführt und Datencontainer vorbereitet. Die Datencontainer werden mithilfe der Serialisierung von Google *Protocol Buffers* (ProtoBuf) erstellt. Diese werden anschließend über eine Transfer Control Protocol (TCP) Verbindung an den Hauptcomputer gesendet. Das Ablaufdiagramm 6.7 zeigt die Prozedur in vereinfachter Form.



**Abbildung 6.7:** Der K4A Streaming Client, ausgeführt auf jedem Kompaktcomputer. Nach dem Setzen der Parameter wird eine Verbindung zum Hauptcomputer hergestellt. Falls dies möglich ist, wird der Datenstrom initialisiert und die Protobuf-Objekte werden erstellt. Die von der K4A akquirierten Daten durchlaufen eine Vorverarbeitung, werden in die Protobuf-Objekte eingefügt und anschließend versendet. Dieser Vorgang wiederholt sich bis das Programm extern beendet wird. Das erste Datenpaket welches an den Hauptcomputer versendet wird, enthält zudem einmalig eine LUT, welche notwendig ist, um die Tiefenbilddaten in Positionen im Raum umzurechnen.

Zum Starten des Programms müssen Parameter gesetzt werden. Die Werte können entweder beim Konsolenauf Ruf des Programms eingetragen werden oder in einem vordefinierten Skript. Dies hat den Vorteil, dass der gleiche Code auf den verschiedenen Kompaktcomputern ausgeführt werden kann, ohne dass das Editieren des C++ Codes notwendig wird.

Folgende Parameter können gesetzt werden:

- IP-Adresse des zugehörigen Netzwerkports des Hauptcomputers
- K4A-Nummer
- Bildwiederholrate
- Tiefenbildmodus
- Synchronisierungsmodus

Die IP-Adresse wird benötigt, um eine Verbindung zum Hauptcomputer herzustellen. Diese ändert sich, je nach Netzwerkport des Hauptcomputers. Die K4A-Nummer ist für die eindeutige Zuordnung der Daten der Kameras im späteren Verlauf notwendig. Mit der Bildwiederholrate und dem Tiefenbildmodus können die Werte gesetzt werden, die in Abschnitt 6.1.1 beschrieben werden. Der Synchronisierungsmodus gibt an, ob die K4A eine Subordinate oder ein Master bei der Inter-K4A-Synchronisation ist (siehe Abschnitt 6.1.1).

Nachdem die Parameter gesetzt wurden, wird eine Netzwerkverbindung zwischen dem Kompaktkomputer und dem Hauptcomputer hergestellt. Sollte eine Verbindung nicht möglich sein, wird das Programm beendet.

Bei erfolgreicher Verbindung wird der Kamerastream initialisiert, um die Kameradaten der K4A zu verarbeiten. Da die Daten verschickt werden sollen, werden auch die ProtoBuf-Objekte erstellt, welche später als Datencontainer verschickt werden. Da die Linsenparameter jeder K4A einzigartig sind, muss die interne Look-Up-Table (LUT) zur Umrechnung von Tiefenbilddaten in dreidimensionale Koordinaten einmalig an den Hauptcomputer gesendet werden. Dies geschieht im ersten Datenpaket und muss aufgrund der Tatsache, dass sich diese LUT nur beim Wechsel der K4A ändert, kein weiteres Mal passieren, so lange das Programm läuft.

Die Einträge in der LUT, welche als Zweiertupel vorliegen, werden nacheinander in der korrekten Reihenfolge in eine eindimensionale Arraystruktur überführt (Formel 6.5). Dabei liegen im Modus NFOV unbinned und Transformation von Farbbild zu Tiefenbild 368.640 Zweiertupel vor.

$$Lut_{k4a} = (x_0, y_0, x_1, y_1, \dots, x_{368639}, y_{368639}) \quad (6.5)$$

Nach der Einrichtung der Infrastruktur, können die Kameradaten aus dem Datenstream gelesen werden und vorverarbeitet werden. Hierzu müssen die Farbdaten und Tiefenbilddaten in eine Arraystruktur geschrieben werden. Die Farbdaten liegen im BGRA32-Format vor in dem für Blau, Grün, Rot und den Transparenzkanal Alpha jeweils 4 Bit vorgesehen sind. Jeder Pixel enthält maximal 32 Bit. Dieser Datentyp wird ebenfalls aufgespalten und in eindimensionales Byte-Array überführt, wie in Formel 6.6 dargestellt ist.

$$Color_{k4a} = (b_0, g_0, r_0, a_0, b_1, g_1, r_1, a_1, \dots, b_{368639}, g_{368639}, r_{368639}, a_{368639}) \quad (6.6)$$

Die Tiefenbilddaten werden aufgrund der Tatsache, dass sie für jeden Pixel nur einen einzigen Wert enthalten, direkt als eindimensionales Array ausgelesen (Formel 6.7), wobei der Datentyp UINT16 seitens der K4A vorgesehen ist. Ein Pixel enthält maximal 16 Bits, der den Abstand zur Kamera angibt.

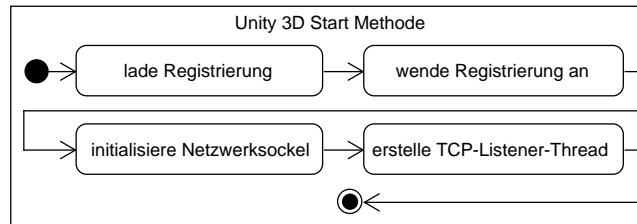
$$Depth_{k4a} = (d_0, d_1, \dots, d_{368639}) \quad (6.7)$$

Die Sensordaten samt Metainformationen, wie zum Beispiel Zeitstempeln, werden nun in die ProtoBuf-Objekte eingesetzt und über die Funktionen der automatisch generierten ProtoBuf-Klassen an den Hauptcomputer versendet. Dabei finden seitens des ProtoBuf-Protokolls weitreichende Optimierungen statt. Ungenutzte Datenfelder innerhalb der Arrays, die beispielsweise dadurch entstehen, dass geringe Abstandswerte im Tiefenbild die maximalen 16 Bits nicht ausnutzen, werden intern gekürzt. Die Längen der tatsächlich übertragenen Arrays variiert aufgrund dieser Optimierung.

### 6.1.5 Hauptcomputer Implementierung

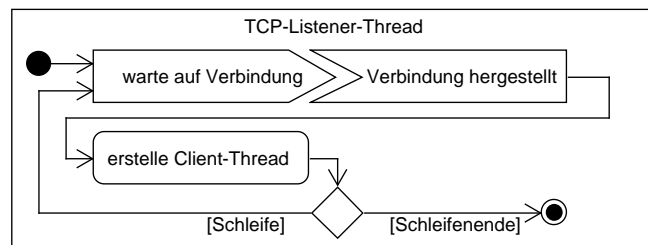
Der Hauptcomputer läuft unter der Windows Version 10.0.18363. Eine Anwendung wird implementiert, um die Punktwolkendaten performant in einer virtuellen VR-Umgebung anzeigen zu können. Dafür müssen die Daten aus den Kameras vom Hauptcomputer empfangen und latenzarm in darstellbare Punktwolken umgewandelt werden. Bei der Erstellung dieses Programms wird *Unity 3D* eingesetzt. Die native Programmiersprache von *Unity 3D* ist C#. Diese wird im weiteren Verlauf für die Erstellung der Anwendung eingesetzt.

Bei der Verwendung mehrerer K4As und hochauflösender Betriebsmodi wie NFOV unbinned, werden die Ressourcen des Hauptcomputers stark belastet. Da VR-Technologien bei niedrigen Bildwiederholungsfrequenzen nicht komfortabel zu benutzen sind, muss der C#-Code des Weiteren eine hohe Parallelität aufweisen, um die Bildwiederholungsfrequenz konstant zu halten. Bei der Implementierung von Scripten in *Unity 3D* müssen zwangsläufig die vorhandenen Methoden des Frameworks genutzt werden. So beinhaltet jedes *Unity 3D*-Script bestimmte Methoden und Variablen, die in der Programmierung implementiert werden müssen. Die wichtigsten Methoden sind `Start()`, welche beim Programmstart ausgeführt wird und `Update()`, welche bei jedem neuen Frame ausgeführt wird. Beim Start des Programms folgt die `Start()`-Methode dem Ablauf von Abbildung 6.8.



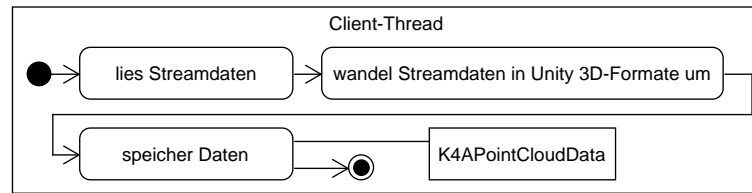
**Abbildung 6.8:** Die Start() Methode des Skripts der Serverentität. Hier wird die Registrierung geladen und auf die Punktwolkenobjekte angewendet. Danach werden Netzwerksocket erstellt und ein TCP-Listener-Thread gestartet, welcher auf eingehende Verbindungen von den Kompaktcomputern wartet.

Die Registrierung ist als Textdatei auf dem System gespeichert und beinhaltet die Transformation von K4A0 (Master) zu den anderen K4As (Subordinaten). Diese Transformationen müssen, aufgrund der Tatsache dass sie in einem rechtshändigen Koordinatensystem innerhalb eines ROS-System errechnet wurden, zunächst in das linkshändige Koordinatensystem von *Unity 3D* überführt werden. Anschließend wird ein Netzwerksocket initialisiert und ein TCP-Listener-Thread erstellt. Der in der Start() Methode erstellte TCP-Listener-Thread verarbeitet die über den Socket eingehenden Verbindungen. Dabei wartet dieser Thread zunächst auf eingehende Verbindungen von den Kompaktcomputern. Sobald eine Verbindung zu einem der Kompaktcomputer hergestellt wurde, erstellt der TCP-Listener-Thread einen Client-Thread. Die Anzahl der Client-Threads ist abhängig von der Anzahl der verbundenen Kompaktcomputer. In Abbildung 6.9 ist der Ablauf dargestellt.

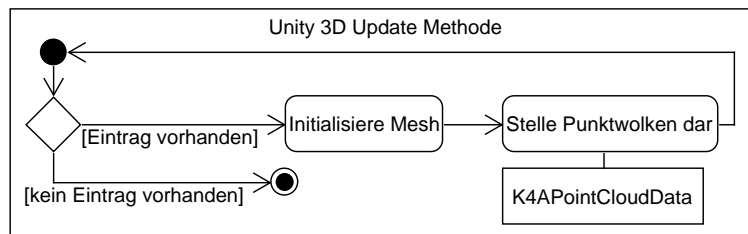


**Abbildung 6.9:** Der TCP-Listener-Thread wartet auf Verbindungen der Kompaktcomputer und startet, sobald eine Verbindung vorliegt, einzelne Client-Threads. Diese Client-Threads werden parallel und unabhängig voneinander ausgeführt.

Die nun erstellten Client-Threads (siehe Abbildung 6.10) existieren nebenläufig zum standardmäßigen Programmablauf in *Unity 3D*. In jedem Client-Thread müssen die Daten der K4As gelesen und verarbeitet werden. Dies muss parallel passieren, da bei den hohen Datenmengen eine serielle Verarbeitung für eine latenzarme Darstellung nicht ausreicht. *Unity 3D* erlaubt es



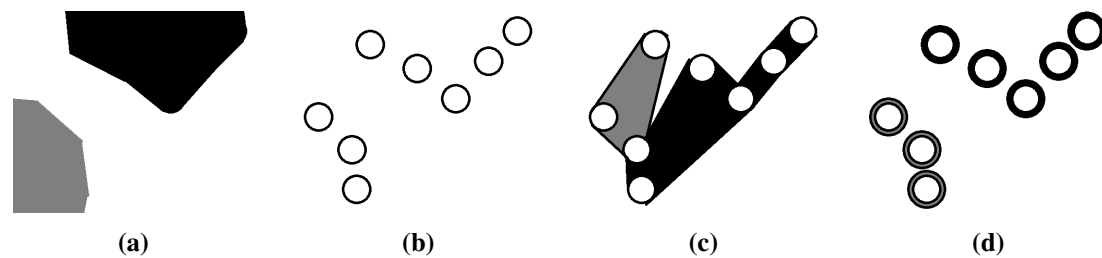
**Abbildung 6.10:** Der Client Thread liest die Streamdaten und konvertiert sie in ein Format, welches in Unity 3D lesbar ist und speichert diese in den Datencontainer *K4APointCloudData*.



**Abbildung 6.11:** Die Update() Methode überprüft zunächst, ob Einträge im Datencontainer *K4APointCloudData* existieren. Ein Eintrag beinhaltet jeweils die Farb- und Tiefenbilddaten einer K4A. Nach der Initialisierung des 3D-Meshes, welches als Grundgerüst für das Anzeigen der Daten verwendet wird, kann die Punktwolke mit den K4A-Daten aus dem Datencontainer dargestellt werden.

jedoch nicht, außerhalb des linearen Programmablaufs eines *Unity 3D*-Scripts, die Darstellung von Objekten, wie zum Beispiel Punktwolkenobjekte, zu verändern. Deswegen müssen die ausgelagerten Client-Threads ihre bearbeiteten K4A-Daten der standardmäßigen Update()-Methode zur Verfügung stellen. In der Methode werden die Daten dann in der Form von Punktwolken dargestellt. Das Bereitstellen der Daten geschieht über den Datencontainer *K4APointCloudData* (siehe Abbildung 6.10 und 6.11).

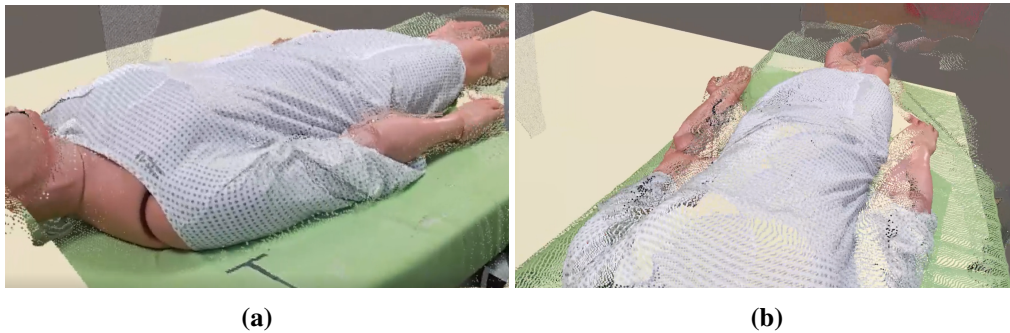
In der Update()-Methode muss letztendlich die Darstellung der Punktwolken stattfinden. Zunächst wird geprüft, ob ein Eintrag im Datencontainer *K4APointCloudData* vorhanden ist. Dies weist darauf hin, dass Tiefenbild- und Farbbilddaten zur Erstellung einer kolorierten Punktwolke vorliegen. Sofern ein Eintrag vorliegt, wird ein 3D-Mesh initialisiert, welches das grundlegende Objekt zur Darstellung der Punktwolke ist. Mithilfe der Daten aus dem Container *K4APointCloudData* wird das 3D-Mesh nun so verändert, dass eine kolorierte Punktwolke entsteht. 3D-Meshes sind das Grundgerüst, aus dem virtuelle Objekte bestehen. Diese werden in dieser Arbeit zur Darstellung von Punktwolken innerhalb der Anwendung, die mithilfe von *Unity 3D* erstellt wurde, genutzt. Ein 3D-Mesh besteht üblicherweise aus einer Vielzahl von Ecken, sogenannten Vertices. Ein normaler



**Abbildung 6.12:** Das Verhalten unterschiedlicher Shader bei Punktcloudeffekten in vereinfachter Darstellung. In Abbildung (a) (Ausgangssituation) sind zwei unterschiedliche Objekte abgebildet, die sich nicht berühren. In Abbildung (b) sind diese Objekte als Punktcloudeffekt dargestellt. Eine Zuordnung existiert nicht mehr. Durch einen herkömmlichen Shader werden in (c) Punkte der Punktcloudeffekt (möglicherweise falsch) verbunden und aufgrund der Farbinformation Objekte dargestellt, die in der Realität nicht existieren. Durch den Einsatz eines Shaders, der Scheiben auf den Positionen der Punkte erzeugt, können in Abbildung (d) die Objekte erkannt werden.

Würfel beispielsweise wird mit 8 Vertices beschrieben. Eine Punktcloudeffekt hat bei der Nutzung des Tiefenbildmodus NFOV unbinned, sofern alle Werte valide sind, 368.640 Vertices. Die üblichen dreieckigen Flächen, welche durch Shader (Programme, die auf Grundlage von geometrischen Gegebenheiten, Texturen und weiteren Merkmalen virtuelle Objekte darstellen) zwischen den Vertices von 3D-Meshes gebildet werden, um ihnen Form und Farbe zu geben, sind für die Darstellung von Punktcloudeffekten ungeeignet. Diese Flächen würden Eindrücke von nicht vorhandenen Objekten und Flächen in der Szene erzeugen (siehe Abbildung 6.12). Diese Flächen entstehen, weil in den Punktcloudeffekt-Daten nicht gespeichert ist, welche Punkte miteinander verbunden werden müssen, um die real existierenden Gegebenheiten widerzuspiegeln. Eine weitere Möglichkeit ist die Darstellung der Punkte als Partikel. Die Größe dieser Partikel ist jedoch immer an die Größe der kleinsten darstellbaren Einheit des Displays gebunden. Demnach ändert sich die wahrgenommene Größe der Punkte bei der Änderung des Betrachtungsabstands zu den Partikeln. Dies sorgt bei der gegebenen Auflösung der Punktcloudeffekte dafür, dass diese nahezu unsichtbar werden, sofern der Blickpunkt zu nahe an ihnen gewählt ist.

Um diese beiden Problematiken zu vermeiden, wird stattdessen zur Darstellung der Punktcloudeffekte in dieser Arbeit ein dedizierter Shader implementiert, welcher die vorhandenen Vertices, beziehungsweise Punkte in einzelne zweidimensionale Scheiben einer einstellbaren Größe umwandelt. Die Oberflächen der Scheiben sind zum Blickpunkt des Betrachters ausgerichtet. Die aus vier einzelnen Punktcloudeffekten bestehende zusammengesetzte Punktcloudeffekt ist in Abbildung 6.13 aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln dargestellt. Aufgrund der Repräsentation als Punktcloudeffekt kann bei der späteren Nutzung dieser Daten der Blickwinkel jederzeit frei gewählt werden.



**Abbildung 6.13:** Die Punktwolkenrepräsentation der Puppe aus zwei unterschiedlichen Richtungen. In Abbildung (a) ist der Blickwinkel aus Sicht der Haupt-K4A dargestellt. In Abbildung (b) befindet sich der Blickpunkt direkt über der Puppe.

## 6.2 Robotersystem

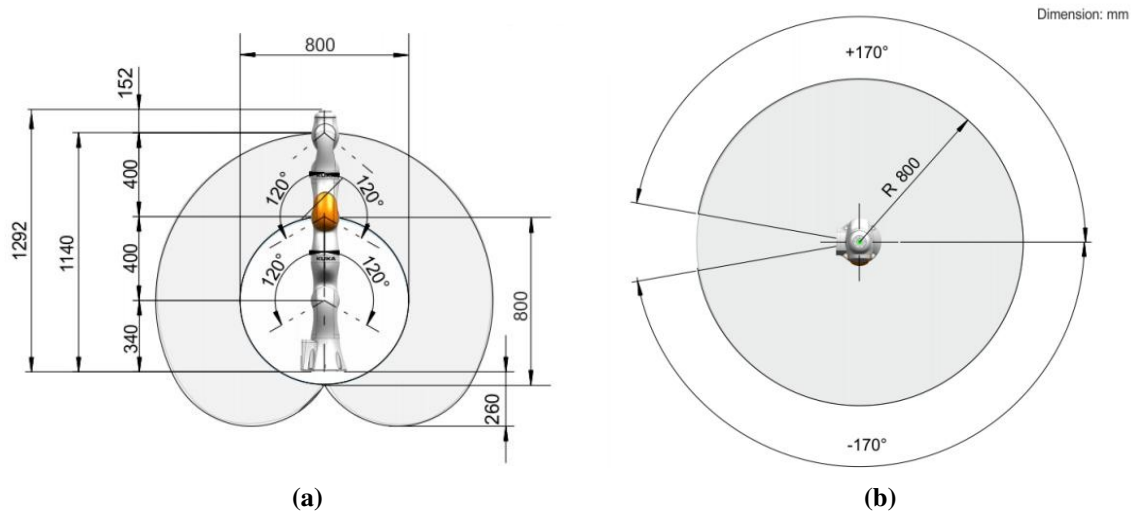
In diesem Abschnitt wird die Implementierung des Robotersystems vorgestellt. Zunächst wird auf die Spezifikation der eingesetzten Roboterarme eingegangen, welche im zweiarmigen System in dieser Arbeit genutzt werden. Anschließend wird das Hardwaresetup, inklusive der Montage, des Netzwerks und der Roboterwerkzeuge erläutert. Die Software läuft auf mehreren Computertypen und stützt sich auf die Implementierung des École polytechnique fédérale de Lausanne - Learning Algorithms and Systems Laboratory [EPF21] zur Ansteuerung der Roboter in ROS [Cha21].

### 6.2.1 Kuka LBR iiwa 7 R800 Spezifikationen

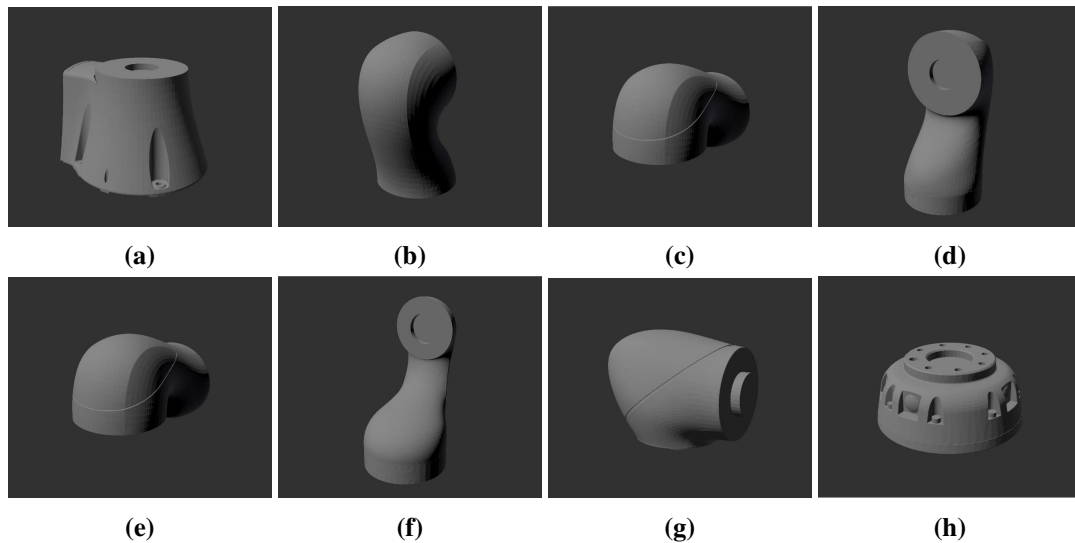
Die Roboterarme der Augsburger Firma Kuka, die in dieser Arbeit eingesetzt werden, sind vom selben Typ und tragen die Bezeichnung *LBR iiwa 7 R800*. Die Abkürzung *LBR* steht für Leichtbauroboter, *iiwa* für „intelligent industrial work assistant“, die 7 für die Traglast von 7 kg und *R800* für die Reichweite von 800 mm [KUK16]. Ein Roboterarm wiegt circa 24 kg. Zwei Roboterarme, inklusive einer nötigen Leichtbauhalterung, können der Motorik eines herkömmlichen Pflegebetts ohne Bedenken hinzugefügt werden.

#### Aufbau

Der Roboterarm weist eine Gesamtlänge von 1292 mm auf [KUK16] (siehe Abbildung 6.14). Der maximale Arbeitsraum beträgt 800 mm. Der Roboterarm verfügt über sieben Gelenke. Der Endeffektorflansch (Mediaflange) ist in dieser Arbeit bei beiden Roboterarmen vom Typ *touch electrical*, welcher sowohl elektrische Interfaces bietet als auch die Handsteuerung des Roboterarms ermöglicht. Die unbeweglichen Elemente zwischen den Gelenken, auch Links genannt, sind in Abbildung 6.15 abgebildet. Link 7 ist dabei die Standardausführung und nicht die, in dieser Arbeit genutzte, Ausführung *touch electrical*.



**Abbildung 6.14:** Die Reichweite des Kuka *LBR iiwa 7 R800 touch electrical*. In (a) ist die Seitenansicht abgebildet, in (b) die Ansicht aus der Vogelperspektive © Kuka. Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Kuka AG.



**Abbildung 6.15:** Die Roboterteile zwischen den Gelenken (Links). Im Einzelnen: (a): Link 0, (b): Link 1, (c): Link 2, (d): Link 3, (e): Link 4, (f): Link 5, (g): Link 6, (h): Link 7. Die Abbildung des Endeffektorflansches Link 7 entspricht in diesem Modell der Standardausführung des Roboters und nicht dem, in dieser Arbeit genutzten, Ausführung *touch electrical*.





**Abbildung 6.16:** Die zusätzliche Hardware, zum Betrieb eines Kuka *LBR iiwa 7 R800*. Das *Cabinet* (a) ist über zwei Anschlüsse mit dem Roboter und einem Anschluss mit dem *Smartpad* (b) verbunden. Über einen herkömmlichen Anschluss über Schutzkontaktsteckdose wird das *Cabinet* an das Stromnetz angeschlossen.

### Zusätzliche Hardware

Der Roboterarm ist kein Stand-Alone-System. Für den Betrieb des Geräts ist weitere Hardware erforderlich. Der Lieferumfang eines Kuka *LBR iiwa 7 R800* besteht aus:

- Roboterarm
- Kontrollcomputer *Cabinet*
- Eingabetablet *Smartpad*

Ein Kontrollcomputer, das *Cabinet*, ist zu jedem Roboterarm zugehörig. Dieses ist jeweils mit einem Roboterarm verbunden und verfügt über eine kabelgebundene Eingabekonsolle, dem *Smartpad* (siehe Abbildung 6.16). Durch das *Smartpad* erfolgt der Zugriff auf den Roboterarm während des Betriebs. Auf dem *Cabinet* installierte Programme lassen sich mit der Eingabe aus dem *Smartpad* aufrufen.

### Kinematik

Der Kuka *LBR iiwa 7 R800 touch electrical* ist ein serieller, redundanter Roboterarm mit sieben Freiheitsgraden. Die Redundanz bezieht sich auf die überbestimmte Kinematik, die durch den zusätzlichen Freiheitsgrad erreicht wird. Die Kinematik des Roboterarms kann mithilfe der Denavit-Hartenberg-Parameter [DH55] [KD02] beschrieben werden. Diese werden im Zusammenspiel der unbeweglichen Teile (Link) und der Drehung der Transformationen innerhalb der Gelenke beschrieben:

- $\theta_i$ : Gelenkwinkel
- $\alpha_i$ : Linkdrehung
- $a_i$ : Linklänge
- $d_i$ : Gelenkoffset

In Tabelle 6.3 sind die Denavit-Hartenbergparameter des Kuka *LBR iiwa 7 R800 touch electrical* auf Grundlage der Beschreibung [KUK16] von Kuka angegeben.

**Tabelle 6.3:** Die nominalen modifizierten Denavit-Hartenberg-Parameter des Kuka *LBR iiwa 7 R800 touch electrical*.

Link $i$	$\theta_i(^{\circ})$	$\alpha_i(^{\circ})$	$a_i(mm)$	$d_i(mm)$
1	0	0	0	340
2	0	-90	0	0
3	0	+90	0	400
4	0	+90	0	0
5	0	-90	0	400
6	0	-90	0	0
7	0	+90	0	152

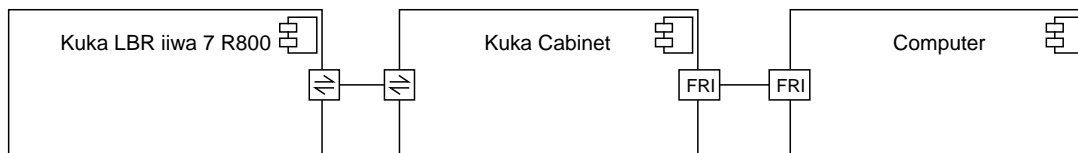
Der Roboterarm verfügt über Sensorik, die es ermöglicht, ihn in unmittelbarer Nähe zu Menschen einzusetzen. Dabei können Kräfte für jedes einzelne der sieben Gelenke berechnet werden. Diese werden als externe und interne Drehmomente angegeben. Eine Gravitationskompensation bereinigt die externen Drehmomente von der Gewichtskraft. Durch Menschen aufgewendete, externe Kräfte können zum Induzieren einer Änderung der Gelenkpositionen des Roboters genutzt werden. Die maximalen Drehmomente, die auf jedes Gelenk wirken dürfen, bevor eine Sicherheitsabschaltung des Roboters erfolgt, sind von Gelenk zu Gelenk unterschiedlich. Sie sind von den maximalen Drehmomenten, die mit den Gelenken aufgewendet werden können, abhängig. Der Arbeitsradius, beziehungsweise die maximalen Gelenkwinkel, sind für jedes Gelenk einzeln definiert. In Tabelle 6.4 sind die maximalen Winkel, die maximalen Drehmomente und die maximale Winkelgeschwindigkeit dargestellt. Es handelt sich bei allen Gelenken um Drehgelenke.

### Ansteuerung

Bei der Eingabe von Steuerungssignalen in den Roboter können unterschiedliche Herangehensweisen ausgewählt werden. Hierfür bietet die Programmierumgebung *Sunrise Workbench* von Kuka verschiedene Möglichkeiten. Da der Roboter in dieser Arbeit innerhalb einer Fernsteuerung eingesetzt werden soll, muss es möglich sein, dynamisch Steuerbefehle von Außen an den Roboter zu

**Tabelle 6.4:** Die maximalen Winkel, Drehmomente und Winkelgeschwindigkeiten pro Gelenk beim Roboterarm Kuka LBR iiwa 7 R800.

Gelenk	max Winkel [°]	max Drehmoment [Nm]	max Winkelgeschwindigkeit [°/s]
1	±170	176	98
2	±120	176	98
3	±170	110	100
4	±120	110	130
5	±170	110	140
6	±120	40	180
7	±175	40	180



**Abbildung 6.17:** Die Zusammenschaltung der Komponenten um den Roboter mit dem *Fast Robot Interface* (FRI) fernzusteuern. Von einem Computer aus werden Steuerungssignale an den Roboter über FRI an das *Cabinet* gesendet, welches mit dem Roboter verbunden ist.

senden. Im Gegensatz zu einer festen Programmierung, bei der der Roboter einen vordefinierten Ablauf abarbeitet, müssen externe Steuerungssignale verarbeitet werden. Dies ist über das *Fast Robot Interface* möglich, welches von Kuka bereitgestellt wird.

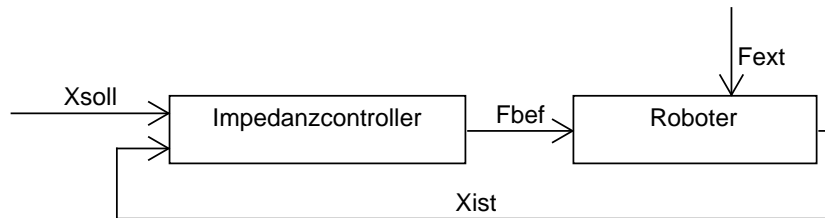
Das *Fast Robot Interface* ist eine Weiterentwicklung des *Fast Research Interface* [SSB10], welches bereits beim Vorgängermodell des Kuka LBR iiwa 7 R800, dem Kuka LWR, zum Einsatz kam. Das *Fast Research Interface* und somit auch das *Fast Robot Interface* setzen auf eine latenzarme Kommunikation mit dem Roboter [SSB10]. Dabei wird nicht verlangt, dass das an das *Cabinet* angeschlossene System echtzeitfähig ist [SSB10]. Dennoch wird die Kommunikation überwacht und die Verbindung unterbrochen sowie die Roboterbremsen aktiviert, sollte diese Verbindung nicht die vordefinierte Frequenz bei der Übertragung der Datenpakete halten können. Als Transferprotokoll wird UDP mit spezieller Erkennung und Wiederherstellung von verlorenen Paketen genutzt [SSB10]. In Abbildung 6.17 ist der Zusammenschluss der, an dieser Datenübertragung beteiligten, Komponenten dargestellt.

Bei der Nutzung des *Fast Robot Interfaces* können die Daten mit einer Frequenz von bis zu 1 kHz von einem angeschlossenen Computer auf das *Cabinet* übertragen werden. Die direkte Kontrolle des Roboters über diese Schnittstelle möglich. Impedanzcontroller können dafür eingesetzt werden.

Diese Art von Regelung ermöglicht es dynamisch mit der Umgebung zu interagieren [Hog84]. Dabei wird eine Art Feder-Masse-Dämpfer-Modell genutzt [Hog84][ASOH04], um eine Position unter Berücksichtigung der Umwelt und der Parameter des Modells zu erreichen. Von Kuka wird sowohl ein kartesischer Impedanzcontroller als auch ein Gelenkimpedanzcontroller für die Steuerung der hier genutzten Roboter angeboten. Der Gelenkimpedanzcontroller wird in der hier beschriebenen Implementierung durch das Vorgeben von Positionsdaten, welche als Winkel im Bogenmaß je Gelenk angegeben werden, eingesetzt. Bei der Impedanzkontrolle mit Positionskontrolle der Gelenke wird eine Kraft  $F(t)$  mithilfe der Trägheit ( $m$ ), der Gelenksteifigkeit ( $c$ ) der Gelenke sowie deren Dämpfung ( $d$ ) über das Feder-Masse-Dämpfer-Modell mithilfe der Positionswerte berechnet. Die Trägheit  $m$  ist intern definiert. Die Variable  $x$  ist die Position, somit sind  $\dot{x}$  die Geschwindigkeit und  $\ddot{x}$  die Beschleunigung (Formel 6.8).

$$F(t) = m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) + cx(t) \quad (6.8)$$

Sofern eine Position erreicht wird, können Kollisionen mit dem Roboter diesen von der Sollposition abbringen. Durch das Anlegen eines Drehmoments wird gegen diese Positionsänderung gegengeregelt. Je weiter sich der Roboter aufgrund einer Gegenkraft von seiner Sollposition entfernt, umso stärker wird gegengeregelt. Das bedeutet im Umkehrschluss auch, dass je näher der Roboter dem Ziel ist, die vom Roboter aufgewendete Kraft umso schwächer wird. Eine Kollision, die zu einem Zeitpunkt geschieht in dem das Gelenk noch weit von seinem Ziel entfernt ist, führt zu höheren Kräften, als wenn die Kollision kurz vor Erreichen des Ziels auftritt. In Abbildung 6.18 ist das Modell eines einfachen Reglers gezeigt, in dem diese Regelung beispielhaft dargestellt wird. Die aus dem Impedanzcontroller als Befehl ausgehende Kraft  $F_{\text{bef}}$  ist direkt von der Differenz der eigentlichen Soll-Position und der Ist-Position abhängig und wird vom Roboter intern umgerechnet und umgesetzt. Zu hohe Kräfte werden durch übergeordnete Sicherheitsvorkehrung vermieden (siehe Abschnitt 7.1.3).



**Abbildung 6.18:** Der positionsbasierte Impedanzcontroller. Eine Sollposition ist zu erreichen, wobei durch den Impedanzcontroller nach dem Feder-Masse-Dämpfer-System eine Kraft  $F_{bef}$  berechnet wird. Diese wird intern in Drehmomente und somit in Gelenkänderungen umgewandelt [Die16, S. 17]. Der Roboter wird durch externe Kräfte  $F_{ext}$  beeinflusst, was die Ist-Position beeinflusst und nach Verarbeitung im Impedanzcontroller somit zu einer Veränderung der Kraft  $F_{bef}$  führt.

### 6.2.2 Hardwaresetup

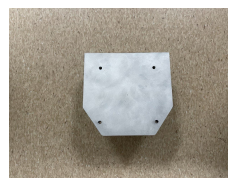
Für den erfolgreichen Einsatz des Robotersystems ist ein geeignetes Setup zu wählen. Dies beinhaltet die Positionierung der beiden Roboterarme am Pflegebett und die eingesetzte Computerhardware innerhalb eines spezialisierten Netzwerks. Weiterhin ist Werkzeug auszuwählen, welches an den Flansch des jeweiligen Roboters montiert wird.

#### Montage am Pflegebett

Das Pflegebett, welches in der hier beschriebenen Forschungsarbeit durch die Roboter erweitert wird, ist vom Typ *Practico Alu Plus*. Es wird von der Firma Hermann Bock GmbH hergestellt und verkauft. Massive Aluminiumleisten an den Seiten des Bettes bieten die Möglichkeit, speziell angefertigte Sockel (siehe Abbildung 6.19) für die Roboter anzubringen. Diese ermöglichen es, die beiden Roboterarme zu montieren. Die Funktionen des Bettes sind durch die Roboter oder deren Sockel in keinster Weise eingeschränkt.



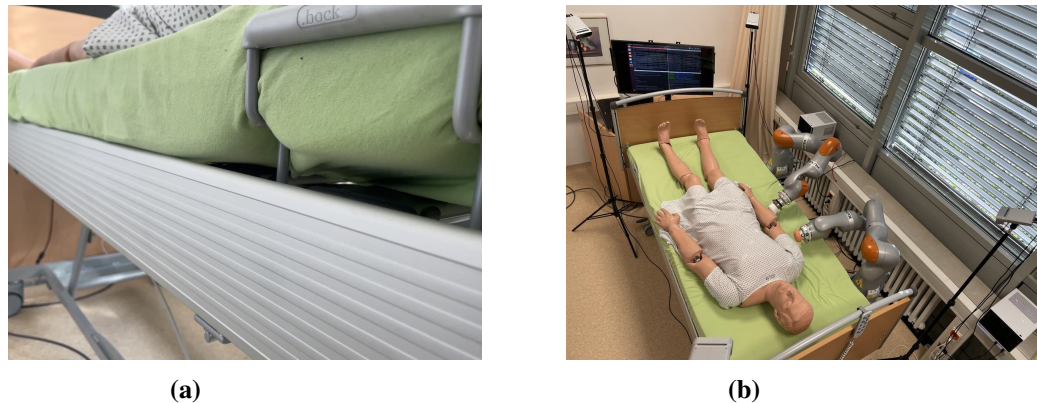
(a)



(b)

**Abbildung 6.19:** Der Sockel, der für jeweils einen Roboterarm genutzt wird. Durch einen Adapter wird der Sockel an die Aluminiumleiste des Bettes montiert.

Im finalen Aufbau soll es für den Operator möglich sein, durch natürliche Armbewegung die Roboter zu steuern. Aus diesem Grund müssen die beiden Roboterarme so aufgestellt werden, dass die menschlichen Bewegungen abgebildet werden können. Die Installation ist ebenfalls durch das Mapping der menschlichen Arme auf die Roboterarme bedingt. Das Mapping wird in Abschnitt 6.3.3 in Bezug zur VR-Steuerung erläutert. Der physische Aufbau des Robotersystems, bestehend aus den beiden Roboterarmen, ist in Abbildung 6.20 dargestellt.

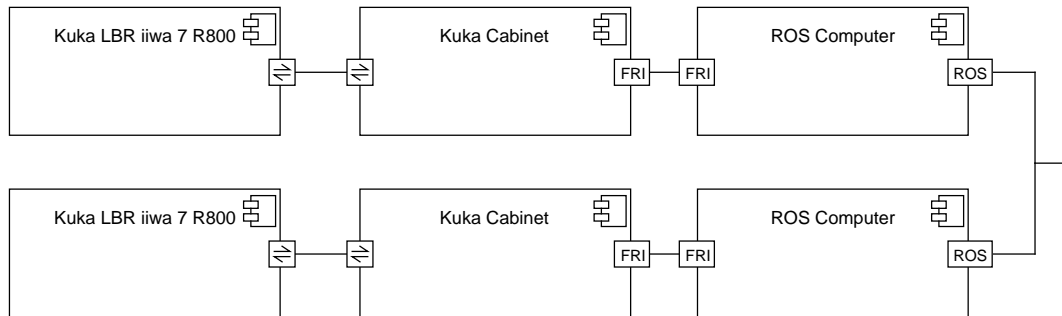


**Abbildung 6.20:** Die Aluminiumschiene (a), die zur Montage der Robotersockel genutzt wird. Die Roboter sind am Pflegebett montiert (b) und schränken die Funktionen des Betts nicht ein.

### Netzwerktopologie

Um die Roboter ansteuern zu können, muss ein Netzwerk aufgebaut werden. Dieses beinhaltet die Roboter, welche jeweils mit einem Kuka *Cabinet* verbunden sind. Diese *Cabinet*-Computer, müssen wiederum die Steuersignale für den jeweiligen Roboter von außen empfangen. Dies geschieht über das bereits vorgestellte *Fast Robot Interface*. Die Integration der *Fast Robot Interface*-Daten in ROS ermöglicht es, diese über externe Netzwerke zu empfangen und zu verschicken. Weiterhin sind die Daten, die zu den Robotern gesendet werden und jene, die sie in Form von Kraftdaten zurückgeben, während der Laufzeit auslesbar. In Abbildung 6.21 ist die Netzwerktopologie dargestellt. Jeder ROS-Computer stellt ein eigenes Netzwerk dar. Diese beiden ROS-Netzwerke sind unabhängig voneinander und interferieren nicht. Eine Ansteuerung beider *Cabinet*-Computer über einen ROS-Computer ist nur bedingt möglich. Die Anforderungen an den, mit *Fast Robot Interface* verbundenen Roboter sind hoch, weswegen die Verbindung unterbrochen wird, sobald der Computer die *Fast Robot Interface*-Signale zu langsam verarbeitet. Die beiden bidirektionalen Verbindungen zwischen den Teilnehmern des Austauschs über *Fast Roboter Interface* softwareseitig statt hardwareseitig zu managen, stellt unnötigen Aufwand und ein potenzielles Risiko dar. Um dieser kritischen Aufgabe mithilfe einer Softwarelösung beizukommen, müssten Echtzeitsysteme eingesetzt werden. Diese dürfen nicht interferieren, da sonst möglicherweise die Steuerungssignale der Roboter vertauscht würden.

Eine sonst übliche Verbindung der beiden ROS-Computer über eine Server-Client-Topologie ist ebenfalls nicht zielführend. Außer höheren Latenzen für den Client sind keine Unterschiede gegenüber der hier vorgestellten Topologie zu erwarten.



**Abbildung 6.21:** Die Netzwerktopologie des Robotersystems am Pflegebett. Die beiden Kuka LBR iiwa 7 R800 sind mit ihren zugehörigen Cabinet-Computern verbunden, welche Steuersignale über *Fast Robot Interface* erhalten. Die ROS-Computer wandeln Steuersignale aus dem ROS-Datenformat in Steuersignale für das *Fast Robot Interface* um.

### Werkzeuge

Beim Ablauf eines Pflege transfers berührt der Pfleger den Patienten mit seinen Händen und anderen Teilen seiner Arme. Durch Greifwerkzeuge werden typischerweise im industriellen Kontext Werkstücke manipuliert. Daran anschließend ist die Nachbildung von Händen und deren Einsatz in der Robotik ein definiertes Forschungsfeld [PGCB19].

In der hier beschriebenen Implementierung werden die Hände abstrahiert. Aufgrund der Aufnahmen von Pflege transfers, die während der Konzeption dieser Arbeit entstanden sind, kann der Einsatz der Hände grob in zwei Kategorien eingeteilt werden: Zum einen wird die Hand unter Körperteile geschoben, um diese anzuheben. Zum anderen wird der Handballen genutzt, um Kräfte beim Drücken des Patienten in eine bestimmte Richtung aufzuwenden. Um diesen beiden Einsatzsituationen bestmöglich gerecht zu werden, wurden im Rahmen der hier beschriebenen Entwicklung, in Kooperation mit dem BMBF-Projekt PIZ (Fördernummer: 16SV7819K), spezielle Werkzeuge entwickelt.

Aus der Perspektive des Operators gesehen, auf der rechten Seite (siehe Abbildung 6.22), befindet sich ein löffelartiges Werkzeug, welches einer halb geöffneten Hand nachempfunden ist. Es kann genutzt werden, um unter aufliegende Teile des Rumpfes oder der Extremitäten des Patienten zu fahren. Durch eine breite Auflagefläche wird so der Druck gleichmäßig verteilt. Die Außenhülle besteht aus gedruckter Polymilchsäure und die Füllung aus Polyurethan.

Der Endeffektorflansch des anderen Roboterarms ist mit einer zylindrischen Silikonpolsterung versehen (siehe Abbildung 6.23). Diese ist einem Handballen nachempfunden. Das Drücken einer

Extremität oder des Rückens, damit eine bestimmte Position im Pflge-transfer erreicht wird, kann durch dieses Werkzeug abgebildet werden.



**Abbildung 6.22:** Das Werkzeug, welches einer halb geöffneten menschlichen Hand nachempfunden ist (a). In Abbildung (b) wird das Werkzeug unter den Oberschenkel des Patientensimulators geschoben.



**Abbildung 6.23:** Das Werkzeug, welches einem Handballen nachempfunden ist (a). In Abbildung (b) drückt der Roboter unter Nutzung des Werkzeugs gemeinsam mit einer Person den Patientensimulator in den Sitz.

### 6.2.3 Cabinet Implementierung

Der *Cabinet*-Computer ist physisch direkt mit dem Roboterarm verbunden. Unter Nutzung der Software *Kuka Sunrise Workbench* und der Programmiersprache *Java* können Programme auf ei-

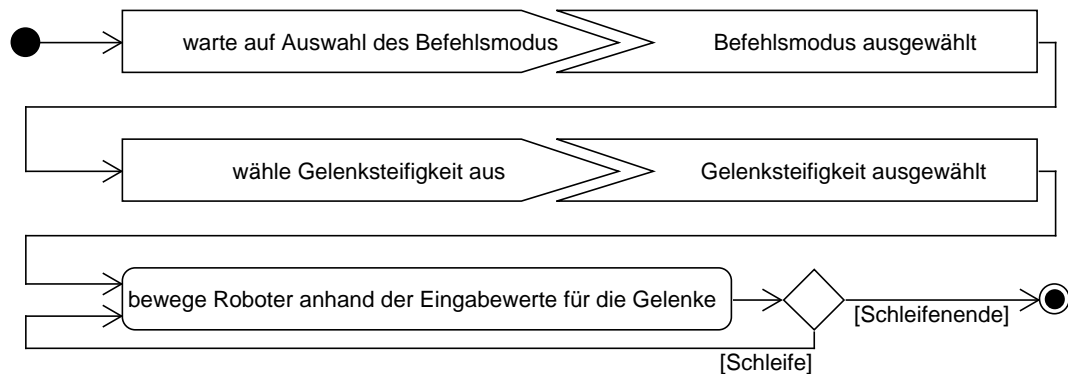


nem herkömmlichen Computer implementiert werden und über Ethernet auf dem *Cabinet* installiert werden. Darüber hinaus wird über Kuka *Sunrise Workbench* der Roboterarm konfiguriert. Das bedeutet, dass über diese Software beispielsweise die Montagerichtung des Roboters oder Sicherheitskonfigurationen definiert werden können. Sicherheitskonfigurationen bestehen aus eventgetriebenen Sicherheitsüberwachungen. In diesen kann beispielsweise eine maximale Geschwindigkeit, Kraft oder ein maximaler Winkel eines Gelenks definiert werden. Sofern diese überschritten werden, wird ein Nothalt ausgelöst.

In dieser Arbeit sind zusätzlich zu der ohnehin nicht änderbaren Sicherheitskonfiguration von Kuka maximale Gelenkwinkel eingestellt, die verhindern sollen, dass sich der Roboter zu nah an seine tatsächlichen Gelenkgrenzen bewegt. Weiterhin ist eine maximale kartesische Geschwindigkeit von 250 mm/s definiert. Diese wird im Verlauf der Arbeit jedoch von einer ROS-seitigen Maximalgeschwindigkeit für jedes Gelenk untertroffen, die ein Fünftel dieser Maximalgeschwindigkeit beträgt.

Neben der Konfiguration wird auf dem *Cabinet* das eigentliche Programm zur Steuerung des Roboters installiert. Dieses Programm empfängt Steuerungssignale vom ROS-Computer in Form von Gelenkpositionen und leitet diese an den Roboter weiter. Weiterhin werden Positions- und Kraftdaten aus dem Roboter ausgelesen und an den ROS-Computer gesendet. Hierbei wird die Schnittstelle *Fast Robot Interface* genutzt.

Aufgrund der internen Verarbeitung der Roboterbewegungssteuerung in Echtzeit, wird die Verbindung zwischen *Cabinet* und ROS-Computer ständig überwacht. In dem *Sunrise Workbench*-Programm, welches in der Implementierung für beide Roboter genutzt wird, werden die Möglichkeiten des *Fast Robot Interface* genutzt. Das Programm sendet alle 5 ms Daten an den ROS-Computer. Gleichzeitig erwartet es alle 1 ms Daten vom ROS-Computer. Sofern die eingehende Verbindung zu langsam sendet, wird ein Nothalt im Roboter ausgelöst. In Abbildung 6.24 ist der Ablauf des Programms dargestellt. Durch die Programmierung können nur High-Level-Funktionen genutzt werden. Aufgrund von Werten wie Gelenksteifigkeit, Dämpfung und dem Befehl zur Positionierung eines Gelenks, wird der Roboter intern geregelt. Der Start des Programmes und die Eingabe der genannten Werte beim Start des Programms finden über das *SmartPad* statt.



**Abbildung 6.24:** Der Ablauf des Programms auf dem *Cabinet*. Es kann zunächst zwischen Drehmomentbefehlsmodus oder Positionsbefehlsmodus ausgewählt werden. Anschließend kann die Steifheit der Gelenke eingestellt werden. Das Programm sendet daraufhin die eingehenden Befehle für die Gelenke zur internen Verarbeitung weiter und bleibt bis zur Beendigung in dieser Schleife.

#### 6.2.4 ROS-Computer Implementierung

Zwischen dem Hauptcomputer und den *Cabinets* sind jeweils ROS-Computer zwischengeschaltet. Diese befinden sich am Ort des Robotersystems. Eingehende ROS-Nachrichten werden von diesen Computern verarbeitet und über das *Fast Roboter Interface* an den jeweiligen *Cabinet*-Computer versendet.

Bei der Nutzung des Roboterframework ROS ist eine bestimmte Struktur vorgegeben. Diese modulare Struktur aus Programmen, sogenannten ROS-Nodes erfüllt spezialisiert Aufgaben. Alle Nodes sind mit einer ROS-Masternode verbunden, in der die Kommunikation geregelt wird. Es gibt für eine Vielzahl von Robotern und Geräten ROS-Pakete, deren Nodes das Auslesen und Steuern von Robotern, Kameras und anderen roboterrelevanten Systemen ermöglichen. Für die Ansteuerung des Kuka *LBR iiwa 7 R800* ist eine Implementierung dieser Ansteuerung von *École polytechnique fédérale de Lausanne - Learning Algorithms and Systems Laboratory* [EPF21] vorliegend [Cha21]. Die Kommunikation zwischen Nodes findet auf Topics statt. Diese sind von einem bestimmten Typ. Nodes können diese Topics erstellen, auf den Topics Daten versenden oder von ihnen Daten empfangen. Die Topics, welche in der Implementierung in dieser Arbeit relevant sind, sind folgende:

- `/iiwa/PositionController/command`
- `/iiwa/joint_states`
- `/iiwa/additional_outputs/external_torques`

Auf das Topic `/iiwa/PositionController/command` können Befehle gesendet werden, welche die Position der Gelenke ändern. Dabei besteht eine Nachricht auf diesem Topic aus sieben Gelenkpo-

sitionen im Bogenmaß. Diese werden jedoch vom Roboter mit einer Impedanzkontrolle auf Basis der vorher eingegebenen Werte ausgeführt. Es wird versucht die Position, welche als Wert auf diesem Topic zu finden ist, zu erreichen. Sofern ein genügend großer Widerstand, beispielsweise durch eine Kollision, entsteht, erreicht der Roboter diese Zielposition nicht.

Die tatsächlichen Gelenkpositionen und internen Drehmomente sind auf dem Topic `/iiwa/joint_states` innerhalb einer Nachricht für jedes Gelenk einzeln hinterlegt. Nach dem erfolgreichen Erreichen einer Roboterpose sind die Werte der Gelenkpositionen bei den beiden Topics `/iiwa/PositionController/command` und `/iiwa/joint_states` gleich.

Weitere überwachte Werte bei der Steuerung der Roboter sind die externen Kräfte, welche im Topic `/iiwa/additional_outputs/external_torques` indirekt durch Drehmomente pro Gelenk angegeben sind. Die Werte lassen sich später als Rückkopplung an den Operator nutzen.

Diese Daten werden über das ROS-Paket `rosbridge` zwischen den beiden ROS-Computern und dem Hauptcomputer ausgetauscht. Auf dem Hauptcomputer wird eine Anwendung, welche mit `Unity 3D` erstellt wurde, ausgeführt. Diese verbindet sich mit den beiden ROS-Computern. Auf den Topics werden dann sowohl die Steuerungsdaten für die Roboter verschickt als auch die externen Drehmomente empfangen und dem Operator als Feedback bereitgestellt.

### 6.3 Virtual Reality Integration

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Implementierung der Integration von MultiK4A-System und den beiden Kuka *LBR iiwa 7 R800* in ein VR-System. Zunächst wird die Funktion der eingesetzten VR-Technologie erläutert und auf die einzelnen Komponenten eingegangen. Die gewählte Konfiguration, hinsichtlich der eingesetzten VR-Geräte und der virtuellen Szene, wird ebenfalls vorgestellt. Das Mapping menschlicher Bewegungen auf Roboter, die Überlagerung von virtueller Welt und realer Welt und die Übertragung der Steuerungsdaten ermöglichen die Steuerung der Roboter.

#### 6.3.1 HTC Vive VR System

Bei dem, in der hier vorliegenden Ausarbeitung beschriebenen, ferngesteuerten Robotersystem wird das VR-System *HTC Vive* eingesetzt. Durch immersive Technologien ermöglicht dieses System virtuelle Umgebungen zu betreten und mit diesen zu interagieren. Die Immersion stellt sich durch visuelle und haptische Stimuli ein. Die Programmierung der Geräte ist frei wählbar und lässt sich auf den Anwendungsfall intuitiv anpassen.

### Aufbau und Funktion

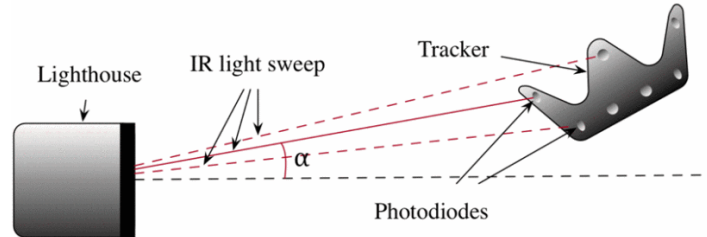
Das HTC *Vive*-System besteht aus mehreren Komponenten:

- Head-Mounted-Device (HMD)
- 2 \* VR-Controller
- 2 \* Basistation *Lighthouse*
- (zusätzliche VR-Tracker)



**Abbildung 6.25:** Das HTC *Vive*-VR-System, welches in dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Es besteht aus den zwei Basistationen *Lighthouse* (1), dem HMD (2) und den beiden VR-Controllern (4). Zusätzlich werden die beiden VR-Tracker (3) eingesetzt.

Das HMD deckt ein horizontales Sichtfeld von  $110^\circ$  ab [NLL17]. Innerhalb des HMD befinden sich zwei Bildschirme mit einer Auflösung von jeweils  $1080 \times 1200$  Pixeln bei einer Bildwiederholungsrate von 90 Hz [NLL17]. Das Tracking innerhalb des VR-System funktioniert über das „inside-out“-Prinzip, bei dem keine externen Kameras für das Tracking notwendig sind [NLL17]. Das Tracking findet in einem Zyklus statt [BSC<sup>+</sup>18]. Zunächst wird ein einzelner Synchronisationslichtblitz vom *Lighthouse* ausgesendet [NLL17]. Anschließend wird die Umgebung durch einen planar rotierenden Laser gescannt [BSC<sup>+</sup>18]. Ein *Lighthouse* ist dabei das Haupt-*Lighthouse*. Die Umgebung wird horizontal und vertikal mittels Infrarotlaser gescannt [NLL17]. Der Laser wird von den Fotodioden, welche im HMD, den VR-Controllern oder den VR-Trackern eingelassen sind, erkannt [NLL17]. Da der Laser die Fotodioden zu unterschiedlichen Zeiten erreicht, kann



**Abbildung 6.26:** Die Positions- und Orientierungsbestimmung eines VR-Trackers auf Grundlage des emittierten Infrarotlasers in Seitenansicht. Der Winkel  $\alpha$  beschreibt den Unterschied zwischen dem Normalvektor der Basisstation *Lighthouse*. Dieser kann ermittelt werden, da der Infrarotlaser in einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit die Umgebung abtastet. Aus den Winkeln der einzelnen Fotodioden, die das Licht erfasst haben, und dem Normalvektor kann eine absolute Position des VR-Trackers ermittelt werden [BSC<sup>+</sup>18] © 2018 IEEE.

eine Positions- und Orientierungsbestimmung stattfinden [NLL17]. In Abbildung 6.26 ist die Methode mithilfe einer Illustration von Borges et al. beschrieben [BSC<sup>+</sup>18].

Das Tracking des HMDs erfolgt jedoch hauptsächlich über Inertialsensorik [NLL17]. Die eben beschriebene Lasertechnologie dient dabei zur Korrektur der Positions- und Orientierungsbestimmung [NLL17]. Die Inertialsensordaten werden genutzt, weil sie eine weitaus höhere Abtastrate aufweisen [NLL17].

### Anwendungsintegration

Um das HTC *Vive*-System in einer Anwendung nutzen zu können, ist eine Softwareschnittstelle nötig. In der Implementierung dieser Arbeit wird *SteamVR* [Val21] genutzt. Mit dieser Software ist es möglich das Setup für das HTC *Vive*-System zu bestimmen. Dazu zählt die Vermessung des Bereichs, in dem der Operator sich bewegt und das Hinzufügen weiterer VR-Geräte, wie zum Beispiel der VR-Tracker. Weiterhin kann mittels *SteamVR* der Status der VR-Geräte hinsichtlich des Akkustands und weiterer Aspekte überwacht werden. Beim Aufsetzen des HMDs stellt *SteamVR* ein virtuelles Eingabeinterface für den Nutzer dar, in dem Einstellungen vorgenommen und Anwendungen gestartet werden können. Der Computer kann aus dieser VR-Szene genutzt werden, indem die typische Eingabe durch Maus und Tastatur durch die Steuerung mit VR-Controller ersetzt wird. Für die Erstellung von Anwendungen erlaubt *SteamVR* die Drag-and-Drop-Integration in Anwendungen, die beispielsweise mit *Unity 3D* erstellt werden. Weiterhin wird eine Application Programming Interface (API) bereitgestellt, die Methoden, Implementierungen und Vorlagen enthält, welche zur Erstellung von VR-Anwendungen hilfreich sind.

### 6.3.2 Virtual Reality Konfiguration

Das VR-System HTC *Vive* kann in unterschiedlichen Konfigurationen verwendet werden. Diese spezialisieren sich auf einen Anwendungsfall. Auch die virtuelle Szene, die durch diese immersive Technik betreten werden kann, ist für die Anwendung in dieser Arbeit spezialisiert.

#### Gerätesetup

Bei der Implementierung des hier vorgestellten ferngesteuerten Robotersystems werden neben den, beim HTC *Vive*-System mitgelieferten, VR-Geräten zusätzlich zwei VR-Tracker genutzt (siehe Abbildung 6.25). Die VR-Controller sind mit mehreren, frei belegbaren Knöpfen und Vibrationsmotoren ausgestattet. Die Vibrationsmotoren können für haptisches Feedback in VR-Anwendungen genutzt werden. Das VR-System wird in dieser Arbeit in einer raumfüllenden Variante aufgebaut. Anders als in der sitzenden Variante kann in der raumfüllenden ein Bereich mit einer Flächendiagonale von bis zu 5 m [HTC21] für die freie Bewegung des Nutzers eingenommen werden. Der minimale Bereich bei dieser Variante wird mit 2 m \* 1,5 m angegeben [HTC21].

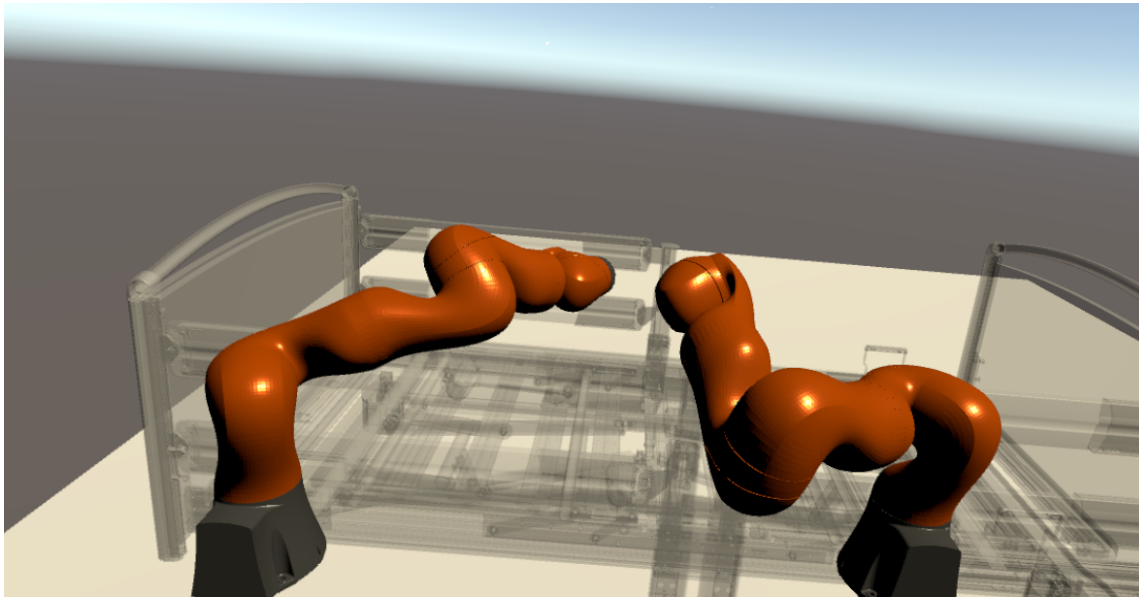
Die Ausrichtung und Form des virtuellen Raums kann in der hier vorgestellten Implementierung frei gewählt werden, solange die raumfüllende Variante unter der Beachtung der Raumgröße nach Herstellerangaben ausgewählt wird. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Nutzung des Systems.

#### Virtuelle Szene

Der Operator befindet sich bei der Kontrolle der Roboter in einem virtuellen Raum. Dieser beinhaltet eine Bodenfläche, ein Modell des Pflegebetts und zwei Robotermodelle, die an dem Pflegebettmodell angebracht sind. Dabei stimmen die Abstände zwischen den Robotern und allgemein die Dimensionen mit der realen Welt überein (siehe Abbildung 6.27). Diese Ansicht ist der Virtual-Reality (VR) zuzuordnen. Mit zusätzlicher Punktwolkendarstellung würde es sich um Mixed-Reality (MR) handeln. Der Bereich in dem das VR-System im virtuellen Raum benutzt werden kann, ist abhängig von der vorher definierten Fläche innerhalb des Setups von *SteamVR*. Die Mitte der Schiene des Modellbetts, an dem die Robotermodelle angebracht sind, ist gleichzeitig die Mitte der gesamten VR-Fläche. Dadurch kann der Arbeitsraum des VR-Systems optimal genutzt werden. Die Robotermodelle entstehen aus dem Import einer Roboterbeschreibungsdatei. Diese ist im Format Unified Robot Description Format (URDF) auf der GitHub-Seite *iiwa\_Stack* [Vir21] von der Einrichtung Interdisziplinäres Forschungslabor - Computer Aided Medical Procedures der Universität Technische Universität München verfügbar. Der URDF-Importer ist von der Firma Siemens ebenfalls auf einer GitHub-Seite zur Verfügung gestellt [Bis21b].

Eine virtuelle Nachbildung des Pflegebetts *Practico Alu Plus* der Firma Hermann Bock GmbH wird im Rahmen in dem hier beschriebenen Aufbau genutzt.

Der virtuelle Raum wird bei Inbetriebnahme des Multi-K4A-Systems durch die Punktwolken der vier K4As gefüllt.



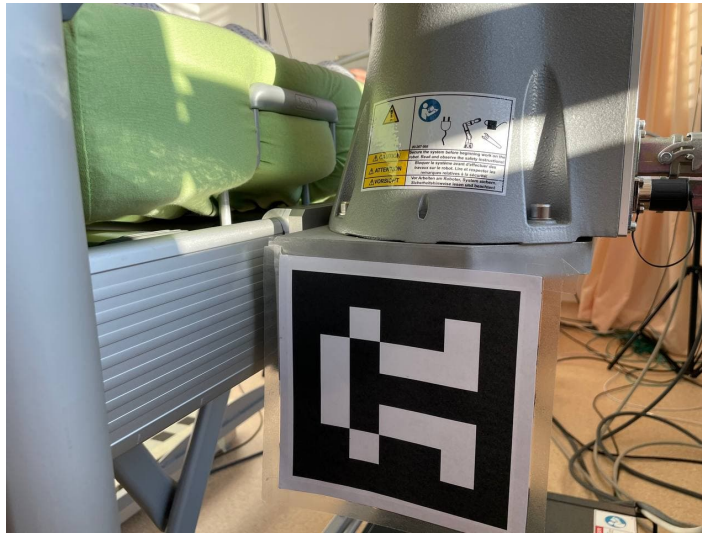
**Abbildung 6.27:** Die Modelle innerhalb der virtuellen Umgebung. Die beiden Roboterarme und das Pflegebett sind als virtuelle Modelle in der Szene vorhanden. Es können, wie beim Pflegebett zu sehen, unterschiedliche Transparenzgrade eingestellt werden. Die Punktwolken sind in dieser Abbildung nicht dargestellt.

### 6.3.3 Registrierung

Die Punktwolken der vier K4As sind untereinander registriert. Das heißt sie überlappen sich nahezu nahtlos, wodurch der Eindruck entsteht, es handle sich um eine einzige Punktwolke. Innerhalb dieser Punktwolke werden die Roboter und das Bett, aber auch der Pfleger und der Patient erfasst. Die Punktwolkenrepräsentationen dieser Objekte überlagern sich jedoch zunächst nicht mit den Modellen innerhalb der virtuellen Umgebung. Die Punktwolken können in der Entwicklungsplattform *Unity 3D* manuell in Rotation und Translation angepasst werden. K4A0 bildet dabei die Wurzel des Transformationsbaums, in dem sich auch die anderen drei K4As befinden. Eine Transformation der Wurzel sorgt somit dafür, dass sich alle vier Punktwolken transformieren.

Dieses manuelle Änderung ist aufgrund der Mobilität des Betts nicht zielführend. Sobald das Bett, welches sich auf Rollen befindet, bewegt wird, oder die Höhe des Betts neu eingestellt wird, liegen trotz vorheriger manueller Verschiebung der Punktwolken, die Modelle und Punktwolkenrepräsentationen nicht mehr übereinander. Aus diesem Grund muss es möglich sein, während der Laufzeit die Registrierung zwischen Modellen und Punktwolkenrepräsentationen vorzunehmen.

Zur Registrierung können die Daten der K4As herangezogen werden. In die reale Umgebung am Pflegebett wird ein gedruckter zweidimensionaler Marker (siehe Abbildung 6.28) hinzugefügt. Dieser Marker entstammt der ArUco-Bibliothek, die auf Grundlage der Forschung von Garrido-Jurado et al. entstanden ist [GJM<sup>+</sup>14]. In die virtuelle Welt wird ebenfalls eine Repräsentation des Markers



**Abbildung 6.28:** Der ausgedruckte Marker ist am Robotersockel installiert. Bewegungen des Betts beeinflussen die Position und Rotation des Markers. Dies kann mithilfe der K4A-Daten genutzt werden um eine Registrierung zwischen virtuellen Modellen und der Punktwolke zu erreichen.

als eine gleich große Fläche an der entsprechenden Position erstellt. Der real vorhandene Marker ist fest am Pflgebett, genauer gesagt an einem Robotersockel, angebracht (Abbildung 6.28). Sofern die Position und die Rotation des Betts geändert wird, ändert sich auch die Position und die Rotation des Markers. Diese Werte sind mithilfe einer K4A auslesbar. Aufgrund des Mappings von Farbbild zu Tiefenbild (siehe Abschnitt 6.1.1) kann anhand der Farbbildaten die Position und Rotation relativ zur K4A ermittelt werden. Jeder Farbpixel korrespondiert mit einem dreidimensionalen Wert der Punktwolke.

Die Ecken des Markers werden in der Punktwolke von K4A0 erkannt, welche die Wurzel der anderen drei K4As darstellt. Die dreidimensionalen Positionen, welche an den erkannten Ecken im Farbbild vorliegen, werden extrahiert und der Mittelpunkt  $mp$  berechnet. Dazu wird ein Mittelwert der Positionen der Eckpunkte des Markes berechnet, welcher innerhalb der Punktwolke detektiert wird. Auch die virtuelle Fläche, die den Marker repräsentiert, kann über einen Mittelpunkt ( $mpv$ ) abstrahiert werden. Formel 6.9 beschreibt die Berechnung des Markermittelpunkts in der Punktwolkenrepräsentation, wobei  $mp$  für Markermittelpunkt steht und  $me$  für Markerecke. Die weiteren Beschriftungen der Markerecken beschreiben mit  $r$  und  $l$  Links und Rechts, sowie Unten und Oben mit  $u$  und  $o$ .

$$Pos_{mp} = \frac{Pos_{melo} + Pos_{mero} + Pos_{meru} + Pos_{melu}}{4} \quad (6.9)$$



Als initiale Rotation des Mittelpunkts wird die Rotation der Wurzel K4A K4A0 festgesetzt (Formel 6.10).

$$Rot_{mp} = Rot_{k4a_0} \quad (6.10)$$

Die neue Position von K4A0, die notwendig ist, damit sich der Markermittelpunkt aus der Punktwolkenrepräsentation  $mp$  und der virtuelle Marker  $mpv$ , der in *Unity 3D* definiert wurde, überlagern, wird mithilfe von Formel 6.11 berechnet.

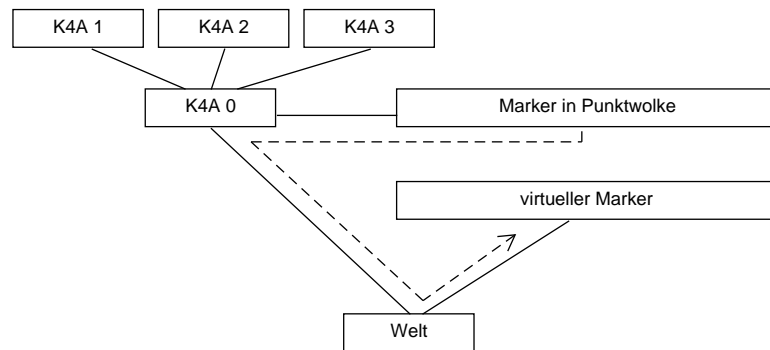
$$Pos_{k4a_0} = Pos_{mpv} + Pos_{k4a_0} - Pos_{mp} \quad (6.11)$$

Die Korrekte Rotation ist noch nicht gegeben. Diese wird auf Basis der Normalen des virtuellen Markermittelpunkts und des Markermittelpunkts aus der Punktwolkenrepräsentation berechnet. Eine Funktion zur Errechnung einer Rotation unter Angabe von Ausgangs- und Zieltransformation ist in *Unity 3D* gegeben und wird mithilfe von Quaternionen berechnet. Als Ausgangstransformation wird der Mittelpunkt des Markers aus der Punktwolkenrepräsentation festgelegt und als Ziel der Mittelpunkt des virtuellen Markers. Die entstehende Quaternion  $q$  wird zur Berechnung der nötigen Rotation gebraucht, die auf auf K4A0 angewendet wird, um den virtuellen Marker und den Marker aus der Punktwolkenrepräsentation zu überlagern (siehe Formel 6.12).

$$Rot_{k4a_0} = q * Rot_{k4a_0} \quad (6.12)$$

In Abbildung 6.29 ist der Transformationsbaum und die zu berechnende Transformation als gestrichelte Linie angegeben. Durch diese Prozedur werden die vier Punktwolken in der virtuellen Welt auf die vorhandenen Modelle der Roboter und des Betts gelegt.

Aufgrund eines leichten Rauschens, welche die Positionen der Ecken des Markes aus den Punktwolken mit sich bringen, wird diese Prozedur nicht durchgängig ausgeführt. Ansonsten würden die Punktwolken ständig leichten Positions- und Rotationsänderungen unterliegen, was in Kombination mit VR-Technologie möglicherweise zu Motion-Sickness (Bewegungskrankheit) führen könnte. Auf Wunsch des Operators wird die Registrierung durch das Drücken eines Knopfs am VR-Controller eingeleitet. Die Ausführung der Registrierung beeinträchtigt die Bildwiederholungsrate nicht und findet unverzüglich statt.

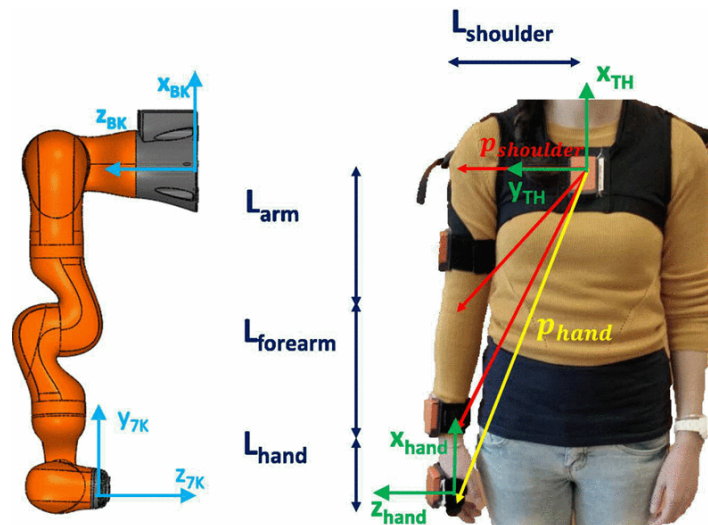


**Abbildung 6.29:** Der Transformationsbaum hinsichtlich des virtuellen Markers und des Markers in der Punktwolke. Der gestrichelte Pfeil gibt an, dass die Berechnung der Transformation über das grundlegende Weltkoordinatensystem erfolgen muss. Die errechnete Transformation muss auf die Transformation von K4A0, der Wurzel des Multi-K4A-Systems, angewendet werden.

#### 6.3.4 Roboter-Mensch-Mapping

Die Roboter sollen durch natürliche, menschliche Bewegungen ferngesteuert werden, die vom VR-System erkannt werden. Dafür muss zunächst festgelegt werden, auf welche Weise das Mapping des menschlichen Arms auf den Roboterarm stattfindet.

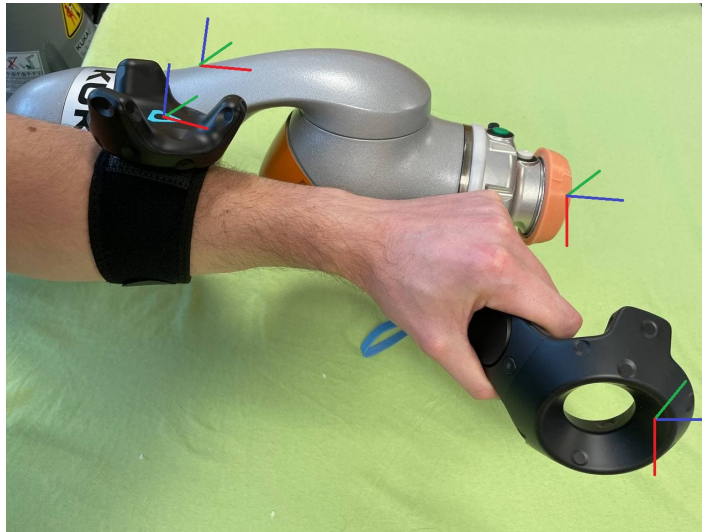
In der Literatur sind Ansätze diesbezüglich zu finden. Ficuciello et al. mappen den gesamten menschlichen Arm, einschließlich des Schultergelenks auf den Kuka *LWR* [FRL<sup>+</sup>14]. Dabei ist beim Roboter erst das zweite Gelenk, von der Basis aus gesehen, die Repräsentation der Schulter [FRL<sup>+</sup>14]. Auch Nocco et al. zeigen ein ähnliches Mapping [NCZ<sup>+</sup>17] (siehe Abbildung 6.30).



**Abbildung 6.30:** Die von Nocco et al. genutzte Konfiguration für das Mapping von Menschenarm auf Roboterarm (Kuka *LWR 4+*). Auf der linken Seite ist der Roboter mit dem Basis- und Endeffektorkoordinatensystem abgebildet. Auf der rechten Seite ist ein Mensch dargestellt, der Inertialsensorik trägt. Das Koordinatensystem  $P_{shoulder}$  korrespondiert demnach mit dem Basiskoordinatensystem des Roboters und  $P_{hand}$  mit dem Endeffektorkoordinatensystem des Roboters [NCZ<sup>+</sup>17] © 2017 IEEE.

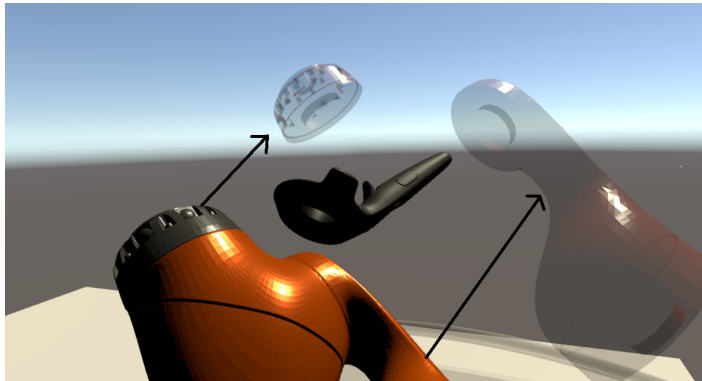
Der hier genutzte Roboter Kuka *LBR iiwa 7 R800* weist ähnliche Dimensionen auf wie der Kuka *LWR 4+*, der bei Nocco et al. [NCZ<sup>+</sup>17] zum Einsatz kommt. Vom zweiten Gelenk (aus Richtung der Basis gemessen) ergeben sich beim Kuka *LBR iiwa 7 R800* 952 mm. Wenn also, wie bei den soeben genannten Arbeiten, das zweite Gelenk als Schultergelenk des menschlichen Arms angesehen wird und das Ende des Endeffektors beispielsweise als Fingerspitze, sind 952 mm zu viel. Die Armlänge eines Menschen weist üblicherweise annähernd den selben Wert der Körpergröße auf. Die Armlänge ist nach Abzug der Brustbreite mehrere Zentimeter kürzer als die Hälfte der Spannweite. Ein Wert von 952 mm ist demnach nicht realistisch. Die Gelenke des Roboters müssten, wie bei Nocco et al. am vorletzten Gelenk dargestellt (siehe Abbildung 6.30), abgeknickt werden.

In der Implementierung der hier vorliegenden Arbeit wird der Arm nicht von der Roboterbasis aus, sondern vom Endeffektor aus für das Mapping herangezogen. Die in Händen gehaltenen VR-Controller, welche virtuell in der VR-Szene durch Modelle repräsentiert sind, werden um das Modell des Endeffektors des Kuka *LBR iiwa 7 R800* erweitert. Ein VR-Tracker bildet zusätzlich die Oberseite des Unterarms ab. In Abbildung 6.31 ist das intendierte Mapping von Menschenarm und Roboterarm dargestellt.



**Abbildung 6.31:** Das Mapping von Menschenarm auf Roboter. Der Endeffektor wird auf eine 5 cm nach vorne verlagerte Position vor dem Controller gemappt. Gleichzeitig wird die Mitte des unbeweglichen Teils (Link 5) zwischen vorletztem Gelenk und dem davor durch einen Tracker auf der Oberseite des Unterarms abgebildet.

Diese Repräsentation ist innerhalb der Sicht des Operators so realisiert, wie in Abbildung 6.32 dargestellt. Dabei ist der VR-Controller als Modell repräsentiert und um ein Modell des Endeffektors Link 7 erweitert. Link 7 ist in einer Entfernung von 5 cm am vorderen Teil des Modells des VR-Controllers angebracht. Dies führt dazu, dass der Operator eine angenehme Arm und Handposition einnehmen kann. Der VR-Tracker, der vom Operator an der Oberseite des Unterarms getragen wird, ist in der virtuellen Szene komplett durch ein Modell von Link 5 ersetzt. Die montierten Werkzeuge werden beim Betrieb des Systems durch die Punktwolke repräsentiert.



**Abbildung 6.32:** Das Robotermodell neben den Controllermodellen. An der Vorderseite des VR-Controller-Modells ist in einem Abstand von 5 cm ein transparentes Modell des Endeffektors angehängt. Der VR-Tracker ist komplett durch das transparente Modell des Roboterteils Link 5 ersetzt. Das Robotermodell folgt diesen beiden Modellen.

Weiterhin sind hauptsächlich Gelenke in der Nähe des Endeffektors des Roboters von dem Mapping beeinflusst. Da der Roboter Redundanzen aufweist, gibt es für das Erreichen der vorgegebenen Posen des Operators mehrere Lösungen. Der Lösungsraum wird nicht durch weiteres Mapping von Menschenarm auf Roboterarm beeinflusst. In Abbildung 6.33 ist ein Roboterarm dargestellt, der hinsichtlich des Endeffektors und Link 5 eine nahezu identische Position in beiden Bildern aufweist. Die Gelenke in der Nähe der Basis sind allerdings verschieden.



**Abbildung 6.33:** Unterschiedliche Gelenkpositionen führen zu gleichem Ergebnis, sofern das Mapping nur in der Nähe des Endeffektors stattfindet. Das Ergebnis der Ausrichtung des Roboterarms, hinsichtlich der Position von Link 5 und des Endeffektors, ist in **(a)** und **(b)** nahezu identisch. Die Gelenkpositionen unterscheiden sich jedoch für die Gelenke, die nah an der Roboterbasis sind, erheblich. Dies kann an der Position des orangefarbenen Gelenks gesehen werden.

### 6.3.5 Unity 3D Implementierung

Die Steuerung der beiden Roboterarme finden in einer Anwendung statt, die mithilfe der Entwicklungsplattform *Unity 3D* entwickelt wurde. Der Name der Anwendung lautet *multi\_K4A\_VR\_system*. Der Operator nutzt innerhalb des Programms die VR-System Komponenten, um die Robotermodelle zu bewegen.

#### Inverse Kinematik

Die Robotermodelle bewegen sich innerhalb der virtuellen Welt so, dass sie mit den Endeffektormodellen und dem Model von Link 5 an diesen beiden Stellen übereinanderliegen. Dafür müssen Berechnungen stattfinden, welche als Eingabe die Stellungen dieser beiden Modelle erhalten und daraus eine Stellung des jeweiligen Robotermodells ableiten. Ein *Unity 3D*-Plugin zur Berechnung einer inversen Kinematik wird eingesetzt, um diese Berechnung durchzuführen.

Das eingesetzte Plugin *BIOIK* ist ein externes Programm, das von Starke auf Grundlage der Forschung von Starke et al. [SHKZ17] implementiert wurde. Es ist im *Unity 3D Asset Store*, einem digitalen Marktplatz für 3D-Modelle, Plugins und Animationen erhältlich. Es wird bei der Entwicklung in Form eines Scripts auf das Robotermodell angewendet und angepasst. Die Kinematik des Roboters wird hinsichtlich der Positionen der Gelenke erfasst. Einmalig müssen jedoch die Orientierung, die Gelenkart und die maximalen Bewegungsmöglichkeiten der Gelenke angepasst werden. Andernfalls werden in der virtuellen Umgebung Roboterbewegungen dargestellt, die von den realen Robotern nicht durchgeführt werden können.

Sobald das Plugin einem Robotermodell zugeordnet ist und die Kinematik korrekt eingestellt ist, sind weitere Parameter zu definieren. Für jedes Roboterteil (Link) können Ziele definiert werden, die durch die Nutzung des Plugins erreicht werden. Dem Endeffektormodell des Roboters kann beispielsweise das Ziel auferlegt werden, die Position und Orientierung des Endeffektormodells am VR-Controller einzunehmen. Hierbei werden dem Endeffektormodell des Roboters also zwei Ziele gegeben: Position und Orientierung. Die Ziele, die innerhalb des Plugins für jeden Teil des Roboters definiert werden können, sind im Folgenden aufgelistet:

- **Position:** Es wird versucht, die Position des Ziels zu erreichen.
- **Orientation:** Es wird versucht, die Orientierung des Ziels zu erreichen.
- **LookAt:** Es wird versucht, in die Richtung, in der sich das Ziel befindet, zu drehen.
- **Distance:** Es wird versucht, eine bestimmte Distanz zum Ziel nicht zu unterschreiten.
- **Displacement:** Es wird versucht, Gelenkänderung, Fluktuation und Posenänderung zu vermeiden.
- **JointValue:** Es wird versucht, eine bestimmte Gelenkposition zu halten.

Bei der Implementierung für das Robotersystem werden, wie bereits beschrieben, **Position** und **Orientation** genutzt, um die Robotermodelle auf die Repräsentationen der VR-Controller und der VR-Tracker zu bringen. Weiterhin sollen die Robotermodelle und somit auch die realen Roboter zur Mitte des Pflegebetts ihr zweites Gelenk abknicken. Die so erreichten Roboterposen erlauben eine intuitive Steuerung durch den Operator. Das wird mit dem Setzen des Parameters **JointValue** für die beiden unteren Gelenke erreicht. Jedem definierten Ziel wird eine Gewichtung zugewiesen, die besagt wie stark dieses Ziel bei der finalen Ausrichtung berücksichtigt werden soll.

Die Berechnung zur Lösung der inversen Kinematik kann ebenfalls mittels verschiedener Parameter beeinflusst werden. Diese Parameter sind:

- **Generations:** Die Anzahl der Iterationen pro Frame, die Lösungen suchen.
- **Individuals:** Die Anzahl der potenziellen Lösungen, die in jeder Iteration kreiert werden.
- **Elites:** Die Anzahl der potenziellen Lösungen, die in der Gesamtpopulation der Lösungen am erfolgsversprechendsten sind.

Innerhalb der Dokumentation von *BIOIK* werden Empfehlungen bei den Werten dieser Parameter genannt. Es werden ein bis drei Iterationen pro Frame (**Generations**) empfohlen. Die Berechnungszeit der potenziellen Lösungen (**Individuals**) in mehreren Iterationen ist abhängig von der Anzahl der Lösungen pro Iteration. Es sind 40-120 **Individuals** empfohlen. Mehrere **Elites** sind notwendig falls lokale Extrema verhindern, dass eine optimale Lösung gefunden wird. Hier werden abermals ein bis drei empfohlen. Diese Vorgaben werden in der Implementierung des Programms *multi\_K4A\_VR\_system* eingehalten. Weiterhin bietet *BIOIK* die Möglichkeit die Roboterbewegung mittels weiterer Parameter entweder mit weichen Übergängen der Positionen realistisch mit Beschleunigung und Abbremsen darzustellen oder unverzüglich und ohne Übergänge.

Die Robotermodelle in der *Unity 3D*-Anwendung bestimmen die Steuerungssignale für die Roboter. Da die Robotermodelle den VR-Controllern und VR-Trackern folgen, müssen unbeabsichtigte Bewegungen dieser Geräte innerhalb des Programms *multi\_K4A\_VR\_system* abgefangen werden. Am rechten VR-Controller ist daher ein Knopf als Totmannschalter belegt. Die Berechnung der inversen Kinematik und somit auch der Bewegung der Robotermodelle finden nur statt, solange dieser Knopf gedrückt wird. Dies erlaubt es dem Operator Armbewegungen durchzuführen, die nicht in Bewegungen der Roboter umgesetzt werden.

### Haptisches Feedback

Die Robotermodelle und die Repräsentationen der Roboter in den Punktwolken werden dem Operator bei der Nutzung des HMDs angezeigt. Dieses visuelle Feedback kann mithilfe der Kraftsensorik der Roboterarme durch haptisches Feedback für den Operator erweitert werden.

Auf den ROS-Topics, welche von den ROS-Computern am Ort des Pflegebetts ausgehen, werden die Drehmomente jedes Gelenks des jeweiligen Roboters publiziert. Diese Daten sind auch innerhalb der *Unity 3D*-Anwendung sichtbar.

Die Werte für die externen Drehmomente der Gelenke sind von der Gravitationskraft bereits bereinigt und weisen auf externe Kräfte hin, die auf das jeweilige Gelenk wirken. Diese Kräfte können beispielsweise im Betrag über alle Gelenke gemittelt werden. Sofern dieser Mittelwert eine bestimmte Schwelle erreicht, kann ein haptisches Feedback an den VR-Controllern ausgelöst werden. Die Vibrationsmotoren, die in jedem VR-Controller vorhanden sind, können daraufhin hinsichtlich der Amplitude und der Frequenz des Vibrationsmotors eingestellt werden. Dies kann bei gewollten und ungewollten realen Kollisionen des Roboters mit einem Menschen oder einem Objekt am Pflegebett ein haptisches Feedback in Form einer Vibration der VR-Controller auslösen. Hier wird geprüft ob mindestens eines der Gelenke einem externen Drehmoment von mehr als 10 Nm ausgesetzt ist. Sobald diese Schwelle erreicht wird, wird eine Vibration am betreffenden Controller gestartet, die sich bei Erhöhung des externen Drehmoments hinsichtlich der Amplitude verstärkt. Die VR-Controller können dem Operator so ein gezieltes, dynamisches und haptisches Feedback bei Kollisionen und Berührungen vermitteln.

### **Übertragung auf reale Roboter**

Durch die Berechnung der inversen Kinematik werden die Posen der Robotermodelle, abhängig von den Positionen und Orientierungen der VR-Controller und der VR-Tracker verändert. Diese Posen müssen auf die realen Roboter übertragen werden.

Die Gelenkdaten der Roboter können innerhalb von *Unity 3D* ausgelesen werden. Diese werden in eine ROS-Nachricht umgewandelt und anschließend unter der Nutzung des ROS-Pakets *ros-bridge* an die jeweiligen ROS-Computer und damit letztendlich auch an die jeweiligen *Cabinets* übertragen. Die Roboter bewegen sich dadurch unter Nutzung des Impedanzcontrollers in der Realität.

Für den Operator bewegen sich in zeitlicher Abfolge zunächst die virtuellen Robotermodelle. Wenige Millisekunden später ist die Bewegung der Roboter auch in den kolorierten dreidimensionalen Punktwolken sichtbar (siehe Abschnitt 7.1).

Die Schnittstelle zwischen der *Unity 3D*-Anwendung und ROS erfolgt durch die Nutzung einer Implementierung von Siemens [Bis21a]. Dafür müssen die Gelenkwinkel der Robotermodelle innerhalb eines Scripts ausgelesen werden und in eine ROS-Nachricht umgewandelt werden. ROS-Topics, auf denen diese Nachrichten veröffentlicht werden, werden bereits durch die ROS-Computer bereitgestellt, die an die jeweiligen *Cabinets* angeschlossen sind. Die Daten werden über die herkömmliche Ethernetschnittstelle über TCP übertragen.

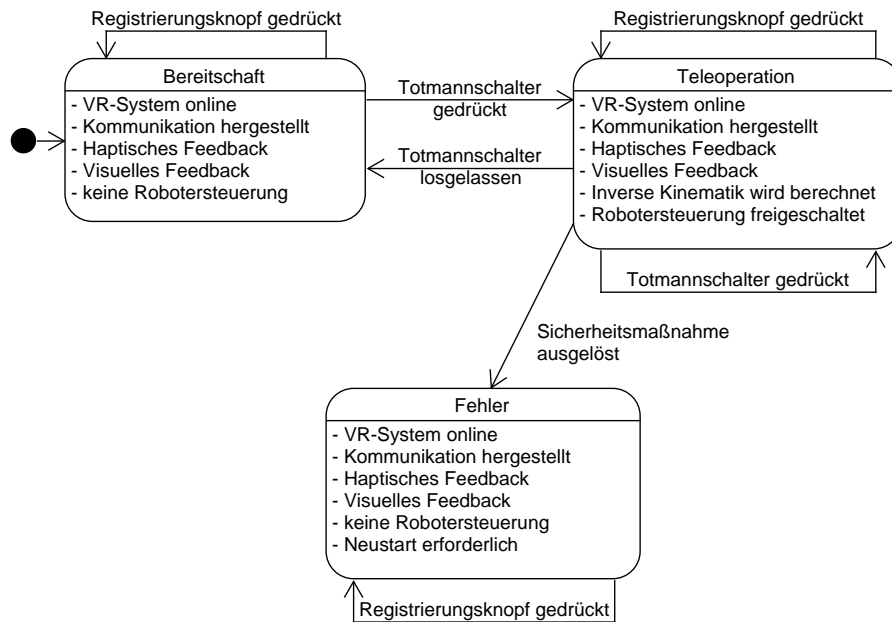
### **6.3.6 Nutzung**

Die Nutzung des Systems findet primär auf der Seite des Operators statt. Am Ort des Pflegebetts profitiert hingegen ein Pfleger davon, dass die Patiententransfers gemeinsam durchgeführt werden können und er somit physisch unterstützt und entlastet wird. Der Kommunikation der beiden Akteure kann durch eine herkömmliche Audiokommunikation vollzogen werden. Der Operator hat



zusätzlich ein visuelles Feedback zur Verfügung, während der Pfleger vor Ort die Bewegungen der Roboter wahrnimmt und mit dem Operator reden kann.

Die Steuerung der Roboter ist für den Operator so intuitiv wie möglich gestaltet. Sobald er die VR-Geräte trägt, beziehungsweise in Händen hält, kann die Steuerung beginnen. Durch das betätigen des Registrierungsknopfs am rechten VR-Controller wird die Punktwolke mit den virtuellen Modellen überlagert. Sofern die Position oder die Höhe des Betts verändert wird, kann dieser Knopf betätigt werden, um eine erneute Überlagerung anzuwenden. Der Endeffektor und Link 5 der virtuellen Roboterarme, und damit auch der realen Roboterarme, folgen dem jeweiligen Arm des Operators. Dafür muss der Operator jedoch den Totmannschalter am VR-Controller gedrückt halten. Es empfiehlt sich zunächst für den Operator die Arme in die Nähe der virtuellen Robotermodelle zu bewegen, bevor gestartet wird, da so die initiale Differenz zwischen den VR-Geräten und den Modellen niedrig ist. Dies sorgt dafür, dass sich die Modelle und somit die realen Roboter anfangs über eine kurze Distanz bewegen müssen. Sobald der Totmannschalter losgelassen wird, findet keine Berechnung der inversen Kinematik statt und somit auch keine weitere Roboterbewegung. Die Zustände bei der Nutzung des Systems können wie in Abbildung 6.34 in einem Zustandsautomaten dargestellt werden.

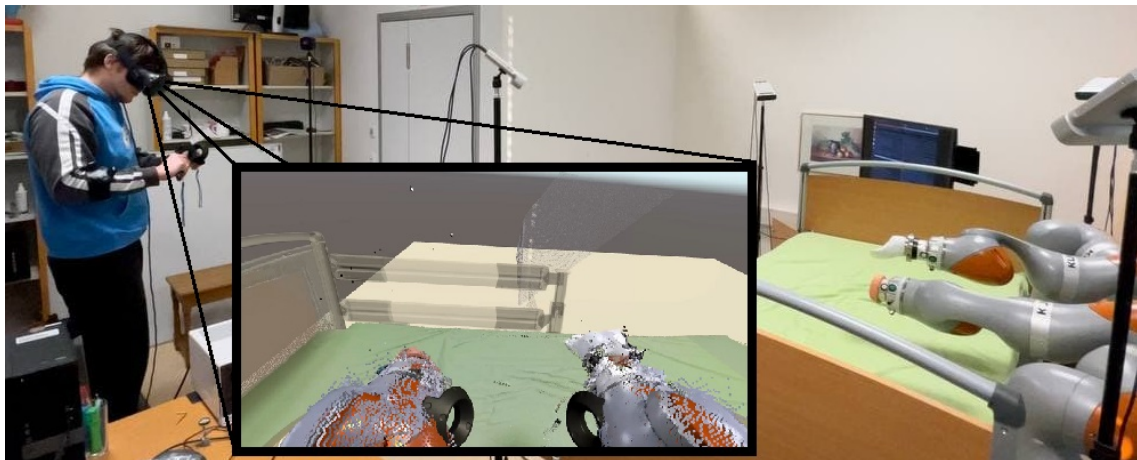


**Abbildung 6.34:** Die Zustände des Systems während der Nutzung. Zunächst befindet sich das System in Bereitschaft, wobei bereits alle Kommunikations- und Feedbackkanäle hergestellt sind. Eine Roboterbewegung wird erst durch das Drücken und Halten des Totmannschalters möglich, wobei das System in den Zustand Teleoperation wechselt. Durch eine Sicherheitsabschaltung, beispielsweise durch einen Nothalt, wird ein Fehlerzustand eingenommen, der einen Neustart erfordert. Innerhalb aller Zustände kann die Registrierung zwischen Punktwolkenrepräsentation und virtuellen Modellen vorgenommen werden.

Der Operator kann die Roboterarme auf diese Weise intuitiv mit den Bewegungen seiner Arme steuern und somit aktiv an Patiententransfers teilnehmen. Zusätzliche, an den Endeffektoren montierte, Werkzeuge helfen bei den Transferhandlungen.

Sowohl das visuelle Feedback, welches aus den Punktwolken des Multi-K4A-Systems abgeleitet wird, als auch das haptische Feedback, welches aus den Daten der Robotersensorik entsteht, erreichen den Operator. Somit wird eine immersive Teleoperation ermöglicht, die durch die Kombination aller Teilsysteme erlangt wird.

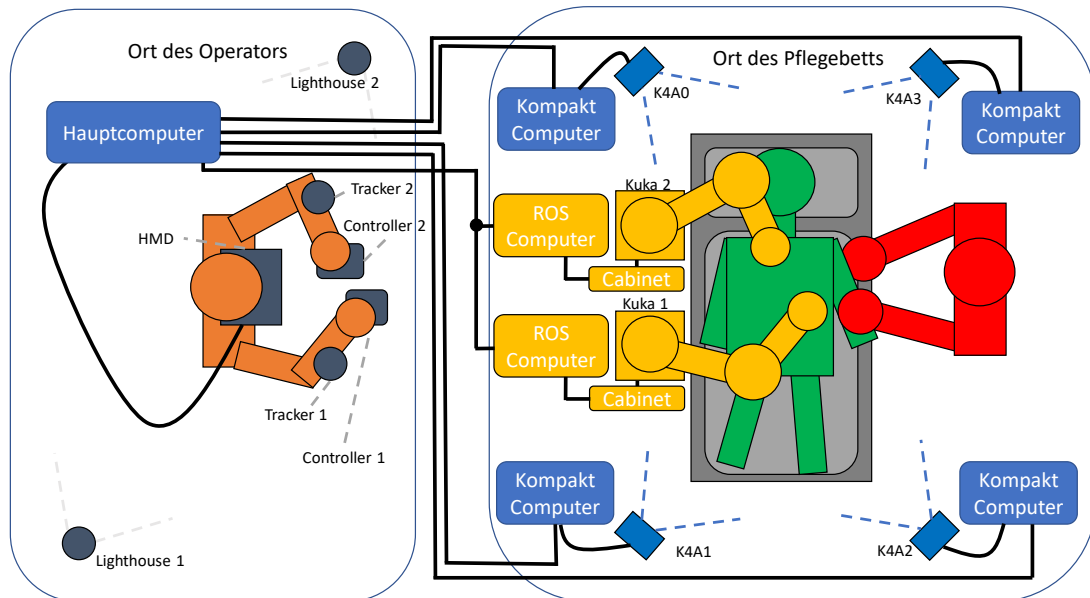
In Abbildung 6.35 wird das Gesamtsystem genutzt. Der Operator nutzt zur Steuerung der Roboterarme das VR-System und sieht die Punktwolkenrepräsentation im HMD. Die Sicht des Operators ist in der Mitte von Abbildung 6.35 dargestellt. Die Aufnahme wurde mit einem Weitwinkelobjektiv aufgenommen. Der Operator kann die Roboter von einem anderen Ort aus steuern.



**Abbildung 6.35:** Das Gesamtsystem im Einsatz. Der Operator (links) steuert das Robotersystem über das VR-System fern. Die Sicht des Operators zum aufgenommenen Zeitpunkt ist in der Mitte dargestellt. Die Roboterarme sind am Pflegebett montiert.

## 6.4 Übersicht Gesamtsystem

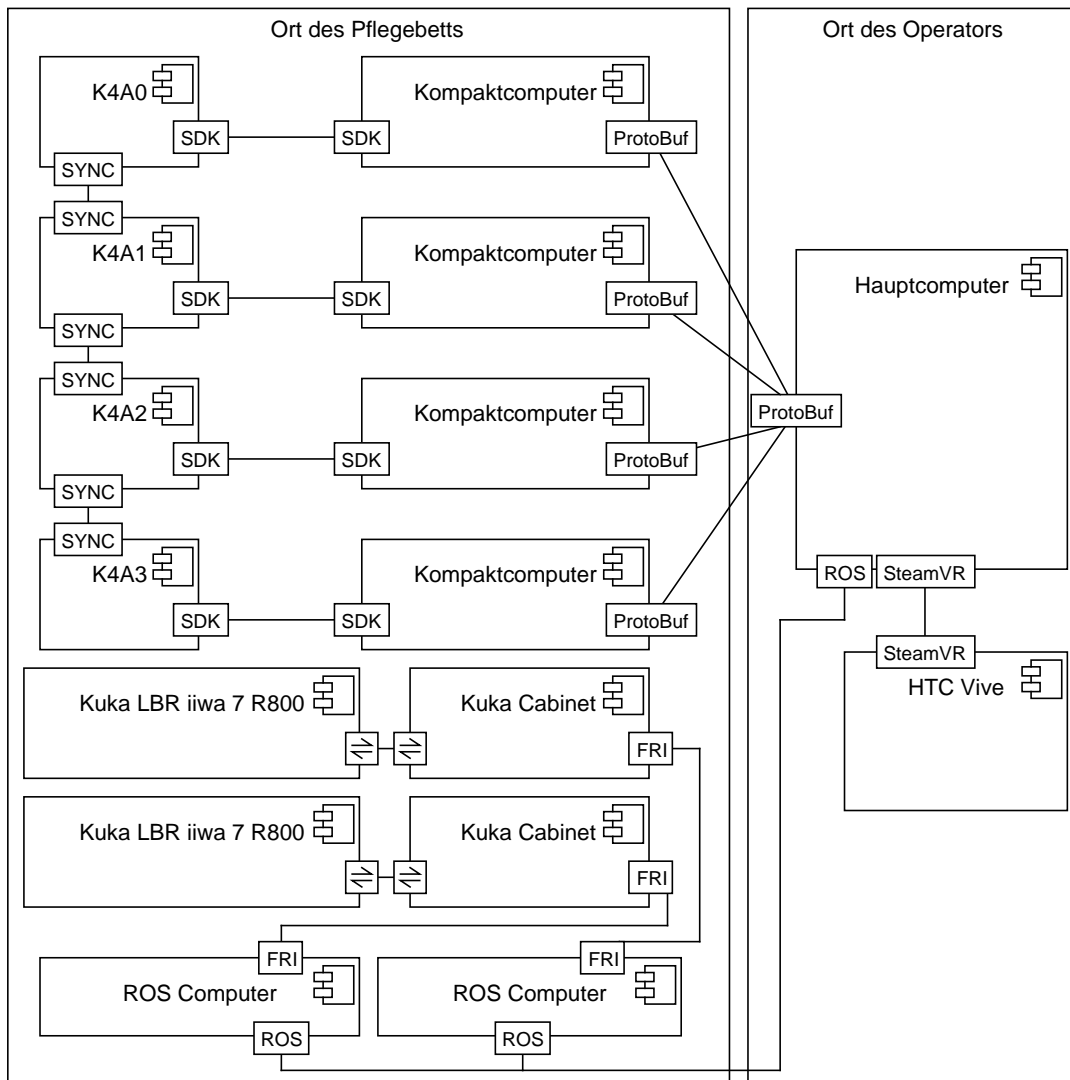
Die Implementierung des gesamten Systems ist durch die vorangegangenen Abschnitte beschrieben und wird an dieser Stelle in einer Übersicht zusammengefasst. Es besteht aus den drei vorgestellten Subsystemen Multi-K4A-System, Robotersystem und Virtual-Reality-Integration. Über spezialisierte Netzwerkschnittstellen werden Robotersteuerungsbefehle und Feedbackdaten ausgetauscht. Letztere sind sowohl visueller als auch haptischer Natur und erreichen den fernsteuernden Operator latenzarm (siehe Abschnitt 7.1). Der Ort des Pflegebetts und der Ort des Operators können räumlich getrennt sein. In Abbildung 6.36 ist das Gesamtsystem vollständig aufgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass der Austausch über herkömmliche Ethernetverbindungen und spezialisierte Schnittstellen erfolgt, kann eine Integration in bestehende öffentliche Netzwerke erfolgen.



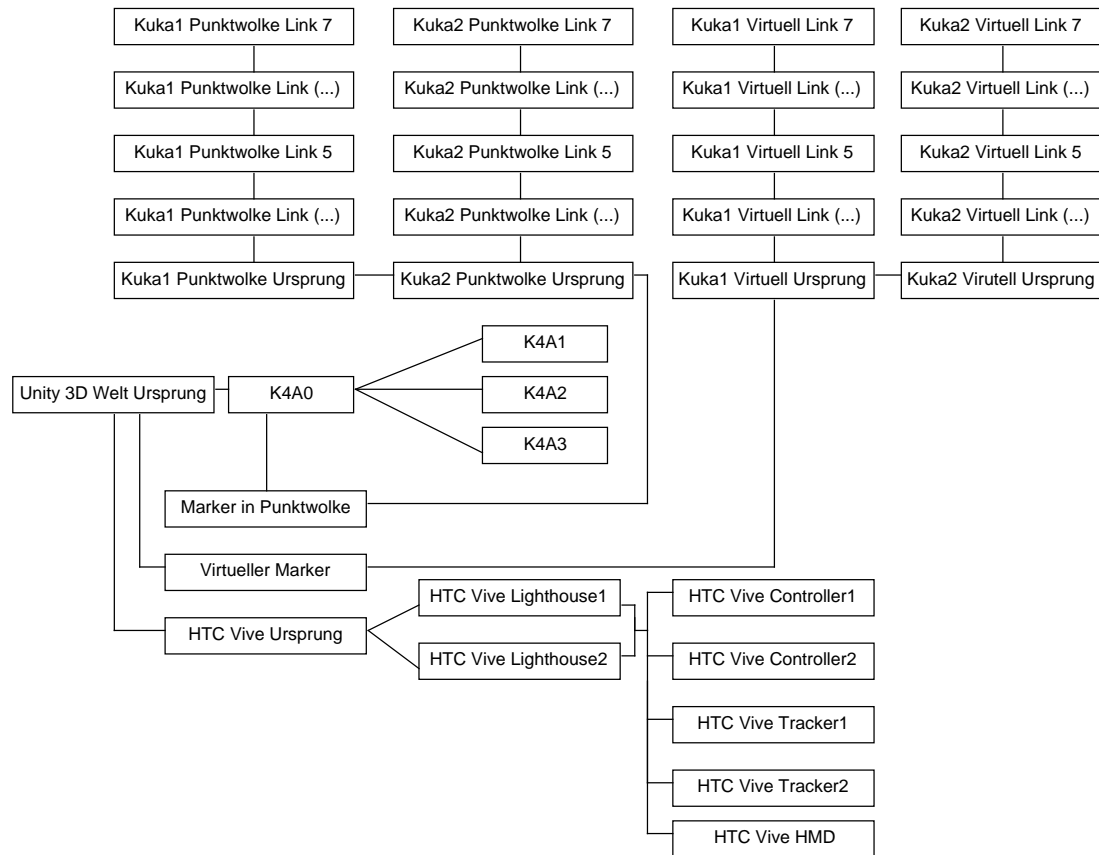
**Abbildung 6.36:** Der Aufbau des Gesamtsystems in der vollständigen Darstellung. Ein am Pflegebett befindlicher Pfleger (rot) führt den Transfer eines Patienten (grün) gemeinsam mit den ferngesteuerten Kuka-Robotern und der nötigen Roboterhardware (gelb) durch. Die direkte Steuerung durch den Operator (orange) durch ein immersives Eingabeinterface, findet mithilfe der VR-Geräte (grau) statt. Die Tiefenbildkameras des Typs *Azure Kinect* (K4A) (blau) erlauben mithilfe der Kompaktcomputer eine Übertragung zum Hauptcomputer. Dieser verarbeitet und empfängt alle Feedback- und Steuerungsdaten.

In Abbildung 6.37 ist das Gesamtsystem hinsichtlich der eingesetzten Hardwarekomponenten und der Schnittstellen dargestellt. Die Orte, an denen die Hardware installiert ist, sind ebenfalls angegeben.

Hinsichtlich der zu berechnenden Transformationen zwischen den Koordinatensystemen, ist eine Vielzahl verschiedener realer und virtueller Komponenten bei der Implementierung zu berücksichtigen. In Abbildung 6.38 sind die Koordinatensystemen, die für die Steuerung des Robotersystems notwendig sind, angegeben und die Topologie verdeutlicht.



**Abbildung 6.37:** Die Komponenten im Gesamtsystem. Am Ort des Pflegebetts befinden sich sowohl die *Azure Kinect (K4A)* Tiefenkameras als auch die beiden Roboter *Kuka LBR iiwa 7 R800*. Diese sind mit der beschriebenen Hardware verknüpft. Der Austausch von visuellem Feedback findet über die Schnittstelle *ProtoBuf* statt. Die Steuerungssignale für die Roboter sowie die Feedbackdaten, hinsichtlich der aufgewendeten Kraft, werden über Nachrichten des *Robot Operating System (ROS)* versendet. Über das *HTC Vive*-Virtual-Reality (VR)-System kann der Operator die Roboter steuern und dabei das Feedback empfangen. Die Programmierschnittstelle zwischen Hauptcomputer und *HTC Vive* ist *SteamVR*.



**Abbildung 6.38:** Die Koordinatensysteme des Gesamtsystems im Überblick. Als Wurzel ist der Ursprung von *Unity 3D* gewählt. Durch das Tiefenbildkamerasystem, der Position des Markers in der Punktwolke und der Position des virtuellen Markers können virtuelle Robotermodelle und die Roboter aus der Punktwolkenrepräsentation überlagert werden. Die Steuerung mittels des VR-Systems erfolgt ebenfalls über mehrere Koordinatensysteme der einzelnen Geräte.

# Kapitel 7

## Evaluation

Das vorgestellte ferngesteuerte Robotersystem muss schlussendlich evaluiert werden. Es befindet sich zwar im Forschungsstadium, dennoch kann der Prototyp nach unterschiedlichen Aspekten bewertet werden. Zunächst wird eine technische Evaluation vorgenommen (Abschnitt 7.1). Durch die dort gewonnen Erkenntnisse können Aussagen über die theoretische Einsatzbereitschaft des Systems getroffen werden. Da die physische Entlastung von Pflegekräften bei der Zusammenarbeit mit dem ferngesteuerten Robotersystem das erklärte Ziel dieser Forschungsarbeit ist, wird in einer Studie das Entlastungspotential in einem simulierten Patiententransfer, unter Einbezug von Pflegern, evaluiert (Abschnitt 7.2). Weitere Tests und Experimente, die in Abschnitt 7.3 vorgestellt werden, zeigen die Flexibilität des vorgestellten ferngesteuerten Robotersystems. Die Erkenntnisse aus der Evaluation sind in Abschnitt 7.4 zusammengefasst.

### 7.1 Technische Evaluation

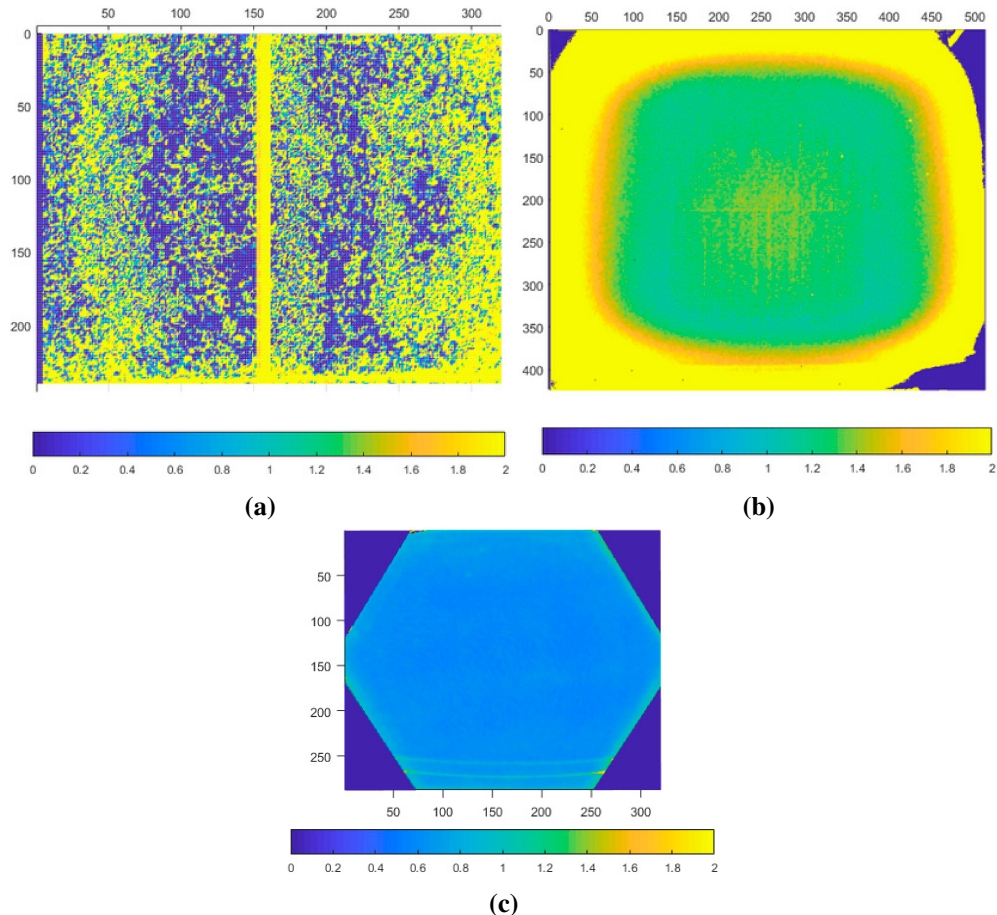
Die technische Evaluation betrifft die einzelnen Subsysteme des Gesamtsystems. Dazu zählen das Multi-K4A-System, das Robotersystem und die VR-Integration. Weiterhin enthalten die Subsysteme Teile, die bereits von anderen Wissenschaftlern oder durch Zertifizierungen, hinsichtlich der Technik, umfassend evaluiert wurden.

#### 7.1.1 Multi-K4A-System

Für das Multi-K4A-System können Aussagen über die Genauigkeit der einzelnen Punktwolken und der Güte der Registrierung getroffen werden. Der Genauigkeitswert ist durch Angaben von Microsoft abgedeckt [Mic21c] und weiterhin auch in einer Forschungsarbeit evaluiert [TDCH21]. Die Güte der Registrierung muss als Teil des hier vorgestellten ferngesteuerten Robotersystems in Eigenarbeit evaluiert werden. Die Qualität der Daten muss es dem Operator ermöglichen, die Szene vor Ort einschätzen zu können, was in innerhalb einer eigenen Publikation, bei der sich das System noch in einer früheren Phase befand, belegt ist [FBM<sup>+</sup>20].

### Genauigkeit der Tiefenbilddaten

Die Darstellung korrekter Informationen bezüglich der Tiefenbildinformationen im direkten Vergleich mit der Realität ist bei der Betrachtung einer einzelnen Kamera von Bedeutung. Für die K4A liegt eine Arbeit von Tölgyessy et al. vor, welche die Kamera mit den Vorgängermodellen vergleicht und diese als überlegen darstellt [TDCH21]. Hierbei werden unterschiedliche Aspekte untersucht. Ein Indiz für die Genauigkeit der Tiefenbilddaten ist das Rauschverhalten, was bei der K4A gegenüber den Vorgängermodellen weitaus geringer ausfällt [TDCH21] (siehe Abbildung 7.1). Die K4A hat gegenüber ihren Vorgängern ein hexagonales Sichtfeld beim Modus Near Field of View (NFOV).



**Abbildung 7.1:** Das typische Rauschen der Tiefenbildwerte bei der Betrachtung einer Fläche in 800 mm Entfernung im Vergleich der Tiefenbildkameras *Kinect v1* (a), *Kinect v2* (b) und *Azure Kinect* (K4A) (c) nach Tölgyessy et al. Bei der K4A ist der Tiefenbildmodus NFOV binned gewählt. In allen Bildern sind Werte über 2 mm auf 2 mm reduziert. Die Achsen repräsentieren die Pixelpositionen. Es ist deutlich erkennbar, dass das Rauschverhalten bei der K4A besser ist als bei den Vorgängerversionen [TDCH21] © 4.0.



Auch vom Hersteller Microsoft liegen Angaben bezüglich der Genauigkeit vor. Es werden Formeln zur Errechnung des Fehlers in der Tiefenbildinformation angegeben [Mic21c]. Diese Angaben sind unter der Restriktion des Arbeitsabstands und der Reflektivität anzuwenden [Mic21c]. Eine hohe Reflektivität der Objekte im erfassten Bereich einer K4A führt zu fehlerbehafteten Distanzwerten. Die von Microsoft angegebenen Fehlerbemessungen sind folgende:

- Systematischer Fehler
- Abstandabhängiger Fehler
- Zufälliger Fehler
- Gesamter Fehler

Ein Fehlermaß ist der **systematische Fehler**. Dieser spezifiziert den Unterschied zwischen der gemessenen Tiefe und Ground-Truth [Mic21c]. Zur Eliminierung von Rauschen wird diese Berechnung über mehrere Bilder ausgeführt (Gleichung 7.1) [Mic21c].

$$E_{Systematisch} = \frac{\sum_{t=1}^N d_t}{N} - d_{gt} \quad (7.1)$$

In der Gleichung 7.1 wird mit  $d_t$  die gemessene Tiefe zur Zeit  $t$  angegeben.  $N$  ist die Anzahl der Bilder die für die Mittelwertberechnung verwendet wird. Mit  $d_{gt}$  ist die Ground-Truth-Tiefeninformation beschrieben [Mic21c].

Der **abstandsabhängige Fehler** beträgt +0.1 % der Distanz  $d$  (siehe Gleichung 7.2). Er gibt an, wie sich die Qualität der Tiefenbilddaten mit zunehmender Distanz verschlechtert.

$$E_{Abstand} = \frac{d}{10^3} \quad (7.2)$$

Der typische systematische Fehler ist mit  $< 11$  mm + abstandsabhängigem Fehler ohne Multi-Path-Interference angegeben [Mic21c]. Multi-Path-Interference beschreibt das Phänomen, wenn ein Sensorpixel Licht integriert, welches von mehr als einem Objekt reflektiert wird [Mic21c]. Es wird angegeben, dass diesem Phänomen teilweise durch höhere Modulationsfrequenzen und Tiefenbilddateninvalidierung begegnet werden kann [Mic21c]. Die Tiefenbilddateninvalidierung beschreibt das Verwerfen von einzelnen Daten des Tiefenbilds, aufgrund invalider Daten [Mic21c].

Der **zufällige Fehler** (Gleichung 7.3) beschreibt eine Standardabweichung. Diese Standardabweichung ist der Unterschied in der Tiefeninformation über die Zeit für ein starres Objekt, welcher durch einen zufälligen Faktor variiert [Mic21c]. Diese Standardabweichung ist mit  $\leq 17$  mm angegeben [Mic21c].

$$E_{Zufall} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (d_t - \bar{d})^2}{N}} \quad (7.3)$$

Bei der Gleichung 7.3 ist  $N$  die Anzahl an Tiefenbildmessungen. Mit  $d_t$  ist die Tiefenbildmessung zum Zeitpunkt  $t$  beschrieben und  $\bar{d}$  beschreibt den Mittelwert, berechnet über alle Tiefenbildmessungen von  $d_t$  [Mic21c] (siehe Formel 7.4).

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N d_t \quad (7.4)$$

Der **gesamte Fehler** in Gleichung 7.5 entsteht aus der Summe von systematischem, zufälligem und abstandsabhängigem Fehler [Mic21c].

$$E_{Gesamt} = E_{Systematisch} + E_{Zufall} + E_{Abstand} \quad (7.5)$$

Beim maximalen Arbeitsabstand des in dieser Arbeit genutzten Tiefenbildmodus NFOV von 3,86 m, wäre der abstandsabhängige Fehler 3,86 mm groß. Für den gesamten Fehler (Gleichung 7.5) bei maximalem Arbeitsabstand und der Berücksichtigung der Angabe von Microsoft zum systematischen (ungünstigster Fall) und zufälligen Fehler, würde ein Wert von circa 3 cm entstehen (11 mm + 17 mm + 3,86 mm = 31,86 mm).

Die Abnahme der Genauigkeit zum Rand des Tiefenbilds, welche bei der Dokumentation der K4A nicht erwähnt, aber dennoch zu vermuten ist, ist ebenfalls nicht zu vernachlässigen. In Abbildung 7.1 lässt sich dieses Phänomen auch für die K4A erahnen. Weiterhin muss die K4A laut Tölgyessy et al. eine Aufwärmphase (mindestens 40-50 min) absolvieren, um stabile Entfernungsdaten zu liefern [TDCH21]. Der Unterschied zwischen kalter und aufgewärmter K4A hinsichtlich der Tiefenbilddaten beträgt jedoch weniger als 2 mm bei der Betrachtung einer circa 90 cm entfernten Fläche [TDCH21]. Die Genauigkeit des Tiefenbilds und somit der Punktwolke ist vor dem Hintergrund der Anwendung in dieser Arbeit als ausreichend einzuschätzen.

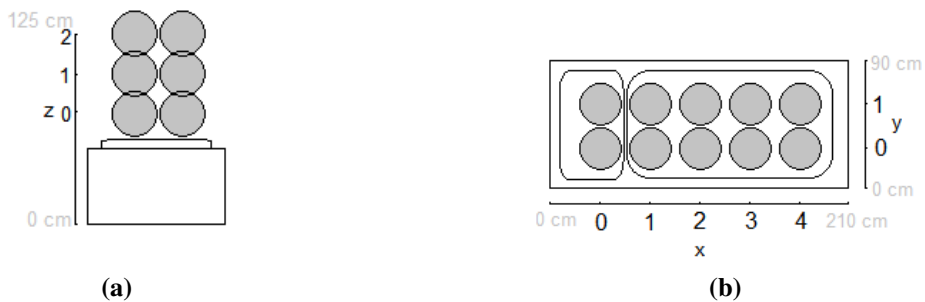
### Güte der Registrierung

Die Registrierung mehrerer Punktwolken wird in dem, in dieser Ausarbeitung beschriebenen, ferngesteuerten Robotersystem, vorgenommen, um eine Überlagerung der vier Punktwolken zu erreichen. Hinsichtlich der Bestimmung der Güte der Überlagerung kann auch von der Bewertung der Registrierung gesprochen werden. Zu diesem Zweck wird abermals eine Styroporkugel mit einem Durchmesser von 30 cm in die Szene eingebracht. Anhand der Kugel kann die Güte der Registrierung bestimmt werden. Diese variiert im Arbeitsraum am Pflegebett, sodass mehrere Messpunkte gewählt werden müssen. In der folgenden Messung dieser Güte wird an 30 unterschiedlichen Orten am Pflegebett dieser Wert bestimmt. Ein Fehler von weniger als 1 cm wird im Hinblick auf den Anwendungsfall in der Pflege als ideal betrachtet.

In der Messung werden folgende Schritte durchlaufen:

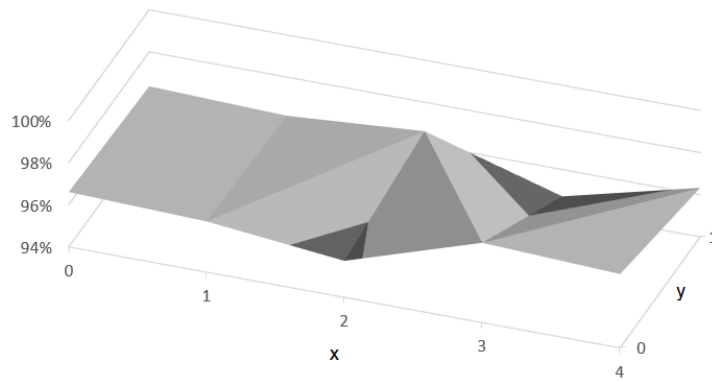
1. Die Kugel wird in der Punktwolke jeder K4A detektiert. Ein virtuelles Modell dieser Kugel wird in jeder Punktwolke an der selben Stelle inseriert, an der sich die Kugel befindet. Dies wird für jede Punktwolke über 256 konsekutive Daten durchgeführt und der Mittelwert der 256 Kugeln als Maß für den nächsten Schritt verwendet. Es entstehen bei vier K4As vier virtuelle Kugelmodelle
2. Eine Einheitskugel wird aus den vier Kugelmodellen gebildet. Der Unterschied zwischen den Mittelpunkten der vier Kugeln ist gering. Sofern dieser im Mittelwert über 7 mm beträgt, wird die Messung abgebrochen, da die Registrierung unzureichend ist.
3. Der Abstand der Punkte aller Punktwolken zur errechneten Einheitskugel wird berechnet. Hierbei werden nur die Punkte berücksichtigt, die eindeutig der Kugel zugeordnet werden können.
4. Der Prozentsatz der betrachteten Punkte, welche unter 1 cm Abstand zur Einheitskugel aufweist, wird als Maß definiert.

Die 30 unterschiedlichen Orte am Pflegebett sind in Anlehnung an die Reichweite der Roboter gewählt. Ein Raster aus Messpunkten wird um das Pflegebett, welches circa 210 cm misst, aufgebaut. Auf dieser Länge werden fünf Messpunkte gewählt. Die Breite des Betts beträgt 90 cm. Dort werden 2 Messpunkte angesetzt. Dies führt zu 10 Messpunkten in einer Ebene. Da es sich um ein motorisiertes Pflegebett handelt, das sich in der Höhe verstellen lässt, werden drei unterschiedliche Ebenen abgebildet, sodass letztendlich eine Gesamtzahl von 30 Orten entsteht, an denen die Güte der Registrierung mithilfe der Styroporkugel gemessen wird (siehe Abbildung 7.2).

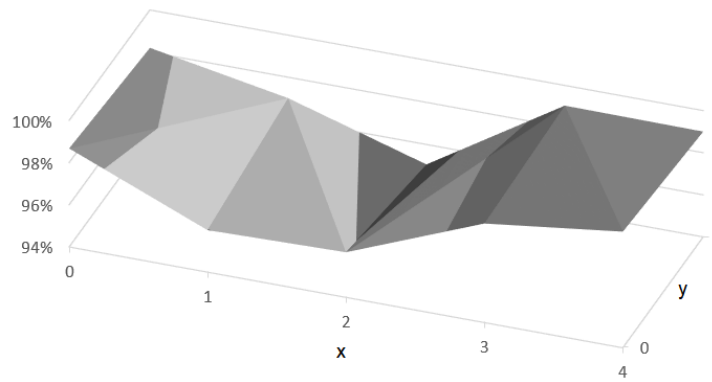


**Abbildung 7.2:** Die 30 Messpunkte, an denen die Styroporkugel zur Messung der Güte der Registrierung herangezogen wird. Auf der linken Seite (a), ist das Bett vom Kopfende aus betrachtet. Die Ebenen in Z-Richtung sind auf den Höhen 75 cm (0), 100 cm (1) und 125 cm (2). In der Vogelperspektive (b) ist die Einteilung in X-Richtung bei 35 cm (0), 70 cm (1), 105 cm (2), 140 cm (3) und 175 cm (4) gewählt. In Y-Richtung befinden sich die Messpunkte bei 30 cm (0) und 60 cm (1).

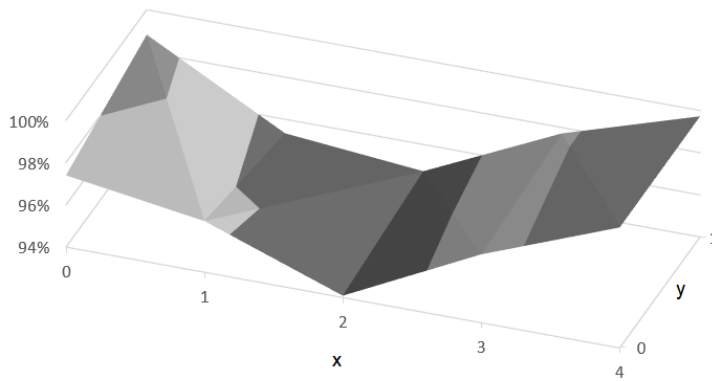
Der Anteil an Punkten, die zur Kugel gehören und weniger als 1 cm von der Einheitskugel entfernt sind, wird in Prozent ausgedrückt. Aufgrund der Messung in den unterschiedlichen Ebenen, die von der Höhe des Betts abhängig sind, entstehen drei dreidimensionale Karten (Abbildung 7.3). Wie zu erwarten, weisen die Messpunkte, bei denen die Kugel dicht an den Kameras sind, bessere Werte auf als jene, in der Mitte der observierten Areale. In den Karten formt dies ein Tal, in dem der prozentuale Anteil der Punkte unter 1 cm Abstand eher geringer ausfällt. Der schlechteste Wert befindet sich auf Ebene Z0 bei  $X = 4$  und  $Y = 0$  mit 94,73 % (siehe Anhang B). Bei der Wiederholung der Registrierung zeigen sich bei gleichem Kameraaufbau ähnliche Werte. Insgesamt ist die Registrierung aufgrund dieser Datengrundlage gut genug, um eine nahezu nahtlose Überlappung der vier Punktwolken zu erreichen.



(a)



(b)



(c)

**Abbildung 7.3:** Der Prozentsatz an Punkten die der Kugel zugehörig sind und unter 1 cm Abstand zur Einheitskugel aufweisen, für Ebene Z0 (a), Ebene Z1 (b) und Ebene Z3 (c). Im Durchschnitt beträgt der Wert  $Z_0=96,42\%$  bei einer Standardabweichung von  $0,81\%$ ,  $Z_1=97,73\%$  bei einer Standardabweichung von  $1,48\%$  und  $Z_2=97,12\%$  bei einer Standardabweichung von  $1,88\%$ .

### 7.1.2 Robotersystem

Die technische Evaluation des Robotersystems, bestehend aus den beiden Roboterarmen des Typs *LBR iiwa 7 R800*, kann bezüglich der relevanten Aspekte hauptsächlich nur theoretisch erfolgen. Dabei ist die Genauigkeit von zertifizierten Herstellerangaben abgedeckt. Die maximal aufwendbare Kraft ist ebenfalls vom Hersteller gegeben. Diese wird unter anderem durch die Angabe einer maximalen Nutzlast beschrieben und kann laut Forschung unter bestimmten Bedingungen die Angaben übersteigen [BB18]. Das Potential Kräfte aufzubringen wird für die hier genutzten Roboterarme anhand eines Tests demonstriert.

#### Genauigkeit beim Erreichen von Posen

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den eingesetzten Roboterarmen um industrielle Roboterarme handelt, ist eine hohe Genauigkeit beim Erreichen der angesteuerten Posen zu erwarten. Von Kuka wird diese Genauigkeit unter ISO 9283 [DIN98] mit  $\pm 0,1$  mm angegeben [KUK17]. Diese Zertifizierung ist für die Bewertung der Genauigkeit zum Erreichen von Posen hinreichend.

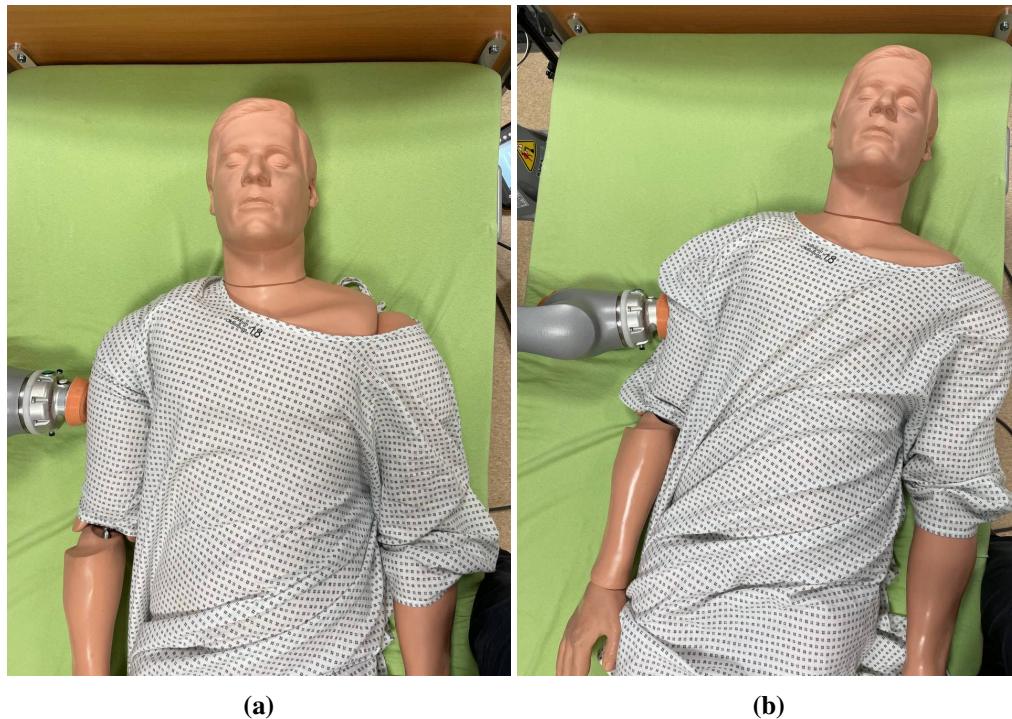
Die Roboter werden innerhalb dieser Arbeit mithilfe eines Impedanzcontroller gesteuert. Das Erreichen der final angegebenen Posen ist demnach von äußeren Einflüssen abhängig. Zu diesen zählt auch die Gravitationskraft. Diese fließt aufgrund der internen Gravitationskompensation nicht in die, von den Robotern gemessenen, externen Drehmomente mit ein. Aufgrund von Unebenheiten des Bodens oder ähnlichen Faktoren sind die gemessenen externen Drehmomente nicht genau null. Es werden trotz der internen Gravitationskompensation geringe externe Kräfte gemessen, welche die Roboter als externe Drehmomente anzeigen, obwohl keine weitere Kraft auf die Roboter ausgeübt wird. Ohne extern auf den Roboter aufgebrauchte Kräfte beschränkt sich der Fehler somit über alle Gelenke, je nach Gelenksteifigkeit, auf wenige Grad. Bei einer Gelenksteifigkeit von 50 Nm/rad auf allen Gelenken ist in unterschiedlichen Posen der Fehler kleiner als  $3^\circ$  für alle Gelenke. Die Differenz kann zwischen Sollwerten, welche vom Hauptcomputer gesendet werden und tatsächlichen Werten, die vom Roboter gemessen werden, gebildet werden. Mit dieser Differenz kann aber nur eine Aussage über die Funktion der Gravitationskompensation und ob der Roboter senkrecht steht, getroffen werden. Die Differenz entsteht aufgrund der Regelung durch den Impedanzcontroller und ist beim Auftreten externer Kräfte gewollt.

#### Aufwendbare Kräfte

Hinsichtlich der Kräfte, die von den Robotern ausgeübt werden können, sind die angegebenen Maximalwerte für die Drehmomente der Gelenke heranzuziehen. In einer Forschungsarbeit von Busson et al. wird für den Roboter *LBR iiwa 14 R820* angegeben, dass mithilfe von günstigen Gelenkstellung eine weitaus höhere Nutzlast als die angegebenen 14 kg erreicht werden können [BB18]. Der von diesen Autoren untersuchte Roboterarm unterscheidet sich von den in der hier vorliegenden Arbeit eingesetzten Roboterarmen nur in wenigen Merkmalen. Bei dem Modell *LBR iiwa 14 R820* sind 14 kg Traglast angegeben. Die vier Gelenke, die der Roboterbasis nahe sind, können höhere Drehmomente aufbringen, als es bei dem Modell für 7 kg der Fall ist. Weiterhin ist die

Reichweite um 20 mm erhöht. Ansonsten gibt es äußerlich keine Unterschiede im Aufbau. Es ist deshalb anzunehmen, dass ebenfalls eine weitaus höhere Nutzlast bei günstigen Hebelverhältnissen für das Modell *LBR iiwa 7 R800* möglich sind.

Versuche, den 80 kg schweren, auf dem Rücken liegenden Patientensimulator *Rescue Randy* [Sim21] mit einem *LBR iiwa 7 R800* seitwärts im Bett zu schieben sind erfolgreich, sofern zum Schieben ausschließlich die unteren beiden Gelenke des Roboters die nötige Kraft aufbringen (siehe Abbildung 7.4). Eine Sicherheitsabschaltung, die beim Überschreiten der maximalen Drehmomente der Gelenke eintritt, findet nicht statt. Es würde beim Gelenk, welches der Basis am nächsten ist, bei 176 Nm abgeschaltet werden. In dem Versuch mit dem Patientensimulator werden auf dem Gelenk nur Werte um die 80 Nm erreicht. Dabei ist allerdings anzumerken, dass bei diesem Versuch die Druckbelastung auf die Schulter des Patientensimulators hoch ist. Der Druck, der von einem kollaborativer Roboter auf einen Menschen ausgeübt werden darf ist in DIN ISO/TS 15066:2016 [DIN16] definiert. Maximalwerte zum Druck auf die Schulter werden in diesem Versuchsaufbau stark überschritten. Die Norm beschreibt jedoch eher die Zusammenarbeit mit einem Roboter innerhalb von industriellen Anwendungen, bei denen Roboter und Mensch beispielsweise an einem Werkstück arbeiten. Die Zweckentfremdung des Roboters als Arm einer nachgebildeten Pflegekraft zum Schieben des Patientensimulators ist in der Norm nicht bedacht. Die maximalen Kräfte, die ein einziger Roboterarm des Typs *LBR iiwa 7 R800* aufbringen kann, übersteigt bei diesem Versuch die von der Norm angegebenen Kräfte und reicht aus, um einen schweren Patientensimulator zu bewegen.



**Abbildung 7.4:** Das Schieben des Patientensimulators durch einen Roboterarm. In (a) ist die Ausgangslage dargestellt. Der Roboterarm berührt den Patientensimulator nur leicht. Durch das Aufwenden einer Kraft in dem Gelenk, welches der Roboterbasis am nächsten ist, kann der Patientensimulator auf dem Bett verschoben werden. Die Verschiebung ist auf Abbildung (b) dargestellt. Das Gelenk erreicht dabei Drehmomente von bis zu 80 Nm.

Letztendlich kann nicht ausschließlich von den theoretischen Möglichkeiten der Roboterarme auf ihre Kräfte im Einsatz geschlossen werden. Die Roboterarme können durch ihren Aufbau bei den Patiententransfers unterschiedliche Haltungen einnehmen, die die Hebelwirkungen begünstigen oder verschlechtern. Obwohl die Kräfte in der Theorie ausreichen, muss bei einem späteren Einsatz des Systems in der Praxis in empirischen Untersuchungen das Potential bei verschiedenen Roboterposen bewertet werden und mit den Vorgaben aus der Norm DIN ISO/TS 15066 [DIN16] abgeglichen werden. Aufgrund der Hürden bezüglich ethischer Bedenken beim Transfer von echten Menschen bleibt die Evaluation der Kräfte für den beschriebenen Prototyp auf den Umgang mit dem Patientensimulator beschränkt.



### 7.1.3 Virtual Reality Integration

Bei der Evaluation der technischen Möglichkeiten der VR-Integration wird die Darstellung bezüglich der Bildwiederholungsrate und der Latenz untersucht. Weiterhin muss überprüft werden, wie lange es dauert, bis die Steuerungsbefehle, die vom Operator ausgehen, von den Robotern ausgeführt werden. Die Integration betrifft neben den Subsystemen auch die Integration der Sicherheitsfeatures, durch welche das Gesamtsystem risikoarm genutzt werden kann.

Die adäquate Darstellung des visuellen Feedbacks wird in Form von Punktwolken erreicht. Weiterhin werden dem Operator virtuelle Modelle angezeigt. Die Veränderung der virtuellen Robotermodelle induziert eine Bewegung der realen Roboter. Innerhalb der virtuellen Szene, welche dem Operator angezeigt wird, sind die Punktwolken mit den virtuellen Modellen überlagert. Diese Überlagerung wird durch Farb- und Tiefendaten der Hauptkamera K4A0 mithilfe eines Markers berechnet (Abschnitt 6.3.3). Die Bewertung dieser Registrierung ist indirekt eine Bewertung der Qualität der Tiefendaten einer einzelnen K4A. Hinsichtlich der Genauigkeit werden Werte von Microsoft [Mic21c] und Tölgyessy et al. [TDCH21] angegeben (Abschnitt 7.1.1).

Die Softwarearchitektur, welche die Grundlage für das Anzeigen der Punktwolken und die Steuerung der Roboter bildet, ist eine Eigenentwicklung und muss daher überprüft werden.

#### **Bildwiederholungsrate**

Auf Grundlage der Daten des Tiefenbildkamerasystems werden Entscheidungen getroffen und Roboter bewegt. Daher muss die Qualität der Daten auch hinsichtlich der Bildwiederholrate stimmen. Wie bei allen Medien, die bewegtes visuelles Material darstellen, muss ein Mindestwert der Bildwiederholfrequenz erreicht werden. Diese variiert von Mensch zu Mensch und wird in dieser Arbeit auf Grundlage der minimalen Bildfrequenz der K4A auf 15 fps festgelegt. Die fps können in *Unity 3D* gemessen werden. Auch wenn die Bildwiederholrate in der Anwendung einbrechen sollte, so stellt das VR-Headset wenigstens das, zur Kopfbewegung passende, Sichtfeld dar. Die Punktwolken und die Bewegung der virtuellen Roboter- und Controllermodelle würden allerdings nicht flüssig dargestellt werden. Es gilt daher die Anwendung hinsichtlich der erreichten fps zu bewerten und, falls nötig, die Qualität der Punktwolken in Hinblick auf Sichtweite, Auflösung und maximale Bildwiederholrate anzupassen. Tabelle 7.1 zeigt die Messung der Bildwiederholfrequenz mit verschiedenen Einstellungen.

**Tabelle 7.1:** Die Bildwiederholraten im Überblick. Die gewählten Tiefenbildmodi sind NFOV unbinned und binned mit der Transformation Farbe zu Tiefe. **AA** steht für den Arbeitsabstand, in der die Punkte zur Entfernung der Kamera dargestellt werden. **BWM** beschreibt die maximale Bildwiederholrate der Punktwolke. Dieser Wert ist durch den gewählten Tiefenbildmodus festgelegt. Die im HMD erreichte Bildwiederholrate und somit ist mit **BWR** gekennzeichnet und beschreibt einen Mittelwert über 2 h, welcher als Leistungsindex verstanden werden kann. Die Standardabweichung beträgt in keiner Messung mehr als 1 fps.

Modus	AA [m]	BWM [fps]	BWR [fps]
NFOV ub	3.86	30	<b>28</b>
		15	<b>30</b>
	2.5	30	<b>30</b>
		15	<b>32</b>
NFOV b	3.86	30	<b>89</b>
		15	<b>89</b>
	2.5	30	<b>90</b>
		15	<b>90</b>

Die angegebenen Werte der erreichten Bildfrequenz in Tabelle 7.1 sind gegenüber der Maximalfrequenz des HMD zu bewerten. Diese beträgt 90 fps. Das heißt, dass ungefähr ein Drittel der maximal möglichen Bildwiederholrate im anspruchsvollsten Modus erreicht wird. Bei der Betrachtung der Daten im HMD ist dies jedoch von untergeordneter Bedeutung, da das Kopftracking weiterhin funktioniert und 28 fps ausreichend sind, um dem Nutzer ein flüssiges Bild darzustellen. Für die Anwendung ist keine Reduktion des Arbeitsabstands oder die Auswahl eines Modus mit geringerer Auflösung oder Bildwiederholrate nötig. Das Verwerfen von Tiefendaten mit einer Abstandsinformation von über 2,5 m erhöht die Bildwiederholrate nur marginal. Flüssigere Darstellungen, die bei den binned-Modi erreicht werden, bringen aufgrund der Tatsache, dass die Punktwolke mit 30 fps dargestellt wird, kaum einen Mehrwert. Die Bewegungen der virtuellen Modelle würden jedoch flüssiger erscheinen. Das System verarbeitet die Daten demnach angemessen. Die Auslastung im anspruchsvollsten Modus NFOV unbinned bei vier Punktwolken liegt für die CPU bei unter 25 % und für die GPU bei unter 50 %. Der Arbeitsspeicher ist ebenfalls nicht einmal zur Hälfte beansprucht.

Dennoch ist aufgrund der niedrigen Auslastungswerte der Hardware und der gemessenen Bildwiederholrate ein Flaschenhals in der Verarbeitung der Daten zu vermuten. Bei vier K4As im Modus NFOV unbinned und 30 fps liegt eine eingehende Datenübertragungsrate von 530 Mbit/s für jede Kamera vor. Bei der gleichzeitigen niedrigen Auslastung der GPU ist die Deserialisierung der Datenstreams als Ursache der geringen Bildwiederholrate zu vermuten. Die CPU wird bei diesen Aufgaben anscheinend nicht gleichmäßig genutzt. Für die Anwendung ist die Soft-

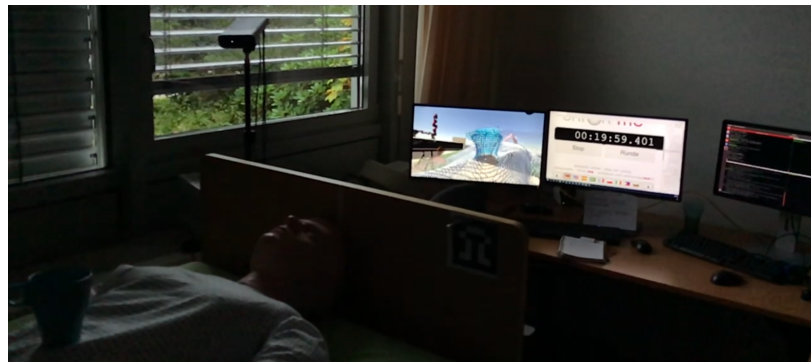
warearchitektur jedoch ausreichend. Bei Bedarf an höheren Bildwiederholfräquenzen kann eine leistungsfähigere CPU eingesetzt werden.

Durch die Robotersteuerung und die Berechnung der Roboterposen ergibt sich keine Verringerung der Bildwiederholungsrate. Somit kann festgehalten werden, dass sich die Bildwiederholungsrate für die Sicht des Operators im HMD mit der eingesetzten Hardware in einem Bereich befindet, durch den das System uneingeschränkt nutzbar ist.

### **Latenz**

Hinsichtlich der Latenz muss für verschiedene Systeme unterschieden werden und auch die Entfernung zwischen Ort des Pflegebetts und dem Ort des Operators mit einbezogen werden. Jeder Kompaktcomputer ist im vorgestellten Aufbau über ein dediziertes CAT5 Ethernetkabel mit dem Hauptcomputer verbunden. Der Hauptcomputer verfügt über insgesamt fünf Ethernetports. Die Kabel weisen eine Länge von 12 m auf. Daher wäre eine Steuerung aus einem anderen Raum oder Stockwerk in dieser Konfiguration problemlos möglich. Weiterhin ist der übrige Ethernetport am Hauptcomputer über einen herkömmlichen Netzwerkrouter mit den beiden ROS-Computern verbunden. Diese Computer teilen sich demnach die Verbindung zum Hauptcomputer. Hier erreicht die Gesamtlänge der Kabel von ROS-Computer zu Hauptcomputer, mit dem Router als Zwischenstation, 24 m. Aufgrund der, für Netzwerktechnik relativ kurzen Distanzen, ist eine Latenz hier höchstens durch Paketverluste zu erwarten, nicht aber durch die verzögerte Ankunft elektrischer Signale. Aufgrund der theoretischen räumlichen Trennung durch die Länge der Kabel können Latenzmessungen in einem Raum stattfinden. Ob sich der Operator im gleichen Raum befindet oder nicht, beeinflusst die Messungen nicht.

Innerhalb dieses Aufbaus kann zunächst die Zeit gemessen werden, mit der ein reales Ereignis am Pflegebett für den Operator sichtbar wird. Hierzu wird ein Experiment durchgeführt. Ein real vorhandenes Objekt (in diesem Versuchsaufbau eine Tasse) wird auf das Pflegebett gestellt (siehe Abbildung 7.5.a). Mit einer High-Speed-Kamera (240 Hz) werden dieses Objekt, die Punktwolkendarstellung und eine Stoppuhr gefilmt. Im Experiment wird nun die Tasse erleuchtet (siehe Abbildung 7.5.b). Die Änderung der Helligkeit der Tasse kann auch in der Punktwolkendarstellung mit Verzögerung wahrgenommen werden (siehe Abbildung 7.5.c). Diese Verzögerung kann durch das gleichzeitige filmen der Stoppuhr gemessen werden. Im Modus NFOV unbinned ist dieser Wert über mehrere Versuche nahezu gleichbleibend bei circa 129 ms.



(a)



(b)

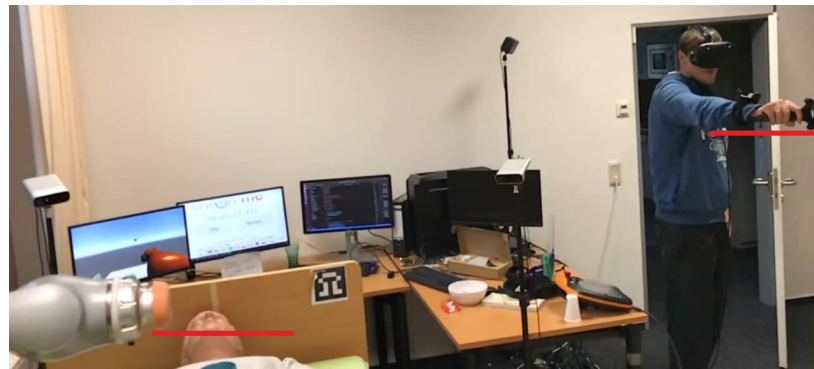


(c)

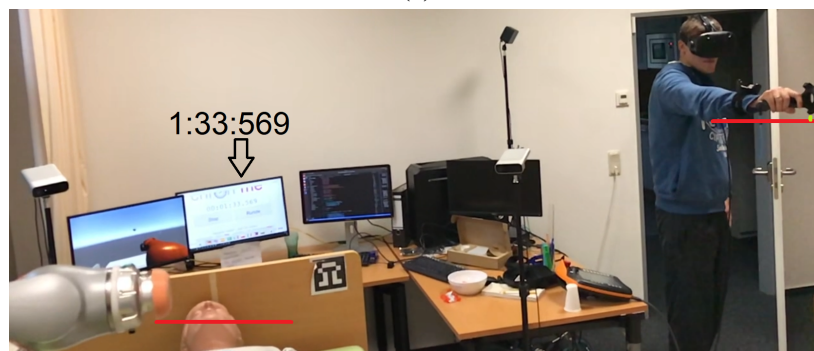
**Abbildung 7.5:** Die Latenzmessung zur Bestimmung der Verzögerungen in der Punktwolkendarstellung. In der Ausgangssituation des Experiments (a) wird die Tasse noch nicht angeleuchtet. In (b) wird die Tasse zum Zeitpunkt 19:59:530 erhellt, die Punktwolke zeigt jedoch keine Änderung. Sowohl die Tasse als auch ihre Punktwolkenrepräsentation sind erst in Abbildung (c) zum Zeitpunkt 19:59:659 erhellt. Eine Latenz von 129 ms ist gegeben.

Es muss also mit einer Verzögerung von 129 ms gerechnet werden, bis ein Ereignis dem Operator dargestellt wird. Bei dieser Zeit wird ein erheblicher Anteil der Zeit von den K4As für die Aufnahme des Bildes benötigt. Für die Ausgabe eines Farbbildes, in der gewählten Auflösung von  $2048 * 1536$  Pixeln wird eine Latenz von 71 ms angegeben [Mic21g]. Das Tiefenbild benötigt für NFOV unbinned 42 ms [Mic21g]. Hier ist aber eine Nebenläufigkeit zu erwarten, weswegen der größere Wert ausschlaggebend ist.

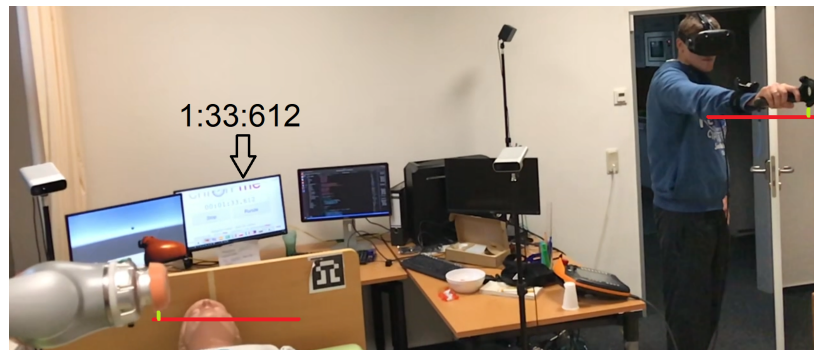
Weiterhin ist zu untersuchen, wie lange eine Eingabe des Operators benötigt, um vom Roboter ausgeführt zu werden. Eine Quantifizierung der Verzögerung zwischen Eingabe und Ausführung ist nötig, um diesen Aspekt zu bewerten. Dies kann über einen ähnlichen Versuchsaufbau stattfinden. Dabei werden andere Objekte mit der High-Speed-Kamera gefilmt, als im vorherigen Fall. Die Bewegung des Roboters wird durch den Arm des Operators induziert. Deswegen müssen sowohl der Arm des Operators und der Roboter gleichzeitig betrachtet werden. Wie lange es dauert bis eine, durch den Operator induzierte, Bewegung vom Roboter auch vom Roboter begonnen wird, kann auf diese Weise festgestellt werden (siehe Abbildung 7.6). Dabei wird der Zeitpunkt des Beginns der Armbewegung des Menschen mit dem Zeitpunkt des Beginns der Roboterbewegung verglichen. Für diese Latenz wird ein Wert von 43 ms festgestellt. Da direkt zwischen Operatorarmbewegung und Roboterbewegung gemessen wird, enthält diese Messung, neben der Übertragung von Befehlen an die Roboter, auch die Berechnung der inversen Kinematik. Diese Berechnung wird in jedem Frame neu berechnet.



(a)



(b)



(c)

**Abbildung 7.6:** Der Latenztests für die Messung der Verzögerung von Steuerungsbefehleingabe und Roboterbewegung. Die Ausgangsposition von Operatorarm und Roboterarm sind mit einer roten Linie gekennzeichnet. Eine Veränderung dieser Position ist mit einer grünen Linie dargestellt. Zum Zeitpunkt in (a) haben sich weder Operatorarm noch Roboter bewegt. In Abbildung (b) hat sich der Arm des Operators bereits nach oben bewegt, der Roboterarm verharrt jedoch auf seiner Position (Zeit 1:33:569). In (c) startet die Roboterbewegung, die von der Armbewegung des Roboters abgeleitet wird (Zeit: 1:33:612). Demnach ist eine Verzögerung von 43 ms gegeben.

Beim VR-System HTC *Vive* ist ebenfalls mit einer geringen Verzögerung bei Kopfbewegungen, Eingaben und der Ausgabe des Bildes zu rechnen. Niehorster et al. bestimmen 22 ms für diesen Wert [NLL17].

Demnach kann innerhalb des Gesamtsystems, sowohl für die visuellen und haptischen Feedbackdaten als auch bei der Eingabe der Steuerungsdaten eine niedrige Latenz erreicht werden. Diese machen es aus technischer Sicht möglich, die Roboter in diesem Aufbau zu steuern. Bei zunehmender Entfernung von Operator und Robotersystem muss mit erhöhter Latenz gerechnet werden.

### **Sicherheit**

Auch im Prototypenstadium muss die Robotersteuerung in Studien und Experimenten sicher einsetzbar sein. Deswegen sind mehrere Sicherheitsfeatures implementiert. Die Sicherheit wird über mehrere Stufen garantiert:

- Physischer Notaus am Pflegebett
- Sicherheitskonfigurationen innerhalb des *Kuka Cabinets*
- Softwareseitige Sicherheitsvorkehrung

Es ist zunächst zu betonen, dass das Gesamtsystem keine Zertifizierung oder ähnliches durchlaufen hat, was die Sicherheit der Benutzung und der Zusammenarbeit mit dem System am Pflegebett betrifft. Dennoch sind einige Vorkehrungen getroffen. Physische Nothalttaster an den *Smartpads*, welche sich am Bett befinden, erlauben es der Pflegekraft vor Ort, die Roboter mit einem Tastendruck auszuschalten. Diese Notabschaltung ist von Kuka bereitgestellt und Voraussetzung für die Zertifizierung der Roboter nach DIN EN ISO 13849 Performance-Level mit Struktur-Kategorie 3 [DIN15]. Innerhalb der Programmierung auf dem *Cabinet* sind Sicherheitskonfigurationen hinterlegt, welche Winkelgeschwindigkeiten und Drehmomente der Gelenke überwachen. Beim Überschreiten dieser wird ebenfalls ein sofortiger Nothalt ausgelöst. Weiterhin ist in der Steuerungssoftware ein Totmannschalter implementiert. Sofern dieser nicht ständig gedrückt wird, kommt es zu keiner Roboterbewegung. Da die Drehmomente der Roboter jederzeit ausgelesen werden können, kann softwareseitig auf sie reagiert werden. Unter der DIN ISO/TS 15066 [DIN16] können Maximalkräfte, die von einem Roboter auf einen Menschen ausgeübt werden dürfen, abgelesen werden. Durch Umrechnung der Gelenkdrehmomente kann beispielsweise durch die Vibrationsmotoren in den VR-Controllern ein Vibrationsalarm ausgehen oder das System abgeschaltet werden.

Es handelt sich nicht um ein zertifiziertes System, auch wenn Einzelkomponenten eine Zertifizierung aufweisen.

## **7.2 Studie zur Messung der physischen Entlastung**

Die in der technischen Evaluation gewonnenen Erkenntnisse liefern Aussagen über die theoretische Einsatzbereitschaft des Systems zur Reduktion physischer Belastungen im Rahmen von Patienten-

transfer. Um die Praktikabilität des Systems aufzuzeigen, wird eine Studie zur Quantifizierung der Entlastung des Pflegepersonals unter Robotereinsatz durchgeführt. Um dies anhand von Messungen zu zeigen, wird eine Studie durchgeführt, bei der die Entlastung durch den Robotereinsatz quantifiziert wird. Die Studie trägt den Titel „Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung“ und ist von der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg unter der Nummer Drs.EK/2019/078 mit einem positiven Ethikvotum versehen. Im Folgenden werden das Studiendesign, das Messsystem und die Ergebnisse der Studie vorgestellt.

### 7.2.1 Studiendesign

In der Studie wird die Belastung eines herkömmlichen Patiententransfers im Vergleich mit einem robotergestützten Patiententransfer gemessen und ausgewertet. In diesem Kontext liegt der Fokus auf der Evaluation eines einarmigen, statt des beschriebenen zweiarmigen, Roboteraufbaus. Dadurch wird die Variation der Abläufe in einer frühen Entwicklungsphase bei der Steuerung verringert, was vergleichbare Ergebnisse über mehrere Tests erzeugt. Weiterhin kann von dem Potential des einarmigen Aufbaus auf das Potential des zweiarmigen Aufbaus geschlossen werden. Der restliche Aufbau des Robotersystems unterscheidet sich nicht von der bereits beschriebenen Konfiguration.

Die Studie ist zur Analyse und Bewertung mehrerer Forschungsvorhaben konzipiert. Neben dem immersiv ferngesteuerten Robotersystem, wird auch eine Robotersteuerung mit vordefinierten Pfaden erprobt (siehe eigene Veröffentlichung[KAG<sup>+</sup>20]), sowie Mobilitätsassessments durchgeführt (siehe eigene Veröffentlichung [BFL<sup>+</sup>20a]). Sowohl die alternative Robotersteuerung als auch die innerhalb der Studie erfassten Mobilitätsassessments sind bei der Evaluation der Belastungsreduktion für das beschriebene ferngesteuerte Robotersystem irrelevant.

Insgesamt haben 12 Probanden an der Studie teilgenommen. Von diesen wurden 9 Probanden für die Analyse der Belastungsreduktion herangezogen. Der erste Proband wurde beim Studienstart zu einer Pilotmessung herangezogen, bei der der Roboter noch nicht über VR gesteuert wurde. Dieser erfolgreiche Pilotversuch ist bereits publiziert worden [FBK<sup>+</sup>20]. Die übrigen zwei der drei nicht berücksichtigten Probanden waren aufgrund ihrer körperlichen Verfassung nicht in der Lage den herkömmlichen Transfer zufriedenstellend zu vollenden. Bei den Probanden handelt es sich um aktive sowie ehemalige professionelle Pfleger. Der Altersdurchschnitt beträgt 32,83 Jahre. Der jüngste Proband ist 24, der älteste 58 Jahre alt.

Der Studienablauf ist für jeden der Probanden gleich (siehe Abbildung 7.7). Zunächst werden die angesprochenen Mobilitätsassessments durchgeführt. Anschließend wird der Patiententransfer mit dem 80 kg schweren Patientensimulator *Rescue Randy* [Sim21] durchgeführt. Die Aufgabe besteht darin, die Puppe von der Rückenlage auf die Seite zu transferieren, kurz zu verharren und wieder zurückzulegen. Dieser Transfer wird ohne Roboterunterstützung zunächst in zwei Varianten durchgeführt.

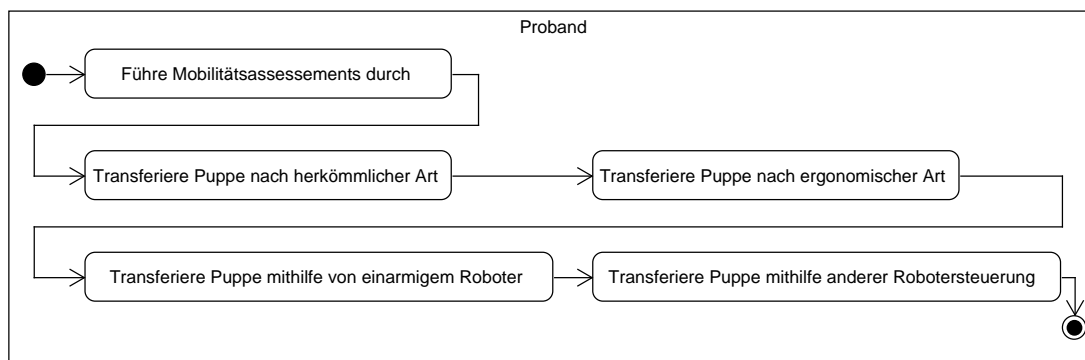
In der **ersten Variante** erfolgt der Transfer auf herkömmliche Weise, indem sich der Proband nach vorne in Richtung des Patientensimulators beugt und an dessen linke Schulterregion greift.



Mit einer ruckartigen Bewegung wird der Simulator in die Seitenlage positioniert (siehe Abbildung 7.8.a). Dieser Transferstil kommt dem gängigen Handlungsablauf in der häuslichen oder stationären Altenpflege nahe.

Die **zweite Variante** wird unter strengen ergonomischen Vorgaben durchgeführt, die einen belastungsreduzierenden Patiententransfer ermöglichen. Hierbei erfolgt zunächst eine Vorpositionierung des Probanden parallel zum Pflgebett. Zur Entlastung der Rückenmuskulatur erfolgt das Verlagern des Patientensimulators in die Seitenlage hauptsächlich aus den Beinen (siehe Abbildung 7.8.b). Diese Variante ist zwar ergonomisch sinnvoller, wird in der Realität vermutlich aber selten praktiziert.

Anschließend erfolgt der Transfer robotergestützt innerhalb der **dritten Variante** durch den Einsatz des hier beschriebenen immersiv ferngesteuerten, einarmigen Robotersystems (siehe Abbildung 7.8.c). Die Fernsteuerung des Roboters durch vordefinierte Pfade wird als letzter Test durchgeführt und Teil anderer Forschungsvorhaben.



**Abbildung 7.7:** Der Studienablauf für die Probanden. Zunächst werden Mobilitätsassessments durchgeführt. Die Puppe wird in zwei unterschiedlichen Varianten transferiert. Anschließend findet der robotergestützte Transfer unter Nutzung des Systems aus dieser Arbeit statt. Abschließend wird ein weiterer, für diese Arbeit nicht relevanter, Test mit einer automatischen Robotersteuerung durchgeführt.



(a)



(b)



(c)

**Abbildung 7.8:** Die drei relevanten Durchführungen des simulierten Patiententransfers. In (a) ist eine herkömmliche Herangehensweise für den Transfer abgebildet (Variante 1). In Abbildung (b) wird ein ergonomisch vorteilhafter Transfer dargestellt (Variante 2). In (c) wird der Transfer mit Hilfe des Roboterarms durchgeführt (Variante 3).

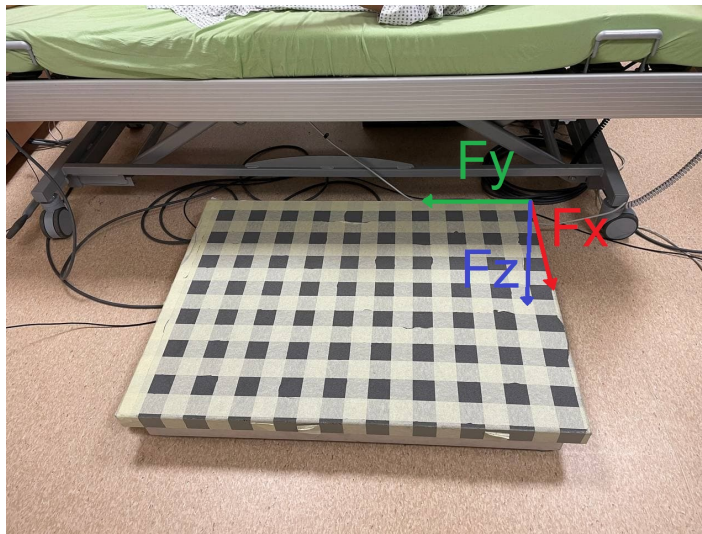
Für den Vergleich werden in der Evaluation des vorgestellten ferngesteuerten Robotersystems die herkömmliche Variante aus Abbildung 7.8.a und der robotergestützte Transfer aus 7.8.c herangezogen. Der Transfer aus Abbildung 7.8.b ist ein Idealbeispiel und daher nicht als üblich anzunehmen. Der herkömmliche Transfer ist in der Praxis eher zu vermuten und wird mit der hypothetischen Zwei-Pfleger-Situation verglichen, wobei der Arm des zweiten Pflegers durch den Roboterarm nachgebildet wird. Der Roboterarm wird direkt von einem Operator über das VR-System ferngesteuert.

### 7.2.2 Messsystem

Die Belastungsreduktion muss quantifiziert werden, um beurteilen zu können, ob das Robotersystem bei Patiententransfers unterstützt. Dabei muss der Kontext der Handlung bei der späteren Auswertung nachvollziehbar bleiben. Es werden daher folgende Komponenten bei der Bestimmung der Belastungsreduktion eingesetzt:

- Kraftmessplatte zur Ermittlung der Bodenreaktionskräfte
- Oberflächenelektromyograph (SEMG) zur Bestimmung der Muskelaktivität an den unteren Extremitäten
- Eine Variante des Multi-K4A-System zur Kontextualisierung der Messungen hinsichtlich der Aktionen beim Patiententransfer

Zur Messung der wirkenden Kräfte wird eine Kraftmessplatte der Firma Advanced Mechanical Technology, Inc. mit der Bezeichnung *Accupower-O* [Adv21] eingesetzt. Die auf den Boden wirkenden Kräfte können aus der Platte inklusive Richtung ausgelesen werden. Die Kraftmessplatte weist eine Fläche von 1016 mm \* 762 mm auf. Die Trittfläche ist 127 mm hoch. Zusätzlich wird die Kraftmessplatte mit einem Raster beklebt, welches zur Kontextualisierung der ausgeführten Handlung eingesetzt wird (siehe Abbildung 7.9). Die Ausrichtung des Koordinatensystems zur Bestimmung der Richtung der Kraft ist in Abbildung 7.9 dargestellt.



**Abbildung 7.9:** Die eingesetzte Kraftmessplatte. Sie ist zusätzlich mit einem Raster versehen. Die Richtungen der Kräfte sind am Rand dargestellt. Die Kraft  $F_z$  zeigt senkrecht in Richtung Boden.

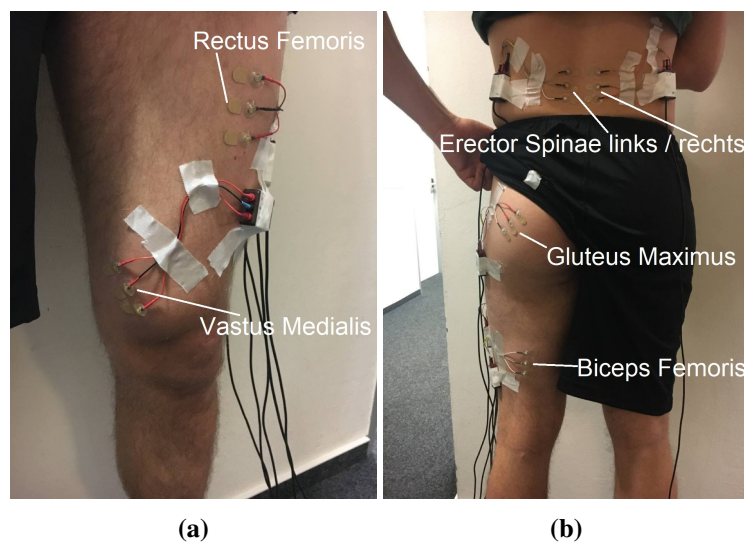
Das SEMG ermöglicht das Auslesen der elektrischen Muskelaktivität als Spannungssignal. Dabei werden in dieser Studie die Muskeln des linken Beins und die lumbalen Rückenmuskeln beider Seiten untersucht. Die Muskelaktivitätsmuster während eines Transfers können im Zusammenspiel des Beins und der unteren Rückenmuskeln ausgewertet werden. Die Betrachtung eines einzelnen Beins reicht laut Literatur bei anspruchsvollen Mobilitätsassessments aus, da sich die Werte im Vergleich beider Beine nur marginal unterscheiden [CCB<sup>+</sup>16].

Eine gegenseitige Einflussnahme von Rücken- und Beinmuskulatur bei Pflegetransfers ist anzunehmen, da das Training der Beine bei der Prophylaxe von Rückenschmerzen empfohlen wird [KBS<sup>+</sup>14] [KGB<sup>+</sup>15]. Eine ausgeprägte Beinmuskulatur kann den Rücken der Pfleger bei physisch stark belastenden Tätigkeiten entlasten [KGB<sup>+</sup>15] und somit indirekt Aufschluss über die Rückenbelastung geben. Besonders hervorzuheben sind dabei die Beinmuskeln, die auch bei der Beinübung Squat zum Einsatz kommen. Ein Squattraining hilft Rückenproblemen vorzubeugen, da die trainierten Muskeln auch bei alltäglichen Handlungen, wie dem Anheben von Lasten, aktiviert werden [Sch10].

In Abbildung 7.10 sind die Muskeln mit den Elektroden des SEMG beklebt. Für einen Muskel sind jeweils drei Elektroden nötig. Es werden neben den typischerweise beim Squat aktivierten Muskeln [Sch10] auch die unteren Rückenmuskeln betrachtet.

Im Einzelnen handelt es sich um folgende Muskeln:

- Vastus Medialis links
- Rectus Femoris links
- Biceps Femoris links
- Gluteus Maximus links
- Erector Spinae rechts
- Erector Spinae links



**Abbildung 7.10:** Die Elektroden am Körper eines Probanden, die zur Messung des SEMG-Signals der betreffenden Muskeln benötigt werden © Anna Brinkmann. Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Anna Brinkmann.

Das zur Robotersteuerung verwendete Multi-K4A-System kann in einer Abwandlung dafür eingesetzt werden, Pflge transfers aufzunehmen. Dies war bereits mit dem Vorgängersystem möglich (siehe eigene Veröffentlichungen [FBO<sup>+</sup>18] [FBF<sup>+</sup>21]). Der Einsatz erlaubt es, bei der Auswertung der Daten aus Kraftmessplatte und SEMG eine Kontextualisierung der gemessenen Werte hinsichtlich der Handlungen der Probanden vorzunehmen.

### 7.2.3 Auswertung

Die Auswertung basiert auf den Daten des SEMG und der Kraftmessplatte. Es werden für den Probanden zwei Transfers verglichen: der herkömmliche Transfer, bei dem der Patientensimula-

tor auf übliche Weise auf die Seite gedreht werden soll und der Transfer mit Unterstützung des ferngesteuerten Roboterarms. Der Ablauf beider Transfers ist in Phasen eingeteilt:

1. **Zugphase:** Hier wird der Patientensimulator von der Rückenlage auf die Seite transferiert.
2. **Seitenlage:** Der Patientensimulator befindet sich auf der Seite und wird vom Probanden gehalten.
3. **Schubphase:** Am Ende des Transfers muss der Patientensimulator langsam in seine Ausgangslage zurück gebracht werden.

Diese Phasen können für jeden Probanden im Vergleich der beiden Transferstile betrachtet werden. Die Start- und Endpunkte der Phasen ist durch die beobachtbare Verschiebung des Patientensimulators definiert. Ein Ziehen am Patientensimulator wird erst als Zugphase definiert, sobald sich der Patientensimulator auch bewegt. Aus den beiden Datenströmen der Kraftmessplatte und des SEMG lassen sich jeweils mehrere Informationen ableiten. Aufgrund der Nutzung des Patientensimulators, der wegen fehlender Gelenke nur eingeschränkt mit einem Menschen verglichen werden kann, verhalten sich die Probanden anders, als würden sie den Transfer mit einem echten Menschen durchführen. Dies äußert sich darin, dass beim Zurücklegen im herkömmlichen Transfer des Patientensimulator vielfach fallen gelassen wird, was die Kraft- und SEMG-Daten verändert (siehe eigene Veröffentlichung [KGF<sup>+</sup>21]). Deswegen wird im weiteren Verlauf hauptsächlich die Zugphase untersucht. Diese Phase ist zwischen einem Menschen als Patient und Patientensimulator eher zu vergleichen als die Schubphase.

### Kraftdaten

Bei den Daten der Kraftmessplatte kann zunächst die Entwicklung der Bodenreaktionskräfte im zeitlichen Verlauf abgelesen werden. Die Kräfte werden einzeln für verschiedene Richtungen ( $F_x, F_y, F_z$ ) mit Vorzeichen angegeben (siehe Abbildung 7.9). Die Änderung der auftretenden Kräfte kann sowohl für jede einzelne Krafrichtung als auch für alle Krafrichtungen insgesamt ausgewertet werden. Mit der ersten Variante kann anhand der Phasen eine Auswertung der Peaks stattfinden, die je nach Transferstil auftreten. Dies ermöglicht es an ausgewählten Beispielen hohe Kraftspitzen nachzuweisen, beziehungsweise aus deren Fehlen Rückschlüsse zu ziehen.

Durch die Verarbeitung der Kräfte zu einem dreidimensionalen Vektor eröffnen sich weitere Auswertungsmöglichkeiten. Die gleichzeitige Betrachtung aller Kräfte schafft eine vergleichbare Grundlage über alle Probanden. So kann die Länge des Vektors bei einem Probanden und gleicher Phase bei unterschiedlichem Transferstil verglichen werden. Dabei kann von der Länge des Vektors die Gewichtskraft  $F_G$  subtrahiert werden. Diese wird durch eine initiale Messung bei Stillstand des Probanden definiert. Somit wird der Einfluss der Gewichtskraft bei der Auswertung der Vektorlänge eliminiert (siehe Formel 7.6).

$$F_{Gesamt} = \left| \frac{\vec{F}_x + \vec{F}_y + \vec{F}_z}{3} \right| - F_G \quad (7.6)$$

Die Betrachtung der Länge ( $F_{Gesamt}$ ) des Vektors erlaubt es, Ausweichbewegungen der Probanden in andere Krafrichtungen einzubeziehen. Gleichwohl können nicht alle Kräfte nachverfolgt werden, da diese teilweise auf den Patientensimulator übertragen und somit über das Pflegebett abgeleitet werden. Die Reduktion der Länge des Kraftvektors belegt eine physische Entlastung.

### SEMG-Daten

Bei der Auswertung der SEMG-Daten bietet es sich ebenfalls an, die gleichen Phasen bei unterschiedlichen Transferstilen je Proband zu untersuchen. Um die verrauschten Daten verarbeiten zu können, ist zunächst eine Glättung nötig [Kon11, S. 27]. Es wird bei der Evaluation des vorgestellten ferngesteuerten Robotersystems ein gleitender Root-Mean-Square (RMS)-Filter mit fester Fenstergröße eingesetzt, der laut Literatur zur Verarbeitung von Signalen dieser Art etabliert ist [Kon11, S. 27]. Für das Aufzeigen von Belastungsspitzen kann für einzelne Muskeln ebenfalls ein Vergleich der Phasen zwischen den beiden Transferstilen stattfinden. Dies kann für ausgewählte Beispiele erfolgen. Die Bildung des Mittelwerts pro Phase und Muskel ermöglicht es hingegen Aussagen über die Muskelaktivität im Patiententransfer zu treffen. Mittelwerte lassen sich für jeden Muskel und jede Phase einzeln errechnen und pro Proband vergleichen. Dies erlaubt es für einen Probanden unterschiedlich hohe durchschnittliche Muskelkontraktionen im Vergleich der beiden Transferstile festzustellen.

Es finden somit alle Vergleiche innerhalb der beiden Transferstile für jeden Probanden statt. Ein interindividueller Vergleich der Probanden findet im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht statt, da sich die Muskelaktivitätsmuster aufgrund individueller körperlicher Gegebenheiten unterscheiden. Die SEMG Daten können durch das Aufzeigen von Belastungsspitzen und die Betrachtung der Mittelwerte die Erkenntnisse aus den Kraftdaten untermauern.

### 7.2.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Studie werden im Folgenden für jedes der beiden Messsysteme einzeln erläutert und diskutiert. Die Kraftdaten sind dabei das Hauptmerkmal zur Bewertung der Belastungsreduktion. Das Einbinden der SEMG-Daten in den Gesamtzusammenhang der ausgeführten Transfers dient der Be- und Entlastungsanalyse auf muskulärer Ebene.

### Kraftdaten

Die unterschiedlichen Richtungen der Kräfte können zunächst getrennt voneinander betrachtet werden. Die höchste Kraft wirkt positiv in  $F_z$ , da die Gewichtskraft der Probanden enthalten ist. Weiterhin zeigen sich im herkömmlichen Transfer in dieser Richtung herausragende Kraftspitzen. Im Gegensatz dazu zeigen die anderen Krafrichtungen einen eher stetigen Verlauf. Positive Peaks in  $F_z$  über den Wert von  $F_G$  hinaus bedeuten eine zusätzliche Belastung der Fußsohlen der Probanden. In diesem Transfer kann damit auch indirekt auf eine Belastungen auf Teile der unteren Wirbelsäule geschlossen werden. Die Lendenwirbelsäule ist bei Pflegeprozessen üblicherweise hohen Belastungen ausgesetzt [JJT<sup>+</sup> 14].

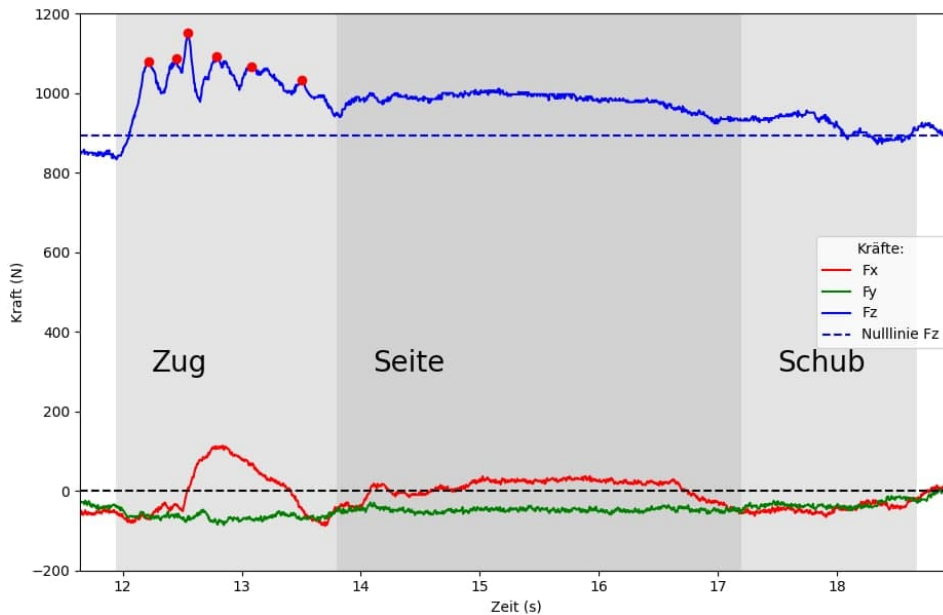
Die Reduktion der positiven Peaks in  $F_z$  ist eine Entlastung und somit ein festzuhaltendes Ergebnis dieser Studie. Als Peaks werden die Signalausschläge angesehen, die oberhalb der zu erwartenden Gewichtskraft liegen und eine Prominenz zu benachbarten Werten aufweisen. In Abbildung 7.11 ist ein exemplarisches Beispiel für die Peaks im herkömmlichen Transfer in der Zugphase abgebildet. Im direkten Vergleich dazu, werden in Abbildung 7.12 keine positiven Peaks gefunden. Da der Roboter und extensive Kraftverlagerungen des Probanden dafür sorgen, dass die Kraft  $F_z$ , die erwartete Nulllinie der Gewichtskraft in der Zugphase nicht durchbricht. Die Nulllinie beschreibt die Gewichtskraft des Probanden.

Dieses Phänomen lässt sich über alle Probanden erkennen. Nur vereinzelt werden schwache Peaks beim Transfer mit Roboterhilfe erkannt. Beim herkömmlichen Transfer hingegen, sind in nahezu allen Zugphasen der Probanden mehrere Peaks zu finden, die den Wert der Gewichtskraft übersteigen (siehe Anhang C).

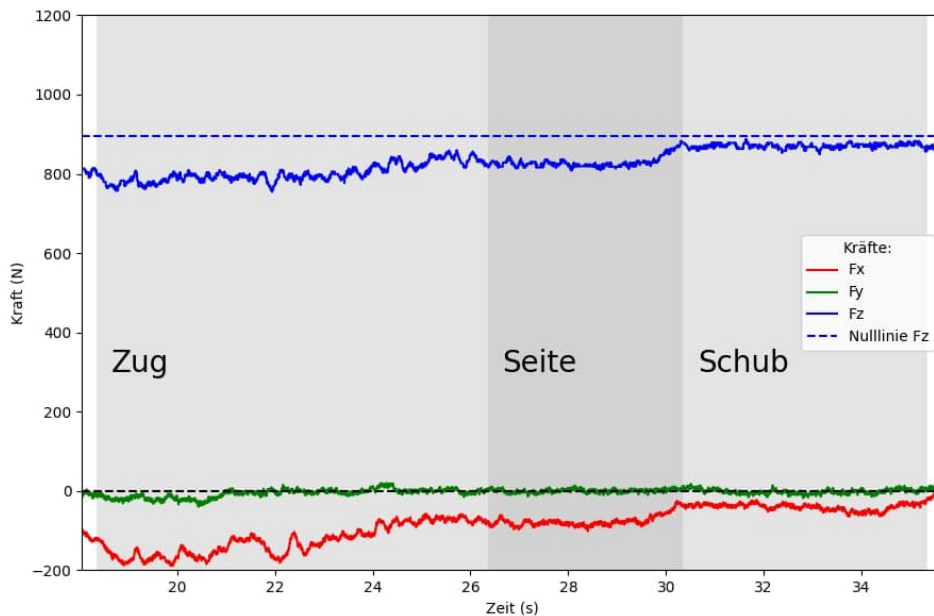
Bei dem exemplarischen Beispiel wird bei der Zusammenarbeit mit dem Robotersystem die Kraft  $F_z$  geringer, die Kraft  $F_x$  ist im Betrag jedoch offenbar höher als im herkömmlichen Transfer. Eine negative Kraft  $F_x$  bedeutet, dass sich der Proband in Richtung Pflegebett mit den Füßen abgedrückt hat (siehe Abbildung 7.9). Der massive Rückgang der Kraft  $F_z$  entsteht durch den Umstand, dass sich der Proband beim robotergestützten Transfer nach hinten lehnt und am Patientensimulator zieht, während der Roboter schiebt. Die Gewichtskraft wird dadurch nach  $F_x$  konstant umgewandelt, was im Vergleich des blauen und roten Graphs in Abbildung 7.12 zu sehen ist. Ein Teil der Kraft wird auf den Patientensimulator abgeleitet und wird somit nicht mehr von der Kraftmessplatte erfasst. Demnach kann am Beispiel von Proband 626 die Entlastung durch den Roboter gezeigt werden.



## 7.2 Studie zur Messung der physischen Entlastung



**Abbildung 7.11:** Die Daten der Kraftmessplatte für den herkömmlichen Transfer beim Proband 626. Die roten Punkte zeigen die Peaks an, die mit einem auf Nachbarschaftsbetrachtung basierenden Peakfinder gefunden werden. Der maximale Ausschlag beträgt 1088 N bei 12 Sekunden und 452 Millisekunden. Die Daten des Transfers sind in Phasen eingeteilt.



**Abbildung 7.12:** Die Daten der Kraftmessplatte für den robotergestützten Transfer beim Proband 626. Der Peakfinder findet keine Peaks. Die Kraft  $F_z$  bleibt unterhalb der erwarteten Gewichtskraft.

Bei der Betrachtung der Kräfte aus den Transfers der anderen Probanden, ist die Entlastung oftmals nicht so offensichtlich, wie bei Proband 626. Auch die Kombination der Kräfte aus den unterschiedlichen Richtungen muss betrachtet werden. Um das Zusammenspiel der Kräfte der besser in Beziehung setzen zu können, kann ein dreidimensionaler Vektor aus  $F_x$ ,  $F_y$  und  $F_z$  gebildet werden. Die Länge dieses Vektors variiert über die Zeit des Transfers. Die Mittelwerte der Länge dieses Vektors werden über die gesamte Zugphase der jeweiligen Transferstile gebildet. Die beiden Mittelwerte der durchschnittlichen Vektorlängen lassen sich für jeden Probanden vergleichen (siehe Tabelle 7.2).

**Tabelle 7.2:** Die durchschnittliche Länge des dreidimensionalen Kraftvektors für die Zugphase im Vergleich zwischen herkömmlichem Transfer (**DVL Zug<sub>H</sub>**) und robotergestütztem Transfer (**DVL Zug<sub>R</sub>**) über alle Probanden (**P**). Die Gewichtskraft der Probanden ist mit **F<sub>G</sub>** angegeben. Die Differenzen **Diff<sub>A</sub>** und **Diff<sub>R</sub>** sind zwischen **F<sub>G</sub>** und den jeweiligen durchschnittlichen Vektorlängen gebildet. In der letzten Spalte ist der Unterschied dieser beiden Differenzen hervorgehoben dargestellt und beschreibt die Verkürzung der Länge des durchschnittlichen Kraftvektors. Ein positiver Wert weist auf eine Entlastung hin. Der Durchschnitt der Entlastung beträgt 51,733 N, die Standardabweichung 61,928 N über alle Probanden.

<b>P</b>	<b>F<sub>G</sub> [N]</b>	<b>DVL Zug<sub>H</sub> [N]</b>	<b>Diff<sub>A</sub> [N]</b>	<b>DVL Zug<sub>R</sub> [N]</b>	<b>Diff<sub>R</sub> [N]</b>	<b>Diff<sub>A</sub>-Diff<sub>R</sub> [N]</b>
409	429	425,2048	-3,7952	425,6028	-3,3972	<b>-0,39805</b>
418	635	686,5971	51,5971	659,1402	24,1402	<b>27,4569</b>
449	875	897,7010	22,701	851,5195	-23,4805	<b>46,1815</b>
524	620	640,9567	20,9567	555,0625	-64,9375	<b>85,8942</b>
534	530	544,2378	14,23787	506,2093	-23,7907	<b>38,02857</b>
549	880	894,4028	14,4028	856,4269	-23,5731	<b>37,97592</b>
626	895	1024,9952	129,9952	812,2512	-82,7488	<b>212,744</b>
627	960	971,4180	11,4180	966,1782	6,1782	<b>5,23983</b>
708	700	712,6918	12,6918	700,3051	0,3051	<b>12,3867</b>

Die Länge des Kraftvektors ist bei Stillstand vom gleichen Wert wie die Gewichtskraft des Probanden. Erst durch das Aufbringen von Kräften auf Objekte, die nicht auf der Kraftmessplatte stehen, erhöht oder verringert sich die Länge des Kraftvektors. Die durchschnittliche Länge des Kraftvektors kann in den Zugphasen mit der Gewichtskraft subtrahiert werden, um die, auf externe Objekte wirkenden, Kräfte zu messen.

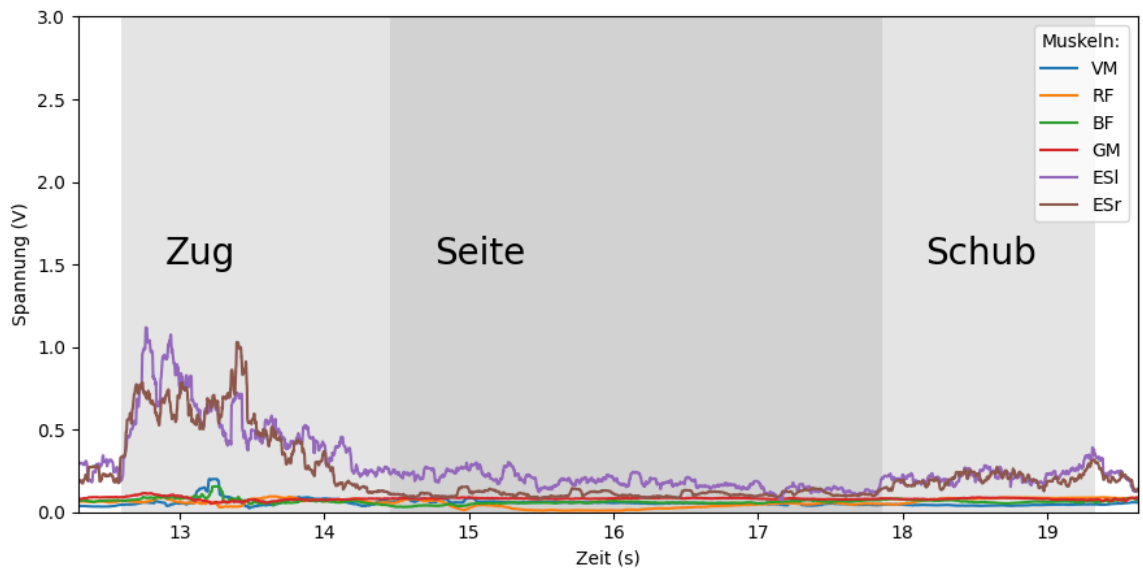
Bei den Ergebnissen der Tabelle 7.2 fällt auf, dass sich nicht bei allen Probanden die Länge des Kraftvektors bei der Zusammenarbeit mit dem Robotersystem verringert. Beim Abgleich dieser Daten für Proband 409 mit den aufgenommen visuellen Daten kann festgestellt werden, dass dieser Proband, wie die bereits ausgeschlossenen Probanden, Probleme mit dem herkömmlichen Transfer hat und sich während dieses Transfers auf das Bett abstützt. Schon die Differenz zwischen Ge-

wichtskraft und der durchschnittlichen Vektorlänge beim Zug im herkömmlichen Transfer weist einen negativen Wert auf, was diese Theorie untermauert. Dies könnte mit dem geringen Gewicht des Probanden zusammenhängen, durch welches sich der Transfer des 80 kg schweren Patientensimulator schwierig gestaltet. Bei den anderen Probanden findet eine Reduktion der Länge des gemittelten Kraftvektors für diese Phase statt. Die reine Betrachtung der Längen weist einen erheblichen Anteil der Gewichtskraft auf. Das Subtrahieren der Gewichtskraft von der Länge eliminiert diesen Anteil. Ein positiver Wert in den Spalten  $\mathbf{Diff}_A$  oder  $\mathbf{Diff}_R$  weist auf eine zusätzliche Belastung der Fußsohlen der Probanden hin - unabhängig von der wirkenden Gewichtskraft des Probanden. Ein negativer Wert entsteht, wenn Kräfte auf den Patientensimulator abgeleitet werden oder sich auf das Bett abgestützt wird. Letzteres ist ausschließlich bei Proband 409 zu beobachten. Die letzte Spalte  $\mathbf{Diff}_A - \mathbf{Diff}_R$  belegt die Verkürzung der Länge des durchschnittlichen Kraftvektors und damit eine Entlastung für den Probanden. Im Durchschnitt über alle Probanden wurde eine Entlastung von 51,72326 N erreicht.

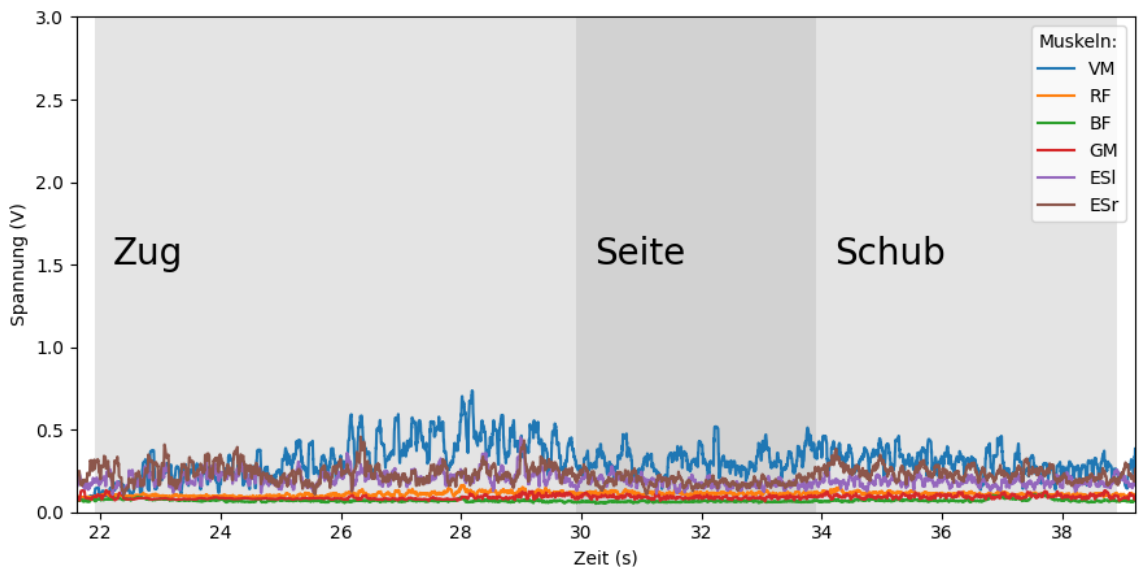
### SEMG-Daten

Die SEMG-Daten können die, aus den Kraftdaten gewonnenen, Erkenntnisse untermauern. Aufgrund des Umstands, dass nur einige Muskeln mit Elektroden beklebt sind, können die SEMG-Daten keine Aussage über die Muskelaktivitätskette des gesamten Organismus im Pflegeprozess liefern. Für ähnlich ausgeführte Transfers ergeben sich interindividuelle Unterschiede, die auf Faktoren wie BMI, Alter, Fitnesslevel, etc. zurückzuführen sind. Welche Muskeln im Transfer tatsächlich eingesetzt werden, hängt von unzähligen Einflüssen ab. Dennoch können die SEMG-Daten für jeden Probanden mit den zugehörigen Kraftdaten in Beziehung gesetzt werden. Auch die Spannungswerte können je Muskel und Proband zwischen herkömmlichem und robotergestütztem Transfer verglichen werden.

Am Beispiel von Proband 626 wird die Reduktion der Muskelaktivität durch die abfallende Spannung deutlich. In Abbildung 7.13 werden die beiden unteren Rückmuskeln Erector Spinae links (ESl) und Erector Spinae rechts (ESr) in der Zugphase beansprucht. Die anderen Muskeln weisen ein Grundrauschen auf, da der Proband den Transfer im Stehen durchführt und die Muskeln zum Ausbalancieren braucht. Im direkten Vergleich zu Abbildung 7.14, in welcher der Transfer mit Roboterunterstützung dargestellt ist, wird eher der Vastus Medialis (VM), an der Oberschenkelfront beansprucht. Die vermessenen Rückenmuskeln weisen eine geringe Aktivität auf.



**Abbildung 7.13:** Das SEMG-Signal für verschiedene Muskeln im herkömmlichen Transfer bei Proband 626. Der Transfer ist in Phasen eingeteilt. VM: Vastus Medialis, RF: Rectus Femoris, BF: Biceps Femoris, GM: Gluteus Maximus, ESI: Erector Spinae links, ESr: Erector Spinae rechts.



**Abbildung 7.14:** Das SEMG-Signal für verschiedene Muskeln im robotergestützten Transfer bei Proband 626. Der Transfer ist in Phasen eingeteilt. VM: Vastus Medialis, RF: Rectus Femoris, BF: Biceps Femoris, GM: Gluteus Maximus, ESI: Erector Spinae links, ESr: Erector Spinae rechts.

Es findet demnach eine Entlastung bei Proband 626 statt, was sich an einer geringeren Aktivität der unteren Rückenmuskulatur zeigt.

Die Spannungswerte für jeden Muskel können pro Phase gemittelt und anschließend zwischen den Transferstilen verglichen werden. In Tabelle 7.3 ist die prozentuale Änderung zwischen herkömmlichen und roboterunterstütztem Transfer aus der Zugphase für jeden Muskeln einzeln dargestellt. Der Mittelwert des Spannungssignals des Muskels im herkömmlichen Transfer gilt dabei als 100 %. Ein Wert unter 100 % weist demnach auf eine Entlastung hin. Sofern der Wert darüber liegt, wird der Muskel beim robotergestützten Transfer stärker belastet.

**Tabelle 7.3:** Der prozentuale Anteil des Mittelwerts des Spannungssignals im robotergestützten Transfer je Muskel am Wert des herkömmlichen Transfers innerhalb der Zugphase. Werte unter 100 % weisen auf eine Entlastung und Werte über 100 % auf eine zusätzliche Belastung bei Roboterinsatz hin. Die Werte bei den Rückenmuskeln sind aufgrund der entscheidenden Rolle bei der Gesundheit von Pflegekräften hervorgehoben.

<b>P</b>	<b>VM [%]</b>	<b>RF [%]</b>	<b>BF [%]</b>	<b>GM [%]</b>	<b>ESI [%]</b>	<b>ESr [%]</b>
409	89,57	81,26	10,72	12,99	<b>74,39</b>	<b>78,02</b>
418	50,47	64,09	70,66	102,17	<b>66,35</b>	<b>84,69</b>
449	85,94	150,98	65,70	74,90	<b>108,50</b>	<b>141,02</b>
524	244,81	141,86	112,08	154,62	<b>83,51</b>	<b>167,30</b>
534	131,06	107,41	111,14	87,16	<b>125,06</b>	<b>142,03</b>
549	18,22	37,45	200,98	165,74	<b>30,73</b>	<b>56,36</b>
626	475,62	162,70	96,47	108,85	<b>40,52</b>	<b>51,16</b>
627	80,62	18,59	40,26	59,11	<b>37,83</b>	<b>28,81</b>
708	153,46	179,20	60,78	83,79	<b>67,61</b>	<b>90,07</b>

Bei der Betrachtung der Werte für die unteren Rückenmuskeln in dieser Studie wird in den meisten Fällen (13/18) eine Entlastung erreicht. Lediglich bei Proband 449, 524 und 534 ist zumindest einer der beiden Rückenmuskeln stärker aktiv. Hinsichtlich der Gewichtung der einzelnen Muskeln sind die Rückenmuskeln hervorzuheben. Ein Durchschnitt über alle Muskeln zu bilden ist nicht zielführend, da die Belastung des Beinmuskels bei Pflegetransfers eher erwünscht ist, als die Belastung der Rückenmuskulatur. Letztere ist bei Pflegekräften, die Pflegehandlungen durchführen, allgemein hohen Belastungen ausgesetzt [JJT<sup>+</sup>14]. Weiterhin kann nicht angenommen werden, dass ein doppelter Wert des Spannungssignals auch die doppelte subjektive Anspannung des Probanden bedeutet.

Bei den Probanden, die eine höhere Belastung bei zumindest einem der Rückenmuskeln aufweisen, ist dennoch die durchschnittliche Länge des Kraftvektors (siehe Tabelle 7.2) reduziert worden. Für diese Probanden konnte auf Basis der SEMG-Daten zumindest in einigen Muskeln eine Reduktion der Kontraktion erreicht werden. Alle anderen Probanden weisen eine Entlastung der beiden unten

Rückenmuskeln auf. Dabei fällt auf, dass diese Entlastung oft mit einer höheren Belastung der Bein- und Gesäßmuskulatur einhergeht. Dies kann an den Probanden 449, 549, 626 und 708 für einzelne Muskeln gesehen werden. Einige Probanden weisen bei der Zusammenarbeit mit dem ferngesteuerten Robotersystem auch eine Reduktion der Muskelaktivität in allen Muskeln auf. Dies ist für Proband 409 und 627 zu beobachten.

### 7.2.5 Diskussion

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass bei der Zusammenarbeit mit dem ferngesteuerten Robotersystem, innerhalb eines simulierten Patiententransfers, eine messbare Entlastung erreicht werden kann.

Obwohl in dieser Studie aufgrund der frühen Phase des Prototyps nur mit einem Roboterarm unterstützt wurde, konnten Peaks in den, auf die Fußsohlen der Probanden wirkenden, Kräften verringert werden. Auch die Längen der Kraftvektoren, die sich aus dem Zusammenspiel der drei gemessenen Kräfte ergeben, wurden bis auf eine Ausnahme verringert. Ebenfalls kann die Reduktion der Muskelaktivität der Muskeln Erector Spinae links und Erector Spinae rechts, die für fast alle Probanden erkennbar ist, das Ergebnis der Kraftmessung untermauern. Durch weitere Kraftsensoren am Bett, die auch die abgeleiteten Kräfte erfasst, und der Vermessung weiterer Muskeln, können in Folgestudien weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Aus dem Potential eines Roboterarms kann ein positiver Effekt eines zweiten Roboterarms abgeleitet werden.

Der Einsatz des Roboters verändert den Ablauf hinsichtlich der Handlungen des Probanden innerhalb des Transfers nicht. Allein die Ausführungsdauer des Transfers ist bei der Zusammenarbeit mit dem Roboter höher, da dieser aus Sicherheitsgründen nur mit einem Fünftel seiner eigentlichen Maximalgeschwindigkeit eingesetzt wurde.

In der Studie wurde ein Patientensimulator genutzt, der dem Gewicht eines echten Patienten gleichkommen könnte. Wie bereits erwähnt, waren einige der eingeladenen Probanden nicht in der Lage den Patientensimulator zu transferieren. Obwohl der Patientensimulator durch seinen Aufbau weitaus schwerer zu bewegen ist als ein echter Mensch mit vergleichbarer Masse und Abmessungen, kann er bei der Bewertung des Potentials des ferngesteuerten Robotersystems in dieser Studie herangezogen werden. Weiterhin ist der Einsatz auch zur Simulation von komatösen oder unkooperativen Patienten geeignet. Der Schwierigkeitsgrad ist für die Probanden unter der Nutzung des Patientensimulators erhöht [KGF<sup>+</sup>21].

## 7.3 Weitere Tests und Experimente

Mit dem ferngesteuerten Robotersystem lassen sich weitere Arten von Patiententransfers durchführen. Anhand von Tests und Experimenten mit dem zweiarmigen Robotersystem können die Möglichkeiten des Gesamtsystems auch außerhalb von Studien demonstriert werden.

Zunächst kann der simulierte Patiententransfer der bereits vorgestellten Studie auch mit beiden Roboterarmen erfolgen. Der Transfer ist mit beiden Armen beispielhaft in Abbildung 7.15 dargestellt.



(a)



(b)

**Abbildung 7.15:** Der simulierte Patiententransfer aus der Studie mit beiden Roboterarmen. In (a) beginnt der Transfer, wobei nun auch der zweite Roboter mit dem Werkzeug am Oberschenkel des Patientensimulators eine Unterstützung bietet. Der Transfer wird gemeinsam durchgeführt. In (b) ist die Seitenlage des Patientensimulators erreicht.



**Abbildung 7.16:** Ein Roboterarm stellt das Bein des Patientensimulators auf und fixiert dieses. Somit hat die Person am Pflegebett beide Hände frei und braucht das Bein nicht selbst zu stabilisieren.

Die Roboter können weiterhin Teilaufgaben in Pflegehandlungen übernehmen. So wird der Roboter mit dem handflächenartigen Werkzeug in Abbildung 7.16 ausschließlich dafür eingesetzt, das Bein des Patientensimulators an der Unterseite des Oberschenkel anzuheben und zu fixieren.

Pflegehandlungen am Bett bestehen nicht ausschließlich aus Transfers. Das Mobilmachen der Beine bei bettlägerigen Patienten kann auch mit Roboterunterstützung erfolgen. Bei der Kooperation der Firmen Kuka und Life Science Robotics wird ein Roboterarm bei der Rehabilitation von Menschen eingesetzt [KUK21b]. Es wird beispielsweise ein Fuß eines Patienten an einer Vorrichtung am Endeffektor des Roboterarms befestigt und anschließend durch die Bewegungen des Roboters mobilisiert. Das System nutzt einen Kuka *LBR Med* Roboterarm [KUK21b]. Dieser gleicht den Roboterarmen, die auch in der hier vorliegenden Arbeit genutzt werden im Aufbau. Dieser Anwendungsfall ist mit dem vorgestellten ferngesteuerten Robotersystem demnach ebenfalls möglich. In Abbildung 7.17 mobilisieren das ferngesteuerte Robotersystem und die Person am Bett gemeinsam die Beine des Patientensimulators. Das Gewicht der Beine kann weitestgehend vom Roboterarm übernommen werden.





**Abbildung 7.17:** Ein ferngesteuerter Roboterarm des Gesamtsystems unterstützt bei der simulierten Mobilisierung der Beine des Patientensimulators.

Viele weitere Pflegehandlungen sind beim Einsatz des Systems denkbar, da es flexibel ist. Dazu zählen sämtliche Transferaufgaben am und im Pflegebett wie das Höherlagern, Transfer an die Bettkante oder Aufstehvorgänge. Auch die Motoren des Betts lassen sich bei der Zusammenarbeit mit dem Robotersystem nach wie vor einsetzen. Typische Roboterbenchmarks wie das Anheben oder Verschieben einer Kiste sind ebenfalls möglich. Durch die Steuerung, die nicht ausschließlich die Position des Werkzeugs, beziehungsweise des Endeffektors vorgibt, können auch andere Teile der Roboterarme zur Manipulation eingesetzt werden. In Abbildung 7.18 wird gezeigt, dass es mit dem ferngesteuerten Robotersystem möglich ist eine Pappkiste mit einer Masse von 3 kg einzuklemmen und anzuheben. Dies stellt einen üblichen Roboterbenchmark dar. Dabei müssen die Werkzeuge nicht zwangsläufig genutzt werden.



**Abbildung 7.18:** Eine Pappkiste wird eingeklemmt und angehoben. Neben den Werkzeugen können auch andere Teile des Roboters genutzt werden um Objekte zu berühren oder zu bewegen.

## 7.4 Evaluationserkenntnisse

Die Ergebnisse der technische Evaluation zu Beginn dieses Kapitel erlauben es, das System in Tests und Studien einzusetzen. Sowohl die zu erwartende Qualität der Daten des Feedbacks als auch die Möglichkeiten der Steuerung belegen die Einsatzbereitschaft des Systems. Der Operator kann an den Transfers nicht im gleichen Umfang beteiligt werden, als wäre er persönlich vor Ort. Durch die genutzten Werkzeuge und die immersive Fernsteuerung kann aber eine Steuerung als Avatar der Kollaboration vor Ort nahe kommen.

Die physische Entlastung, die durch das System erreicht werden kann, ist sowohl mit den Daten einer Kraftmessplatte als auch durch die Daten eines SEMG belegt. Mit den Daten der Kraftmessplatte lässt sich über die Analyse der Peaks und die Auswertung der Länge des durchschnittlichen Kraftvektors festhalten, dass die Zusammenarbeit mit dem Robotersystem eine physische Entlastung für die Probanden darstellt. Die Peaks werden für die Probanden reduziert. Die durchschnittliche Länge des Kraftvektor wird im Vergleich der Zugphase bis auf eine Ausnahme, bei dem sich abgestützt wurde, verringert. Der simulierte Patiententransfer ist eine übliche Pflegehandlung und die Probanden sind oder waren Pflegekräfte. Die Ergebnisse der Auswertung der Muskelaktivitäten des SEMG zeigt ebenfalls eine Entlastung der unteren Rückenmuskeln bei der Mehrheit der Probanden und Entlastungen in anderen Muskeln.

Durch weitere Tests und Experimente wird gezeigt, dass das System flexibel einsetzbar ist und für weitere Pflegehandlungen geeignet scheint. Zukünftige Studien zu Pflgehandlers können das Entlastungspotential des Gesamtsystems weiter belegen. Aufgrund der technischen Spezifikation, dem ersten Einsatz innerhalb der Studie und den weiteren Benchmarks ist aber davon auszugehen, dass ein hohes Entlastungspotential gegeben ist.

# Kapitel 8

## Diskussion und Ausblick

Im letzten Kapitel wird die hier vorliegende wissenschaftliche Forschungsarbeit zusammengefasst (Abschnitt 8.1), die Ergebnisse und Erkenntnisse diskutiert (Abschnitt 8.2), sowie ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten vorgestellt (Abschnitt 8.3). Zum Ende dieses Kapitels und somit der schriftlichen Ausarbeitung wird in Abschnitt 8.4 ein Fazit gezogen.

### 8.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit ist ein ferngesteuertes Robotersystem zur physischen Entlastung von Pflegekräften bei manuellen Patiententransfers vorgestellt worden. Die immersive Steuerung der beiden Roboterarme des Systems durch einen Operator erlaubt eine Zusammenarbeit mit einer, sich am Pflegebett befindlichen, Pflegekraft.

Der Einstieg in das Thema hat über die Darstellung der derzeitigen Situation in der Altenpflege stattgefunden. Es sind die Herausforderungen und Chancen des demografischen Wandels erläutert, der Fachkräftemangel beschrieben und auf die körperliche Überbelastung des Pflegepersonals hingewiesen worden. Im Lichte der Erkenntnisse dieser Aspekte hat eine Problemdefinition stattgefunden. In dieser ist festgestellt worden, dass die Berufsangehörigen der Altenpflege an einer physischen Überbelastung leiden, die durch den Pflegekräftemangel und den demografischen Wandel bedingt wird. Weiterhin wurde festgehalten, dass die jetzigen Maßnahmen und eingesetzten technischen Geräte keine ausreichende Entlastungsperspektive bieten.

Daran anschließend ist der eigens konzipierte Ansatz beschrieben worden, der das definierte Belastungsproblem durch den Einsatz von Robotertechnologien adressiert. Die für den Ansatz relevanten Überlegungen wurden dargelegt. Aus der Inspiration, abgeleitet von Entlastungsstrategien anderer Branchen und kollaborativem Arbeiten, dem Aufzeigen der Machbarkeit und den Überlegungen zur Praxistauglichkeit, ist auf eine mögliche Realisierung geschlossen worden. Die Entscheidung, warum das zu implementierende System eine Form von Telerobotik aufweisen soll, bei der die Steuerung der Aktoren intuitiv durch immersive Technologien realisiert wird, wurde

erläutert. Auch die Bewertung des später umgesetzten Systems ist Teil der Konzeption und deren Planung ist beschrieben worden.

Zur Einordnung des entwickelten ferngesteuerten Robotersystems in bestehende Forschungsfelder und zur Abgrenzung von anderen Forschungsarbeiten, wurde eine ausführliche Untersuchung des Stands der Technik vorgenommen. Diese deckt sowohl bestehende Robotikforschung bezüglich der Pflege als auch die Fortschritte in der immersiven Fernsteuerung ab. Da das spätere Gesamtsystem aus mehreren Subsystemen besteht, für die isoliert Forschungsarbeiten existieren, sind Arbeiten dieser Kategorien ebenfalls vorgestellt worden. Die Auseinandersetzung mit bestehenden Systemen dieser Gebiete zeigte Forschungslücken auf. Im Einzelnen sind drei, den Forschungsstand kritisierende, Aussagen getroffen worden. Zunächst hat eine Bewertung der Fortschritte in der Roboterforschung stattgefunden, die sich ausschließlich auf Roboter für Pflegeanwendungen spezialisiert. Hierbei wurde angemerkt, dass die physische Entlastung des Pflegepersonals ein vernachlässigter Aspekt in diesem Forschungsfeld ist und der Fokus vieler Arbeiten eher auf der Unterstützung des Patienten liegt. Anschließend ist hinsichtlich des angestrebten Ansatzes, mit Telerobotik eine physische Entlastung zu erreichen, festgestellt worden, dass kein System identifizierbar ist, mit dem eine Entlastung bei körperlich fordernden Patiententransfers zu erreichen ist. In der letzten Schlussfolgerung wurde weiterhin die These geäußert, dass es der Forschungsstand bei spezialisierten Systemen, die sich nur auf immersive Steuerung oder Roboterimplementierungen beschränken, erlaubt, eine Integration dieser Systeme anzustreben, um ein ferngesteuertes Robotersystem zu entwickeln.

Der Aufbau und die Auswahl der Systeme und Komponenten, die zur Erreichung der Ziele dieser Arbeit zum Einsatz kommen, wurden ausführlich beschrieben. Dabei wurden die Entscheidungen zum grundlegenden physischen Setup und dem Aufbau des Robotersystems aus dem Anwendungsfall getroffen. Dies betrifft auch die Auswahl des eingesetzten Robotertyps. Eine geeignete Netzwerkinfrastruktur ist auf Grundlage der zu erwartenden Datenströme und des Latenzverhaltens ausgewählt worden. Die Entscheidung, welche Komponenten für die immersive Fernsteuerung genutzt werden, ist über die Möglichkeiten von VR-Technologien, Sensorik und einsetzbarer Frameworks getroffen worden. In einer Komponentenübersicht wurde der konzeptionelle Aufbau des Gesamtsystems dokumentiert.

Die Implementierung wurde für die einzelnen Subsysteme beschrieben. Der Einstieg ist über das Multi-K4A-System, der Eigenentwicklung eines Tiefenbildkamarasystems, verlaufen. Diese Sensorik bildet die Grundlage, um die Roboter fernsteuern zu können. Der Aufbau und die Programmierung der eingesetzten Roboter folgen dem Ziel, die Arme eines weiteren, am Bett befindlichen Menschen nachzubilden. Als letztes Subsystem wurde die Implementierung der VR-Integration dargestellt. Die Integration der beiden Subsysteme Tiefenbildkamarasystem (Multi-K4A-System) und Robotersystem in ein VR-System ermöglichte es schlussendlich ein Gesamtsystem vorzustellen. Anhand von Abbildungen ist die Nutzung des Systems am Pflegebett dokumentiert worden.

Die physische Entlastung von Pflegekräften ist das Ziel des hier vorgestellten Systems. Die Evaluation des entwickelten Prototyps wurde dokumentiert. Diese beschränkt sich zunächst auf die technische Ebene, wobei anhand von technischen Gegebenheiten und Analysen auf das Potential geschlossen worden ist. Die Beschreibung einer Studie zur Messung des Entlastungspotentials bei

der Nutzung des Systems in einem simulierten Patiententransfer ist entstanden. Durch weitere Tests und Experimente ist die Vielseitigkeit des ferngesteuerten Robotersystems belegt worden. Die Erkenntnisse aller Tests und Studien wurden zusammengefasst, diskutiert und letztendlich bewertet. Dabei zeigte sich das hohe Entlastungspotential, das beim Einsatz des ferngesteuerten Robotersystems aus dieser Arbeit zu erwarten ist. Weiterhin sind alle in Kapitel 3 definierten Aufgaben erfüllt worden.

## 8.2 Diskussion

Das vorgestellte Robotersystem wird durch immersive Technologien von einem Operator ferngesteuert. Dies kann nur im Einklang mehrerer hochspezialisierter Subsysteme erreicht werden. Wie zu Beginn in Abschnitt 4.4 zur Kritik am Stand der Technik festgestellt wurde, ist kein vergleichbares System für den Einsatz in der Pflege zu finden, weswegen dieser Prototyp eine Neuheit darstellt. Dennoch bedarf es hinsichtlich einiger Eigenschaften des Systems, sowie getroffener Entscheidungen einer nachträglichen Diskussion.

Patiententransfers sind von den Gegebenheiten vor Ort, der Position des Patienten, den Fähigkeiten des Pflegers vor Ort und von vielen weiteren Einflüssen abhängig. Diese unstrukturierte Grundlage legt eine direkte Robotersteuerung durch einen Menschen nahe, da dieser die Situation, anders als ein Programm, einschätzen und auf Änderungen adäquat reagieren kann. Durch vorprogrammierte Bewegungen der Roboterarme bei der Unterstützung von Pflegetransfers würden unzählige Faktoren in die Berechnung der Bewegungspfade der Roboter einfließen müssen. Diese Aufgabe scheint für eine Software, aus heutiger Sicht, ungeeignet zu sein. Daher ist die Implementierung, die einen Menschen zur Steuerung der Roboter vorsieht, eher dazu geeignet, mittelfristig in den Pflegealltag eingebunden zu werden. Der fernsteuernde Mensch kann aber im Gegensatz zu einer, im Idealfall deterministischen, Programmierung Fehler begehen. Deswegen muss das System mit teilweise redundanten Sicherheitsvorkehrungen ausgestattet sein. Die Kraft, die durch die Roboterarme aufgebracht werden kann, kann beim Fehlen solcher Sicherheitsvorkehrungen zur Gefahr für Menschen im Arbeitsraum der Roboter werden. Die Entscheidungen von Menschen sind jedoch für Pfleger nachvollziehbarer und es ist anzunehmen, dass ihnen mehr Vertrauen entgegengebracht wird. Möglicherweise kann die Skepsis, die gegenüber autonom agierenden Robotern in der Pflege vorliegt [ZKS<sup>+</sup>20], mit der direkten Steuerung durch einen Menschen reduziert werden.

Wenn ein zweiter Pfleger durch das Robotersystem simuliert werden soll, muss der Aufbau einem Menschen ähneln. Weiterhin muss auch bei der Steuerung ein intuitives Konzept zur Kontrolle über dieses Robotersystem vorliegen. Angesichts der komplexen und sich ständig ändernden Abläufe bei Patiententransfers ist zunächst zu klären, ob der gewählte Aufbau des Robotersystems zielführend ist. Das angestrebte Ziel war von Beginn an, einen nicht vorhandenen, aber eigentlich notwendigen weiteren Akteur beim Patiententransfer nachzubilden, was bei der Aufgabendefinition in Kapitel 3 erläutert wurde. Angelehnt an die Fähigkeiten eines Menschen sollen mit dem Robotersystem aber nicht nur isolierte, spezielle Handlungen durchgeführt werden, sondern eine Vielzahl an Möglichkeiten abgebildet werden. Deswegen fällt die Wahl auf eine anthropomorphe

Roboterkonstruktion in Kombination mit einer immersiven Fernsteuerung, mit der unterschiedliche Handlungen im Kontext der Patiententransfers möglich sind.

Die beiden Roboterarme des Robotersystems sind fest an das Pflegebett montiert, was für die komplexen Vorgänge bei Pflegetransfers nicht ideal ist. Aufgrund der feststehenden Positionen kann es dazu kommen, dass Orte, die sich nahe an den Robotersockeln befinden, von den Robotern nur schwer erreicht werden können. Dies kann ein Mensch durch eine Änderung seiner Position kompensieren. Fest montierte Roboter verfügen nicht über diese Möglichkeit. Perspektivisch könnten die Roboterarme auf einer mobilen Plattform installiert sein, wodurch die Position der Sockel ebenfalls geändert werden kann. Dies erfordert jedoch zusätzliche Aktorik am Bett oder externe Roboterplattformen.

Ethischen Bedenken, die bei der direkten Berührung zwischen Mensch und wie auch immer gesteuerten Roboter zutage treten, liegen vor. So ist es nachvollziehbar, dass die beschriebene Studie „Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung“ nur bei Nutzung eines Patientensimulators als Patient durchgeführt werden konnte. Diesen Patientensimulator beispielsweise mit einem gesunden Schauspieler zu ersetzen, war aufgrund der Empfehlungen seitens der Mitglieder der Ethikkommission der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg nicht möglich. Dies schränkte die Möglichkeiten zur Evaluation des vorgestellten Systems auf Versuche mit dem Patientensimulator ein, wodurch die Nutzbarkeit nicht in allen möglichen Facetten belegt werden kann. Dass das System theoretisch in der Lage ist, diese Entlastung im Pflegealltag zu erzielen, ist allerdings durch die Ergebnisse der Studie anzunehmen.

Eine weitere Diskussion wirft die letztendlich eingesetzte Steuerung auf. Wie bereits bei der Kritik am Stand der Technik anfangs in Abschnitt 4.4 erwähnt, fehlt es an intuitiv bedienbaren Robotern in der Pflege. Menschen die Erfahrungen mit der Steuerung von virtuellen oder realen Robotern haben, sind an General-Purpose-Geräte wie Maus, Tastatur oder Joysticks gewöhnt. Die VR-Technologien konnten sich erst in den letzten Jahren durchsetzen. Bei Steuerung mit VR wird ein Paradigmenwechsel vollzogen. Eine Umstellung von gewohnten General-Purpose-Eingabegeräten auf immersive Steuerungskonzepte kann eine Herausforderung darstellen. Bei der Nutzung des Robotersystems, welches in dieser Arbeit vorgestellt ist, ist es notwendig, sich mit der Fernsteuerung vertraut zu machen. Ein Auftreten von Motion-Sickness ist bei längerer Nutzung nicht auszuschließen.

Das Heranführen von Pflegern an Roboterlösungen, wie sie hier vorgestellt werden, muss aktiv stattfinden. Trotz der anzunehmenden Vorteile gegenüber bestehenden Transferhilfen und Liftern, muss die Etablierung einer derartigen Lösung vorangetrieben werden. Dies schließt auch ein Konzept ein, wer als Operator fungiert, in welcher Einrichtung die Installation denkbar ist und wie sowohl Patient, als auch Pfleger vor Ort an das System herangeführt werden sollen.

Durch die jetzige Implementierung entsteht ein Prototyp, der sich in einem Forschungsstadium befindet und in dieser Form höchstwahrscheinlich nicht flächendeckend in der Pflege zum Einsatz kommt. Dies kann angenommen werden, da der jetzige Aufbau den üblichen Finanzierungsrahmen bei der Anschaffung von Geräten bereits aufgrund der Tatsache, dass zwei Industrieroboter eingesetzt werden, sprengt. Die Entwicklung eines marktreifen Produkts ist nicht das Ziel dieser Arbeit.

Die gezeigten Möglichkeiten erlauben jedoch, die Entwicklung eines kommerziellen Produkts auf Grundlage des Prototyps in Erwägung zu ziehen, mit dem sich zukünftig die Belastungssituation der Altenpfleger in Deutschland verbessert.

### 8.3 Zukünftige Arbeiten

Aus den gewonnenen Erkenntnissen kann auf zukünftige Arbeiten geschlossen werden, die im Nachgang der Entwicklung des beschriebenen Systems durchgeführt werden können.

Der Prototyp kann in einigen Aspekten weiterentwickelt werden. Hinsichtlich der Konstruktion können Experimente mit einer veränderten Anbringung der Roboterarme am Pflegebett durchgeführt werden. Auch der Pool der einsetzbaren Werkzeuge kann erweitert werden. So könnten beispielsweise kraftsensitive Greifer oder Roboterhände die Einsatzmöglichkeiten des Systems hin zum Greifen von Körperteilen oder Gegenständen erweitern. Ebenfalls denkbar ist eine Aufrüstung der Computerhardware und der Einsatz von Serversystemtechnik, um das Latenzverhalten weiter zu optimieren. Die Modularität des vorgestellten Systems erlaubt zudem eine Integration von weiteren Aktoren, Kommunikationskanälen oder Feedbackdaten in die VR-Steuerung. Dies könnten beispielsweise Smarthome-Systeme oder Vitaldaten der Patienten sein. Auch für den Operator können sich durch haptische Handschuhe oder ähnliche Geräte neue Möglichkeiten eröffnen, die entfernte Szene wahrzunehmen. Obwohl durch die Installation im Pflegelabor der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg eine räumliche Trennung de facto zwischen dem Ort des Operators und dem Robotersystem besteht, kann zukünftig weitere Forschung hinsichtlich des Einflusses von geringer Bandbreite und hoher Latenz auf die Steuerung untersucht werden.

Während der Weiterentwicklung kann das System in seiner jetzigen Form bereits den Berufsangehörigen der Pflege in Vorführungen präsentiert werden. Dass Robotertechnologie in der Pflege zukünftig einen höheren Stellenwert haben wird, kann unter anderem daraus geschlossen werden, dass sich der Deutsche Ethikrat bereits in einer Stellungnahme mit diesem Thema auseinandersetzt und Empfehlungen für die Implementierung ausspricht [Deu20a, S. 49-53]. Dies schließt auch eine umfassende Integration von Robotertechnologien in den Pflegealltag mit ein, was nur in Zusammenarbeit von Roboterentwicklern und Pflegeinstitutionen erreicht werden kann. Des Weiteren sollte in diesem Zusammenhang Öffentlichkeitsarbeit betrieben werden, welche die Etablierung von nützlichen Robotersystemen in der Pflege voranbringt.

Die Messung der Entlastung kann auch für andere Arten von Patiententransfers belegt werden. Dafür sind in Zukunft weitere Studien durchzuführen. Sofern alle Bedenken ausgeräumt sind, können perspektivisch auch Schauspieler die Rolle des Patienten einnehmen und den Probanden, die mit dem Robotersystem einen Transfer gemeinsam durchführen, eine realitätsnahe Erfahrung bieten. Langfristig ist auch der Einsatz in einer Pflegeinstitution unter realen Bedingungen möglich. Das vorgestellte System ist aufgrund der bereitgestellten Möglichkeiten auch für den Einsatz in Pandemien geeignet. Es wird eine Reduktion des Kontakts zwischen Menschen erreicht, da mit dem System zwei Personen zusammen einen Patienten behandeln können, obwohl nur eine Person und der Patient anwesend sind. Dies prädestiniert das vorgestellte System für die Pflege von

Patienten mit ansteckenden Krankheiten. Hierfür muss möglicherweise eine Spezialisierung des beschriebenen Prototyps erfolgen, um den medizinischen Anforderungen bei diesen Patienten gerecht zu werden.

Die immersive Steuerung, der Roboteraufbau und das Feedback, welches eine Immersion erlaubt, kann auch als Plattformlösung für andere Anwendungsfälle, außerhalb des Gesundheitssektors adaptiert werden. Die hier vorgestellte Implementierung ist zwar auf den Anwendungsfall in der Pflege maßgeschneidert, kann aber durch den Austausch einzelner Komponenten oder der Subsysteme für anderen Zwecke herangezogen werden. Durch Abwandlungen des Prototyps kann beispielsweise Telerobotik in Gefahrensituationen oder auf mobilen Plattformen realisiert werden.

Es zeigt sich somit, dass ein großes Potential beim Einsatz des vorgestellten Systems hinsichtlich des intendierten Anwendungsfalls zu erwarten ist. Auch für andere Anwendungsfelder scheint das System geeignet und kann für die Anwendung spezialisiert werden.

## 8.4 Fazit

Im Rahmen des Promotionsvorhabens wurde ein ferngesteuertes Robotersystem zur Unterstützung manueller Patiententransfers in der Pflege konzipiert, implementiert und evaluiert. Die vorliegende Dissertation beschreibt ein für die Pflege maßgeschneidertes System sowie die zugrundeliegende enge Verschränkung des angestrebten Anwendungsfalls und der Entwicklung.

Der Prototyp ist voll funktionsfähig und kann eine Entlastung des Pflegepersonals ermöglichen. Der Fokus liegt, anders als in anderen Ansätzen, explizit auf der physischen Entlastung des Pflegers. Dies hebt das System von vielen weiteren Roboterimplementierungen für die Pflege ab, in denen die Roboter nur soziale, emotionale oder logistische Aufgaben übernehmen. Das System dient als zusätzliche Hilfe am Pflegebett und ist nur in Kooperation mit der Präsenz eines Pflegers nutzbar. Durch die Fokussierung der physischen Entlastung wird die bestehende Forschungslücke geschlossen.

Die Leistungsfähigkeit des hier vorgestellten Robotersystems schafft eine messbare Entlastung des Pflegepersonals. Das System nutzt eine, für diesen Anwendungsfall angebrachte, direkte immersive Fernsteuerung durch einen Menschen. Die erreichte Qualität, hinsichtlich der technischen Realisation, beweist, dass sich der Prototyp für den Einsatz eignet.

Das Entlastungspotential ist durch Messungen von wirkenden Kräften und Muskelaktivitätsmustern in einer Studie belegt. Durch den Einsatz des Systems bei simulierten Pflege transfers wird eine Entlastung erreicht. Weitere Versuche dokumentieren die Flexibilität der vorgestellten Roboterlösung. Die eigenen Veröffentlichungen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, weisen auf den international anerkannten wissenschaftlichen Wert der gesamten Entwicklung hin. Die Konzeption, Implementierung und Integration der Subsysteme erforderten eine Auseinandersetzung mit Technologien unterschiedlicher Forschungsgebiete. Dies schließt den Bereich der Sensorfusion, Roboter- und Netzwerkprogrammierung, das Erstellen von VR-Anwendungen, sowie biomechanische Analysen ein. Weiterhin fand ein konstanter interdisziplinärer Austausch mit Pflegern und Pflegeinstitutionen statt.



## 8.4 Fazit

---

Das vorgestellte System trägt vor dem Hintergrund des demografischen Wandels und der damit verbundenen Alterung der Gesellschaft zu einer optimierten Versorgungsstruktur bei und zeigt geeignete Maßnahmen zur Bewältigung des Pflegenotstands. Das erhebliche Potential, Robotersysteme außerhalb von industriellen Anwendungen einzusetzen, wird somit belegt.



# Eigene Publikationen

- [BFL<sup>+</sup>20a] BRINKMANN, A. ; FIFELSKI, C. ; LAU, S. ; KOWALSKI, C. ; MEYER, O. ; DIEKMANN, R. ; HEIN, A.: Quantification of Lower Limb and Spine Muscle Activity in Manual Patient Handling - A Case Study. In: *Studies in health technology and informatics* 272 (2020), S. 249–252
- [BFL<sup>+</sup>20b] BRINKMANN, A. ; FIFELSKI, C. ; LAU, S. ; KOWALSKI, C. ; MEYER, O. ; DIEKMANN, R. ; ISKEN, M. ; FUDICKAR, S. ; HEIN, A.: The AAL/Care Laboratory – a healthcare prevention system for caregivers. In: *Nanomaterials and Energy* 9 (2020), Nr. 1, S. 27–38
- [FBF<sup>+</sup>21] FIFELSKI-VON BÖHLEN, C. ; BRINKMANN, A. ; FUDICKAR, S. ; HELLMERS, S. ; HEIN, A.: Evaluating a Multi Depth Camera System to Consolidate Ergonomic Work in the Education of Caregivers. In: *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies - Volume 5: HEALTHINF INSTICC*, SciTePress, 2021, S. 39–46
- [FBK<sup>+</sup>20] FIFELSKI-VON BÖHLEN, C. ; BRINKMANN, A. ; KOWALSKI, C. ; MEYER, O. ; HELLMERS, S. ; HEIN, A.: Reducing Caregiver’s Physical Strain in Manual Patient Transfer with Robot Support. In: *2020 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*, IEEE, 2020, S. 189–194
- [FBM<sup>+</sup>20] FIFELSKI-VON BÖHLEN, C. ; BRINKMANN, A. ; MÄVERS, S. ; HELLMERS, S. ; HEIN, A.: Virtual Reality Integrated Multi-Depth-Camera-System for Real-Time Telepresence and Telemanipulation in Caregiving. In: *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*, IEEE, 2020, S. 294–297
- [FBO<sup>+</sup>18] FIFELSKI, C. ; BRINKMANN, A. ; ORTMANN, S. M. ; ISKEN, M. ; HEIN, A.: Multi Depth Camera System for 3D Data Recording for Training and Education of Nurses. In: *2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, IEEE, 2018, S. 679–684
- [HBF<sup>+</sup>21] HELLMERS, S. ; BRINKMANN, A. ; FIFELSKI-VON BÖHLEN, C. ; LAU, S. ; DIEKMANN, R. ; HEIN, A.: Assessing Postures and Mechanical Loads during Patient

Transfers. In: *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies - Volume 4: HEALTHINF* INSTICC, SciTePress, 2021, S. 21–29

[KAG<sup>+</sup>20] KOWALSKI, C. ; ARIZPE-GOMEZ, P. ; FIFELSKI, C. ; BRINKMANN, A. ; HEIN, A.: Design of a Supportive Transfer Robot System for Caregivers to Reduce Physical Strain During Nursing Activities. In: *Studies in health technology and informatics* 270 (2020), S. 1245–1246

[KGF<sup>+</sup>21] KOWALSKI, C. ; GLIESCHE, P. ; FIFELSKI-VON BÖHLEN, C. ; BRINKMANN, A. ; HEIN, A.: Handling Comparison between a Human and a Patient Simulator for Nursing Care Related Physical Human-robot Interaction. In: *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies - Volume 5: HEALTHINF* INSTICC, SciTePress, 2021, S. 605–612

# Literaturverzeichnis

- [3D 21] 3D SYSTEMS: *Touch*. <https://de.3dsystems.com/haptics-devices/touch>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [AAB<sup>+</sup>13] ALLOUCH, S. ; AL HARRACH, M. ; BOUDAOU, S. ; LAFORET, J. ; AYACHI, F. S. ; YOUNES, R.: Muscle Force Estimation Using Data Fusion From High-density SEMG Grid. In: *2013 2nd International Conference on Advances in Biomedical Engineering*, IEEE, 2013, S. 195–198
- [AAH<sup>+</sup>18] ABDI, J. ; AL-HINDAWI, A. ; NG, T. ; VIZCAYCHIPI, M. P.: Scoping Review on the Use of Socially Assistive Robot Technology in Elderly Care. In: *BMJ Open* 8 (2018), Nr. 2, S. 1–20
- [ABB21] ABB: *ABB Yumi 14000*. <https://new.abb.com/products/robotics/de/industrieroberer/yumi>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Adv21] ADVANCED MECHANICAL TECHNOLOGY INC.: *AMTI Accupower-O*. <https://www.anti.biz/index.aspx>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [AKN<sup>+</sup>19] ANDROWIS, G. J. ; KWASNICA, M. A. ; NIEWRZOL, P. ; POPOK, P. ; FAKHOURY, F. N. ; SANDROFF, B. M. ; YUE, G. H. ; DELUCA, J.: Mobility and Cognitive Improvements Resulted from Overground Robotic Exoskeleton Gait-Training in Persons with MS. In: *41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, IEEE, 2019, S. 4454–4457
- [AMC<sup>+</sup>17] ALEOTTI, J. ; MICCONI, G. ; CASELLI, S. ; BENASSI, G. ; ZAMBELLI, N. ; BETTELLI, M. ; ZAPPETTINI, A.: Detection of Nuclear Sources by UAV Teleoperation Using a Visuo-Haptic Augmented Reality Interface. In: *Sensors* 17 (2017), Nr. 10, S. 1–22
- [Amm17] AMMANN, A.: Belastungen des Bewegungsapparates reduzieren. In: *Pflegezeitschrift* 70 (2017), Nr. 7, S. 30–32

- [Ana18] ANARKIK 3D DESIGN: *Falcon Haptic Device*. <https://anarkik3d.co.uk/product/falcon-haptic-device/>, 2018. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [AOP<sup>+</sup>17] ABI-FARRAJ, F. ; OSA, T. ; PETERS, N. P. J. ; NEUMANN, G. ; GIORDANO, P. R.: A Learning-Based Shared Control Architecture for Interactive Task Execution. In: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2017, S. 329–335
- [AS20] ARBEIT STATISTIK/ARBEITSMARKTBERICHTERSTATTUNG, Bundesagentur für: *Arbeitsmarktsituation im Pflegebereich*. Nürnberg, Deutschland : Bundesagentur für Arbeit, 2020
- [ASMN20] ANTONIONI, E. ; SURIANI, V. ; MASSA, N. ; NARDI, D.: Autonomous and Remote Controlled Humanoid Robot for Fitness Training. In: *Companion Publication of the 2020 International Conference on Multimodal Interaction*, Association for Computing Machinery, 2020 (ICMI '20 Companion), S. 235–239
- [ASOH04] ALBU-SCHAFFER, A. ; OTT, C. ; HIRZINGER, G.: A passivity based Cartesian impedance controller for flexible joint robots - part II: full state feedback, impedance design and experiments. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings*, IEEE, 2004, S. 2666–2672
- [AWF19] ALTENBUCHNER, A. ; WEBER, K. ; FUCHS, D.: Nützlichkeit & Nutzungstechnikakzeptanz und Technikbewertung von AAL. In: *6. Ambient Medicine® Forum „Assistive Technik für selbstbestimmtes Wohnen“: 19.-20. Februar 2019, Tagungsband Bd. 6*, Cuvillier Verlag, 2019, S. 149–156
- [BAK<sup>+</sup>13] BOUCHER, P. ; ATRASH, A. ; KELOUWANI, S. ; HONORÉ, W. ; NGUYEN, H. ; VILLEMURE, J. ; ROUTHIER, F. ; COHEN, P. ; DEMERS, L. ; FORGET, R. ; PINEAU, J.: Design and Validation of an Intelligent Wheelchair towards a Clinically-Functional Outcome. In: *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* 10 (2013), Nr. 1, S. 1–16
- [BB18] BUSSON, D. ; BÉARÉE, R.: A Pragmatic Approach to Exploiting Full Force Capacity for Serial Redundant Manipulators. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 3 (2018), Nr. 2, S. 888–894
- [BCP<sup>+</sup>17] BONAIUTO, S. ; CANNAVÒ, A. ; PIUMATTI, G. ; PARAVATI, G. ; LAMBERTI, F.: Tele-operation of Robot Teams: A Comparison of Gamepad-, Mobile Device and Hand Tracking-Based User Interfaces. In: *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)* Bd. 2, IEEE, 2017, S. 555–560

- [Bis21a] BISCHOFF, M.: *GitHub Siemens - ROS-Sharp*. <https://github.com/siemens/ros-sharp>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Bis21b] BISCHOFF, M.: *GitHub Siemens - URDF Importer*. <https://github.com/blommers/UdrfImporter>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [BJG18] BAUMGARTEN, S. ; JACOBS, T. ; GRAF, B.: The Robotic Service Assistant - Relieving the Nursing Staff of Workload. In: *ISR 2018; 50th International Symposium on Robotics*, VDE, 2018, S. 1–4
- [BMB20] BMBF: *ROBINA*. <https://www.technik-zum-menschen-bringen.de/projekte/robina>, 2020. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [BMT<sup>+</sup>18] BAMJI, C. S. ; MEHTA, S. ; THOMPSON, B. ; ELKHATIB, T. ; WURSTER, S. u. a.: IMpixel 65nm BSI 320MHz demodulated TOF Image sensor with 3µm global shutter pixels and analog binning. In: *2018 IEEE International Solid - State Circuits Conference - (ISSCC)*, IEEE, 2018, S. 94–96
- [BOS20] BOSCH: *APAS*. <https://apps.boschrexroth.com/microsites/apas/de.html>, 2020. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Bre17] BREITHAUPT, E.: Die Selbstständigkeit als neues Maß der Pflegebedürftigkeit. In: *Uro-News* 21 (2017), Nr. 2, S. 26–29
- [BSC<sup>+</sup>18] BORGES, M. ; SYMINGTON, A. ; COLTIN, B. ; SMITH, T. ; VENTURA, R.: HTC Vive: Analysis and Accuracy Improvement. In: *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2018, S. 2610–2615
- [BSFS15] BARTNECK, C. ; SOUCY, M. ; FLEURET, K. ; SANDOVAL, E. B.: The Robot Engine — Making the Unity 3D Game Engine Work for HRI. In: *2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, IEEE, 2015, S. 431–437
- [BSNA17] BILYEA, A. ; SETH, N. ; NESATHURAI, S. ; ABDULLAH, H.: Robotic Assistants in Personal Care: A Scoping Review. In: *Medical Engineering & Physics* 49 (2017), S. 1–6
- [Bun19] BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT: *Konzentrierte Aktion Pflege - Vereinbarung der Arbeitsgruppen 1 bis 5*. Berlin, Deutschland : Bundesministerium für Gesundheit, 2019
- [BV17] BROOKS, L. P. ; VANCE, J. M.: Industry Use of Virtual Reality in Product Design and Manufacturing: A Survey. In: *Virtual Reality* 21 (2017), S. 1–17

- [CCB<sup>+</sup>16] CHORIN, F. ; CORNU, C. ; BEAUNE, B. ; FRÈRE, J. ; RAHMANI, A.: Sit to Stand in Elderly Fallers vs Non-fallers: New Insights from Force Platform and Electromyography Data. In: *Aging Clinical and Experimental Research* 28 (2016), Nr. 5, S. 871–879
- [CFS<sup>+</sup>14] CODD-DOWNEY, R. ; FOROOSHANI, P. M. ; SPEERS, A. ; WANG, H. ; JENKIN, M.: From ROS to Unity: Leveraging Robot and Virtual Environment Middleware for Immersive Teleoperation. In: *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, IEEE, 2014, S. 932–936
- [CGY<sup>+</sup>17] CHEN, J. ; GLOVER, M. ; YANG, C. ; LI, C. ; LI, Z. ; CANGELOSI, A.: Development of an Immersive Interface for Robot Teleoperation. In: *Towards Autonomous Robotic Systems*, Springer, 2017, S. 1–15
- [CH07] CRACKNELL, A.P. ; HAYES, L.: *Introduction to Remote Sensing*. London, Großbritannien : Taylor and Francis Group, 2007
- [Cha21] CHATZILYGEROUDIS, K.: *GitHub EPFL-LASA*. [https://github.com/epfl-lasa/iiwa\\_ros](https://github.com/epfl-lasa/iiwa_ros), 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [CHU<sup>+</sup>13] CHARRY, E. ; HU, W. ; UMER, M. ; RONCHI, A. ; TAYLOR, S.: Study on Estimation of Peak Ground Reaction Forces using Tibial Accelerations in Running. In: *2013 IEEE Eighth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, IEEE, 2013, S. 288–293
- [CMHP19] CLARK, R. A. ; MENTIPLAY, B. F. ; HOUGH, E. ; PUA, Y. H.: Three-Dimensional Cameras and Skeleton Pose Tracking for Physical Function Assessment: A Review of Uses, Validity, Current Developments and Kinect Alternatives. In: *Gait & Posture* 68 (2019), S. 193–200
- [CMS<sup>+</sup>20] CHA, J. S. ; MONFARED, S. ; STEFANIDIS, D. ; NUSSBAUM, M. A. ; YU, D.: Supporting Surgical Teams: Identifying Needs and Barriers for Exoskeleton Implementation in the Operating Room. In: *Human Factors* 62 (2020), Nr. 3, S. 377–390
- [CP16] CHAKRABORTY, M. ; PARBAT, D.: Fractal Analysis of sEMG Signal under Varying Load Conditions. In: *2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy Communication (CIEC)*, IEEE, 2016, S. 149–152
- [Cyb21] CYBERDYNE: *What's HAL?* <https://www.cyberdyne.jp/english/products/HAL/index.html>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [CZZW20] CHEN, Y. ; ZHANG, B. ; ZHOU, J. ; WANG, K.: Real-Time 3D Unstructured Environment Reconstruction Utilizing VR and Kinect-Based Immersive Tele-



- operation for Agricultural Field Robots. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 175 (2020), S. 2–12
- [Des21a] DESTATIS: *Destatis Bevölkerungspyramide*. <https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/index.html>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Des21b] DESTATIS: *Destatis Glossar - Zusammengefasste Geburtenziffer TFR*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Glossar/zusammengefasste-geburtenziffer.html>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Des21c] DESTATIS: *Destatis Lebendgeborene und Gestorbene*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Geburten/Tabellen/lebendgeborene-gestorbene.html>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Deu02] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG: *GUV-I 8535 Rückengerechter Patiententransfer in der Kranken- und Altenpflege - Bundesweites Präventionsprogramm der Unfallversicherungsträger der öffentlichen Hand*. Berlin, Deutschland, 2002
- [Deu07] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG: *GUV-I 8557 Rückengerechtes Arbeiten in der Pflege und Betreuung*. Berlin, Deutschland : DGUV, 2007
- [Deu18] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG: *207-022 Bewegen von Menschen im Gesundheitsdienst und in der Wohlfahrtspflege - Hilfestellung zur Gefährdungsbeurteilung nach der Lastenhandhabungsverordnung*. DGUV, 2018
- [Deu20a] DEUTSCHER ETHIKRAT: *Stellungnahme Robotik für gute Pflege*. Berlin, Deutschland : Deutscher Ethikrat, 2020
- [Deu20b] DEUTSCHES INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE DOKUMENTATION UND INFORMATION: *DIMDI- Rückenschmerzen*. <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2020/block-m50-m54.htm>, 2020. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [DH55] DENAVIT, J. ; HARTENBERG, R. S.: A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. In: *Trans. ASME E, Journal of Applied Mechanics* 22 (1955), S. 215–221

- [Die16] DIETRICH, A.: *Springer Tracts in Advanced Robotics*. Bd. 116: *Whole-body Impedance Control of Wheeled Humanoid Robots*. Cham, Schweiz : Springer, 2016
- [DIM<sup>+</sup>12] DING, M. ; IKEURA, R. ; MUKAI, T. ; NAGASHIMA, H. ; HIRANO, S. ; MATSUO, K. ; SUN, M. ; JIANG, C. ; HOSOE, S.: Comfort Estimation During Lift-Up Using Nursing-Care Robot — RIBA. In: *2012 First International Conference on Innovative Engineering Systems*, IEEE, 2012, S. 225–230
- [DIN98] DIN-NORMENAUSSCHUSS MASCHINENBAU: *ISO 9283:1998 - Industrieroboter - Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethoden*. 1998
- [DIN15] DIN-NORMENAUSSCHUSS SICHERHEITSTECHNISCHE GRUNDSÄTZE: *ISO 13849-1:2015 - Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsgrundsätze*. 2015
- [DIN16] DIN-NORMENAUSSCHUSS MASCHINENBAU: *ISO/TS 15066:2016 - Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter*. 2016
- [DRE17] DOISY, G. ; RONEN, A. ; EDAN, Y.: Comparison of Three Different Techniques for Camera and Motion Control of a Teleoperated Robot. In: *Applied Ergonomics* 58 (2017), S. 527–534
- [DYL<sup>+</sup>20] DENG, X. ; YU, Z. L. ; LIN, C. ; GU, Z. ; LI, Y.: A Bayesian Shared Control Approach for Wheelchair Robot With Brain Machine Interface. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 28 (2020), Nr. 1, S. 328–338
- [EKB<sup>+</sup>92] EVANS, J. ; KRISHNAMURTHY, B. ; BARROWS, B. ; SKEWIS, T. ; LUMELSKY, V.: Handling Real-World Motion Planning: A Hospital Transport Robot. In: *IEEE Control Systems Magazine* 12 (1992), Nr. 1, S. 15–19
- [emo21] EMOVATEC: *ello*. <https://www.emovatec.at/produkte1/ello>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Emu19] EMUNDS, B.: Überforderte Angehörige - ausgebeutete Live-Ins - Burnout-gefährdete Pflegekräfte. Sozialethische Bemerkungen zur verweigernden sozialen Wertschätzung Pflegenden in Deutschland. In: *Gut versorgt?* Nomos Verlagsgesellschaft, 2019, S. 147–168
- [EPF21] EPFL: *EPFL-LASA*. <https://www.epfl.ch/labs/lasa/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Ern21] ERNST, C.: Ausbildungsmarketing und eRecruiting in der Altenpflege. In: *Heilberufe* 73 (2021), Nr. 1, S. 46–48

- [Fan21] FANUC: *Fanuc CRX-10iA/L*. <https://www.fanuc.eu/de/de/roboter/roboterfilter-seite/kollaborierende-roboter>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [FBR<sup>+</sup>15] FANKHAUSER, P. ; BLOESCH, M. ; RODRIGUEZ, D. ; KAESTNER, R. ; HUTTER, M. ; SIEGWART, R.: Kinect v2 for Mobile Robot Navigation: Evaluation and Modeling. In: *2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, IEEE, 2015, S. 388–394
- [FEP<sup>+</sup>16] FISCHINGER, D. ; EINRAMHOF, P. ; PAPOUTSAKIS, K. ; WOHLKINGER, W. ; MAYER, P. ; PANEK, P. ; HOFMANN, S. ; KOERTNER, T. ; WEISS, A. ; ARGYROS, A. ; VINCZE, M.: Hobbit, a Care Robot Supporting Independent Living at Home: First Prototype and Lessons Learned. In: *Robotics and Autonomous Systems* 75 (2016), S. 60–78
- [FGS<sup>+</sup>15] FANG, B. ; GUO, D. ; SUN, F. ; LIU, H. ; WU, Y.: A Robotic Hand-Arm Teleoperation System using Human Arm/Hand with a Novel Data Glove. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE, 2015, S. 2483–2488
- [FLL<sup>+</sup>19] FATTAL, C. ; LEYNAERT, V. ; LAFFONT, I. ; BAILLET, A. ; ENJALBERT, M. ; LEROUX, C.: SAM, an Assistive Robotic Device Dedicated to Helping Persons with Quadriplegia: Usability Study. In: *International Journal of Social Robotics* 11 (2019), Nr. 1, S. 89–103
- [For21] FORCE DIMENSION: *Force Dimension Products - Omega.7*. <https://www.forcedimension.com/products>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [FQF<sup>+</sup>20] FIANI, B. ; QUADRI, S. A. ; FAROOQUI, M. ; CATHEL, A. ; BERMAN, B. ; NOEL, J. ; SIDDIQI, J.: Impact of Robot-Assisted Spine Surgery on Health Care Quality and Neurosurgical Economics: A Systemic Review. In: *Neurosurgical Review* 43 (2020), Nr. 1, S. 17–25
- [Fra21a] FRANKA EMIKA: *Panda*. <https://www.franka.de/de/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Fra21b] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG: *Elevon*. <https://www.aal.fraunhofer.de/de/projekte/elevon.html>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [FRL<sup>+</sup>14] FICUCIELLO, F. ; ROMANO, A. ; LIPPIELLO, V. ; VILLANI, L. ; SICILIANO, B.: Human Motion Mapping to a Robot Arm with Redundancy Resolution. In: LENARČIČ, J. (Hrsg.) ; KHATIB, O. (Hrsg.): *Advances in Robot Kinematics*. Cham, Schweiz : Springer, 2014, Kapitel 21, S. 193–201

- [FRV<sup>+</sup>16] FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, Á. ; VELASCO-ÁLVAREZ, F. ; RON-ANGEVIN, R.: Review of Real Brain-Controlled Wheelchairs. In: *Journal of Neural Engineering* 13 (2016), Nr. 6, S. 1–15
- [GA18] GIORGINI, M. ; ALEOTTI, J.: Visualization of AGV in Virtual Reality and Collision Detection with Large Scale Point Clouds. In: *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, 2018, S. 905–910
- [GBD<sup>+</sup>16] GIULIANOTTI, P. C. ; BIANCO, F. M. ; DASKALAKI, D. ; GONZALEZ-CICCARELLI, L. F. ; KIM, J. ; BENEDETTI, E.: Robotic Liver Surgery: Technical Aspects and Review of the Literature. In: *Hepatobiliary Surgery and Nutrition* 5 (2016), Nr. 4, S. 311–321
- [GDK11] GLIGORIĆ, N. ; DEJANOVIĆ, I. ; KRČO, S.: Performance Evaluation of Compact Binary XML Representation for Constrained Devices. In: *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*, IEEE, 2011, S. 1–5
- [Ges21a] GESUNDHEITSBERICHTERSTATTUNG DES BUNDES: *Bevölkerung in 1000 (Prognose) nach der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Gliederungsmerkmale: Jahre, Deutschland, Alter, Variante Bevölkerungsprognose Variante 1.* [https://www.gbe-bund.de/gbe/pkg\\_isgbe5.prc\\_menu\\_olap?p\\_uid=gast&p\\_aid=60698893&p\\_sprache=D&p\\_help=3&p\\_indnr=716&p\\_indsp=&p\\_ityp=H&p\\_fid=](https://www.gbe-bund.de/gbe/pkg_isgbe5.prc_menu_olap?p_uid=gast&p_aid=60698893&p_sprache=D&p_help=3&p_indnr=716&p_indsp=&p_ityp=H&p_fid=), 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Ges21b] GESUNDHEITSBERICHTERSTATTUNG DES BUNDES: *Durchschnittliche Lebenserwartung im Alter von ... Jahren je Person. Gliederungsmerkmale: Zeitraum, Region, Alter, Geschlecht.* [https://www.gbe-bund.de/gbe/pkg\\_isgbe5.prc\\_menu\\_olap?p\\_uid=gast&p\\_aid=25506321&p\\_sprache=D&p\\_help=2&p\\_indnr=524&p\\_indsp=50074&p\\_ansnr=73493962&p\\_version=2](https://www.gbe-bund.de/gbe/pkg_isgbe5.prc_menu_olap?p_uid=gast&p_aid=25506321&p_sprache=D&p_help=2&p_indnr=524&p_indsp=50074&p_ansnr=73493962&p_version=2), 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Ges21c] GESUNDHEITSBERICHTERSTATTUNG DES BUNDES: *Pflegebedürftige (Anzahl und Quote). Gliederungsmerkmale: Jahre, Region, Alter, Geschlecht.* [https://www.gbe-bund.de/gbe/pkg\\_isgbe5.prc\\_menu\\_olap?p\\_uid=gast&p\\_aid=43963074&p\\_sprache=D&p\\_help=0&p\\_indnr=510&p\\_indsp=138&p\\_ityp=H&p\\_fid=](https://www.gbe-bund.de/gbe/pkg_isgbe5.prc_menu_olap?p_uid=gast&p_aid=43963074&p_sprache=D&p_help=0&p_indnr=510&p_indsp=138&p_ityp=H&p_fid=), 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [GF17] GRAUPNER, I. ; FREITAG, S.: Arbeitsplatz Pflegebett. In: *Heilberufe* 69 (2017), Nr. 9, S. 10–13
- [GGF06] GALINDO, C. ; GONZALEZ, J. ; FERNANDEZ-MADRIGAL, J.: Control Architecture for Human–Robot Integration: Application to a Robotic Wheelchair. In:

- IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 36 (2006), Nr. 5, S. 1053–1067
- [GGSW20] GIHLEB, R. ; GIUNTELLA, O. ; S., Luca ; WANG, T.: Industrial Robots, Workers' Safety, and Health. In: *IZA Discussion Paper Series* 13672 (2020), S. 1–33
- [Gie18] GIESE, C.: Professionelles Selbstverständnis und Ethik. In: RIEDEL, A (Hrsg.) ; LINDE, A. (Hrsg.): *Ethische Reflexion in der Pflege: Konzepte – Werte – Phänomene*. Berlin, Heidelberg, Deutschland : Springer, 2018, Kapitel 3, S. 21–29
- [GIT21] GITAI: *GITAI Robot*. <https://gitai.tech/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [GJM<sup>+</sup>14] GARRIDO-JURADO, S. ; MUÑOZ-SALINAS, R. ; MADRID-CUEVAS, F.J. ; MARÍN-JIMÉNEZ, M.J.: Automatic Generation and Detection of Highly Reliable Fiducial Markers Under Occlusion. In: *Pattern Recognition* 47 (2014), Nr. 6, S. 2280–2292
- [GKP<sup>+</sup>20] GLIESCHE, P. ; KRICK, T. ; PFINGSTHORN, M. ; DROLSHAGEN, S. ; KOWALSKI, C. ; HEIN, A.: Kinesthetic Device vs. Keyboard/Mouse: A Comparison in Home Care Telemanipulation. In: *Frontiers in Robotics and AI* 7 (2020), S. 172
- [GKR<sup>+</sup>18] GRAF, B. ; KING, Ralf S. ; RÖSSNER, Andrea ; SCHILLER, Christian ; GANZ, Walter ; BLÄSING, Dominic ; FISCHBACH, Johannes ; WARNER, Nora ; BORNWASSER, Manfred: Entwicklung eines intelligenten Pflegewagens zur Unterstützung des Personals stationärer Pflegeeinrichtungen. In: PFANNSTIEL, Mario A. (Hrsg.) ; KRAMMER, Sandra (Hrsg.) ; SWOBODA, Walter (Hrsg.): *Digitale Transformation von Dienstleistungen im Gesundheitswesen IV: Impulse für die Pflegeorganisation*. Wiesbaden, Deutschland : Springer, 2018, Kapitel 2, S. 25–49
- [GMG<sup>+</sup>95] GOLDBERG, K. ; MASCHA, M. ; GENTNER, S. ; ROTHENBERG, N. ; SUTTER, C. ; WIEGLEY, J.: Desktop Teleoperation via the World Wide Web. In: *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 1995, S. 654–659
- [GOBB91] GARG, A. ; OWEN, B. ; BELLER, D. ; BANAAG, J.: A Biomechanical and Ergonomic Evaluation of Patient Transferring Tasks: Bed to Wheelchair and Wheelchair to Bed. In: *Ergonomics* 34 (1991), Nr. 3, S. 289–312
- [Goo21] GOOGLE: *Google Protocol Buffers*. <https://developers.google.com/protocol-buffers/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021

- [GPA<sup>+</sup>17] GARCÍA, J. C. ; PATRÃO, B. ; ALMEIDA, L. ; PÉREZ, J. ; MENEZES, P. ; DIAS, J. ; SANZ, P. J.: A Natural Interface for Remote Operation of Underwater Robots. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 37 (2017), Nr. 1, S. 34–43
- [GRH<sup>+</sup>09] GRAF, B. ; REISER, U. ; HÄGELE, M. ; MAUZ, K. ; KLEIN, P.: Robotic Home Assistant Care-O-bot® 3 - Product Vision and Innovation Platform. In: *2009 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*, IEEE, 2009, S. 139–144
- [GRW<sup>+</sup>09] GLOVER, C. ; RUSSELL, B. ; WHITE, A. ; MILLER, M. ; STOYTCHEV, A.: An Effective and Intuitive Control Interface for Remote Robot Teleoperation with Complete Haptic Feedback. In: *Proceedings of the Emerging Technologies Conference (ETC)*, UML, 2009, S. 1–8
- [GS20] GRAF, B. ; SCHILLER, C.: Robotik in der Pflege. In: *Digitale Transformation - Arbeit in Dienstleistungssystemen*. Baden-Baden, Deutschland : Nomos Verlagsgesellschaft, 2020, Kapitel 4, S. 193–210
- [GSM15] GUSTAFSSON, C. ; SVANBERG, C. ; MÜLLERSDORF, M.: Using a Robotic Cat in Dementia Care: A Pilot Study. In: *Journal of Gerontological Nursing* 41 (2015), Nr. 10, S. 46–56
- [GWYZ19] GONG, D. ; WANG, Y. ; YU, J. ; ZUO, G.: Motion Mapping from a Human Arm to a Heterogeneous Excavator-like Robotic Arm for Intuitive Teleoperation. In: *2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, IEEE, 2019, S. 493–498
- [Hü10] HÜLSKEN-GIESLER, M.: Technikkompetenzen in der Pflege – Anforderungen im Kontext der Etablierung Neuer Technologien in der Gesundheitsversorgung. In: FRIESACHER, Heiner (Hrsg.): *Pflege und Technik – eine kritische Analyse*. Weinheim, Deutschland : Beltz Juventa, 2010, Kapitel 10, S. 330–352
- [Ham16] HAMEED, I. A.: Motion Planning for Autonomous Landmine Detection and Clearance Robots. In: *2016 International Workshop on Recent Advances in Robotics and Sensor Technology for Humanitarian Demining and Counter-IEDs (RST)*, IEEE, 2016, S. 1–5
- [HAMA19] HENTOUT, A. ; AOUACHE, M. ; MAOUDJ, A. ; AKLI, I.: Human–Robot Interaction in Industrial Collaborative Robotics: A Literature Review of the Decade 2008–2017. In: *Advanced Robotics* 33 (2019), Nr. 15-16, S. 764–799
- [HBCM17] HARRACH, M. A. ; BOUDAUD, S. ; CARRIOU, V. ; MARIN, F.: Multi-Muscle Force Estimation Using Data Fusion and HD-sEMG: An Experimental Study.

- In: *2017 Fourth International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME)*, IEEE, 2017, S. 1–4
- [HBH<sup>+</sup>20] HIRT, J. ; BALLHAUSEN, N. ; HERING, A. ; KLIEGEL, M. ; BEER, T. ; MEYER, G.: Social Robot Interventions for People with Dementia: A Systematic Review on Effects and Quality of Reporting. In: *Journal of Alzheimer's Disease* 79 (2020), Nr. 2, S. 1–20
- [Hel17] HELLWEG, M.: Pflegeausbildungsliteratur zwischen pflegewissenschaftlichem Anspruch und traditionellen medizinorientierten Wissensbeständen: Der Prozess des Bettlägerigwerdens: Was Lernende aus Ihren Pflegelehrbüchern darüber (nicht) lernen können. In: *PADUA* 12 (2017), S. 249–256
- [HG17] HOSSEINI, S. E. ; GOHER, K.: Personal Care Robots for Older Adults: An Overview. In: *Asian Social Science* 13 (2017), Nr. 1, S. 11–19
- [HGK<sup>+</sup>16] HELMRICH, R. ; GÜNTÜRK-KUHL, B. ; HALL, A. ; KOSCHECK, S. ; LEPPELMEIER, I. ; MAIER, T. ; TIEMANN, M.: *Attraktivität und Zukunftsaussichten in den Berufsfeldern Pflege und Erziehung*. Düsseldorf, Deutschland : Hans Böckler Stiftung, 2016
- [HGO18] HUSSEIN, A. ; GARCÍA, F. ; OLAVERRI-MONREAL, C.: ROS and Unity Based Framework for Intelligent Vehicles Control and Simulation. In: *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, IEEE, 2018, S. 1–6
- [HHC<sup>+</sup>17] HUA, B. ; HOSSAIN, D. ; CAPI, G. ; JINDAI, M. ; YOSHIDA, I.: Human-like Artificial Intelligent Wheelchair Robot Navigated by Multi-Sensor Models in Indoor Environments and Error Analysis. In: *Procedia Computer Science* 105 (2017), S. 14–19
- [HK17] HOMMEL, T. ; KOCH, J.: Zukunft der Pflege? In: THIELSCHER, C. (Hrsg.): *Medizinökonomie 2: Unternehmerische Praxis und Methodik*. Wiesbaden, Deutschland : Springer, 2017, Kapitel 5, S. 131–152
- [HLH<sup>+</sup>17] HOUSE, R. ; LASSO, A. ; HARISH, V. ; BAUM, Z. ; FICHTINGER, G.: Evaluation of the Intel RealSense SR300 Camera for Image-Guided Interventions and Application in Vertebral Level Localization. In: III, Robert J. W. (Hrsg.) ; FEI, Baowei (Hrsg.) ; International Society for Optics and Photonics (Veranst.): *Medical Imaging 2017: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*. Bellingham, USA : SPIE, 2017, S. 771 – 777
- [HLS16] HÖHMANN, U. ; LAUTENSCHLÄGER, M. ; SCHWARZ, L.: Belastungen im Pflegeberuf: Bedingungsfaktoren, Folgen und Desiderate. In: THIELSCHER, C.

- (Hrsg.): *Pflege-Report 2016: Schwerpunkt: Die Pflegenden im Fokus*. Stuttgart, Deutschland : Schattauer, 2016, Kapitel 5, S. 73–90
- [Hog84] HOGAN, N.: Impedance Control: An Approach to Manipulation. In: *1984 American Control Conference*, IEEE, 1984, S. 304–313
- [HPH<sup>+</sup>15] HA, C. ; PARK, S. ; HER, J. ; JANG, I. ; LEE, Y. ; CHO, G. R. ; SON, H. I. ; LEE, D.: Whole-Body Multi-Modal Semi-Autonomous Teleoperation of Mobile Manipulator Systems. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2015, S. 164–170
- [HPL16] HEIN, C. M. ; PFITZER, M. ; LÜTH, T. C.: Evaluierung der Nutzerakzeptanz tragbarer Hilfsmittel zur passiven Kraftunterstützung für Altenpflegekräfte. In: WEIDNER, R. (Hrsg.): *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen*. Hamburg, Deutschland : Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik, 2016, Kapitel 9, S. 79–88
- [HTC21] HTC COOPERATION: *What is the recommended space for play area.* [https://www.vive.com/eu/support/vive/category\\_howto/what-is-the-recommended-space-for-play-area.html#:~:text=For%20room%2Dscale%20setup%2C%20a,for%20seated%20and%20standing%20experiences.,2021](https://www.vive.com/eu/support/vive/category_howto/what-is-the-recommended-space-for-play-area.html#:~:text=For%20room%2Dscale%20setup%2C%20a,for%20seated%20and%20standing%20experiences.,2021). – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [HZZ<sup>+</sup>18] HUANG, L. ; ZHANG, Y. ; ZHENG, J. ; CAI, P. ; DUTTA, S. ; YUE, Y. ; THALMANN, N. ; CAI, Y.: Point Cloud Based Path Planning for Tower Crane Lifting. In: *Proceedings of Computer Graphics International 2018*. ACM, 2018, S. 211–215
- [IEE21] IEEE SPECTRUM ZEITSCHRIFT: *GITAI Partners With JAXA to Send Telepresence Robots to Space.* [https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/space-robots/gitai-partners-with-jaxa-to-send-telepresence-robots-to-space,](https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/space-robots/gitai-partners-with-jaxa-to-send-telepresence-robots-to-space,2021) 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Inn18] INNOPHYS: *Muscle Suit.* <https://innophys.jp/en/>, 2018. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [IS21] INTUITIVE-SURGICAL: *Da Vinci Surgical Systems.* [https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/systems,](https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/systems,2021) 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Isk14] ISKEN, M.: *Optimierte Roboter-Navigation und geriatrische Mobilitäts-Assessments in häuslichen Umgebungen*. München, Deutschland : Verlag Dr. Hut, 2014



- [JBT21] JBT: *ATLIS*. <https://www.jbtc.com/en/emea/automated-systems/products-and-applications/products/special-application-agvs/atlis>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [JCAA18] JAFRI, R. ; CAMPOS, R. L. ; ALI, S. A. ; ARABNIA, H. R.: Visual and Infra-red Sensor Data-Based Obstacle Detection for the Visually Impaired Using the Google Project Tango Tablet Development Kit and the Unity Engine. In: *IEEE Access* 6 (2018), S. 443–454
- [JJT<sup>+</sup>14] JÄGER, M. ; JORDAN, C. ; THEILMEIER, A. ; WORTMANN, N. ; KUHN, S. ; NIENHAUS, A. ; LUTTMANN, A.: Analyse der Lumbalbelastung beim manuellen Bewegen von Patienten zur Prävention biomechanischer Überlastungen von Beschäftigten im Gesundheitswesen. In: *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie* 64 (2014), Nr. 2, S. 98–112
- [Kau20] KAUR, A.: Wheelchair Control for Disabled Patients using EMG/EOG based Human Machine Interface: A Review. In: *Journal of Medical Engineering & Technology* 45 (2020), Nr. 1, S. 1–22
- [KBNZ19] KUHLMHEY, A. ; BLÜHER, S. ; NORDHEIM, J. ; ZÖLLICK, J.: *Technik in der Pflege -Einstellungen von professionell Pflegenden zu Chancen und Risiken neuer Technologien und technischer Assistenzsysteme*. Zentrum für Qualität in der Pflege, 2019
- [KBS<sup>+</sup>14] KOCH, P. ; BEHL-SCHÖN, S. ; PIETSCH, A. ; NIENHAUS, A.: Sekundäre Individualprävention von Rückenschmerzen bei Pflegepersonal. In: *Trauma und Berufskrankheit* 16 (2014), S. 191–196
- [KCK<sup>+</sup>18] KELLY, J. W. ; CHEREP, L. A. ; KLESEL, B. ; SIEGEL, Z. D. ; GEORGE, S.: Comparison of Two Methods for Improving Distance Perception in Virtual Reality. In: *ACM Trans. Appl. Percept.* 15 (2018), Nr. 2, S. 1–11
- [KCR<sup>+</sup>17] KOUROUPETROGLOU, C. ; CASEY, D. ; RACITI, M. ; BARRETT, E. ; D’ONOFRIO, G. ; RICCIARDI, F. ; GIULIANI, F. ; GRECO, A. ; SANCARLO, D. ; MANNION, A. ; WHELAN, S. ; PEGMAN, G. ; KOUMPIS, A. ; RECUPERO, D. R. ; KOUROUPETROGLOU, A. ; SANTORELLI, A.: Interacting with Dementia: the Mario Approach. In: CUDD, P. (Hrsg.) ; WITTE, L. de (Hrsg.): *Harnessing the Power of Technology to Improve Lives*. Clifton, USA : IOS Press, Inc., 2017, Kapitel 1, S. 38–47
- [KD02] KHALIL, W. ; DOMBRE, E.: *Modeling, Identification and Control of Robots*. 3. London, Großbritannien : Kogan Page Science, 2002

- [Keh18] KEHL, C.: *Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung Robotik und assistive Neurotechnologien in der Pflege – gesellschaftliche Herausforderungen*. Berlin, Deutschland : Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin, 2018
- [KEL<sup>+</sup>16] KRUPKE, D. ; EINIG, L. ; LANGBEHN, E. ; ZHANG, J. ; STEINICKE, F.: Immersive Remote Grasping: Realtime Gripper Control by a Heterogenous Robot Control System. In: *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology*, ACM, 2016, S. 337–338
- [KGB<sup>+</sup>15] KUSMA, B. ; GLAESENER, J. ; BRANDENBURG, S. ; PIETSCH, A. ; FISCHER, K. ; SCHMIDT, J. ; BEHL-SCHÖN, S. ; POHRT, U.: Der Pflege das Kreuz stärken–Individualprävention „Rücken“ bei der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege. In: *Trauma und Berufskrankheit 17* (2015), Nr. 4, S. 244–249
- [KH10] KANG, Y. ; HO, Y.: High-quality multi-view depth generation using multiple color and depth cameras. In: *2010 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, IEEE, 2010, S. 1405–1410
- [KMLB18] KUNDU, A. S. ; MAZUMDER, O. ; LENKA, P. K. ; BHAUMIK, S.: Hand Gesture Recognition based Omnidirectional Wheelchair Control using IMU and EMG Sensors. In: *Journal of Intelligent & Robotic Systems 91* (2018), S. 529–541
- [KND15] KOWALSKI, M. ; NARUNIEC, J. ; DANILUK, M.: Livescan3D: A Fast and Inexpensive 3D Data Acquisition System for Multiple Kinect v2 Sensors. In: *2015 International Conference on 3D Vision*, IEEE, 2015, S. 318–325
- [KNFS15] KRÜCKEL, K. ; NOLDEN, F. ; FERREIN, A. ; SCHOLL, I.: Intuitive Visual Teleoperation for UGVs Using Free-Look Augmented Reality Displays. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2015, S. 4412–4417
- [KOKS17] KUCUKYILDIZ, G. ; OCAK, H. ; KARAKAYA, S. ; SAYLI, O.: Design and Implementation of a Multi Sensor based Brain Computer Interface for a Robotic Wheelchair. In: *Journal of Intelligent & Robotic Systems 87* (2017), Nr. 2, S. 247–263
- [KOLH13] KIM, D. ; OH, K. W. ; LEE, C. S. ; HONG, D.: Novel Design of Haptic Devices for Bilateral Teleoperated Excavators Using the Wave-Variable Method. In: *International Journal of Precision engineering and manufacturing 14* (2013), Nr. 2, S. 223–230

- [Kon11] KONRAD, P.: *EMG-Fibel - Eine praxisorientierte Einführung in die kinesiologische Elektromyographie*. Scottsdale, USA : Noraxon INC, 2011
- [KRR17] KLINER, K. ; RENNERT, D. ; RICHTER, M.: *Gesundheit und Arbeit – Blickpunkt Gesundheitswesen*. Bd. 106,. Wolfsburg, Deutschland : BKK, 2017
- [KSP<sup>+</sup>04] KRON, A. ; SCHMIDT, G. ; PETZOLD, B. ; ZAH, M. I. ; HINTERSEER, P. ; STEINBACH, E.: Disposal of Explosive Ordnances by Use of a Bimanual Haptic Telepresence System. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2004, S. 1968–1973
- [KUK16] KUKA: *Media Flange Betriebsanleitung*. Option Media Flange. Augsburg, Deutschland, 2016
- [KUK17] KUKA: *Broschüre Kuka Sensitive robotics\_LBR iiwa PB0004/EN/4/0317*. Augsburg, Deutschland, 2017
- [KUK21a] KUKA: *Kuka LBR iiwa Industrieroboter*. <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter/lbr-iiwa>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [KUK21b] KUKA: *Lösungsdatenbank Life Science Robotics Robert*. <https://www.kuka.com/de-de/branchen/loesungsdatenbank/2019/08/life-science-robotics-robert>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [KW17] KAJITANI, Isamu ; WAKITA, Yujin: An Introduction to the Development of Transfer Assistive Robots in Japan. In: *AAATE Conf.*, IOS Press, 2017, S. 465–471
- [KYB<sup>+</sup>16] KHATIB, O. ; YEH, X. ; BRANTNER, G. ; SOE, B. ; KIM, B. ; GANGULY, S. ; STUART, H. ; WANG, S. ; CUTKOSKY, M. ; EDSINGER, A. ; MULLINS, P. ; BARHAM, M. ; VOOLSTRA, C. R. ; SALAMA, K. N. ; L' HOUR, M. ; CREUZE, V.: Ocean One: A Robotic Avatar for Oceanic Discovery. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 23 (2016), Nr. 4, S. 20–29
- [Lan20a] LANDAU, K.: Ergonomie und gesundes Arbeiten. In: *Heilberufe* 72 (2020), Nr. 12, S. 58–61
- [Lan20b] LANDAU, K.: *Pflege gestalten*. Neuhausen, Deutschland : Ergonomia Verlag, 2020
- [LB16] LONG, S. K. ; BLISS, J. P.: The Effect of Control Device on Performance in a Robotic Arm Task. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* SAGE, 2016, S. 795–799

- [LFR18] LIPTON, J. I. ; FAY, A. J. ; RUS, D.: Baxter's Homunculus: Virtual Reality Spaces for Teleoperation in Manufacturing. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 3 (2018), Nr. 1, S. 179–186
- [LL13] LEI, S. ; LI, Z.: Fusing Visual Tracking and Navigation for autonomous Control of An Intelligent Wheelchair. In: *IFAC Proceedings Volumes* 46 (2013), Nr. 20, S. 549–554
- [LLLC20] LI, Z. ; LI, C. ; LI, S. ; CAO, X.: A Fault-Tolerant Method for Motion Planning of Industrial Redundant Manipulator. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 16 (2020), Nr. 12, S. 7469–7478
- [LML17] LAUTERBACH, R. ; MATANES, E. ; LOWENSTEIN, L.: Review of Robotic Surgery in Gynecology—The Future is Here. In: *Rambam Maimonides Medical Journal* 8 (2017), Nr. 2, S. 1–12
- [LNR<sup>+</sup>16] LANE, G. W. ; NORONHA, D. ; RIVERA, A. ; CRAIG, K. ; YEE, C. ; MILLS, B. ; VILLANUEVA, E.: Effectiveness of a Social Robot, “Paro,” in a VA Long-Term Care Setting. In: *Psychological Services* 13 (2016), Nr. 3, S. 292–299
- [LSC<sup>+</sup>19] LENTINI, G. ; SETTIMI, A. ; CAPORALE, D. ; GARABINI, M. ; GRIOLI, G. ; PALLOTTINO, L. ; CATALANO, M. G. ; BICCHI, A.: Alter-Ego: A Mobile Robot With a Functionally Anthropomorphic Upper Body Designed for Physical Interaction. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26 (2019), Nr. 4, S. 94–107
- [LTCW18] LIAO, L. ; TSENG, Y. ; CHIANG, H. ; WANG, W.: EMG-based Control Scheme with SVM Classifier for Assistive Robot Arm. In: *2018 International Automatic Control Conference (CACs)*, IEEE, 2018, S. 1–5
- [LYZ<sup>+</sup>20] LV, H. ; YANG, G. ; ZHOU, H. ; HUANG, X. ; YANG, H. ; PANG, Z.: Teleoperation of Collaborative Robot for Remote Dementia Care in Home Environments. In: *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine* 8 (2020), S. 1–10
- [LZD<sup>+</sup>17] LI, Z. ; ZHAO, S. ; DUAN, J. ; SU, C. ; YANG, C. ; ZHAO, X.: Human Cooperative Wheelchair With Brain–Machine Interaction Based on Shared Control Strategy. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22 (2017), Nr. 1, S. 185–195
- [MAFR11] MAHEU, V. ; ARCHAMBAULT, P. S. ; FRAPPIER, J. ; ROUTHIER, F.: Evaluation of the JACO Robotic Arm: Clinico-Economic Study for Powered Wheelchair Users with Upper-Extremity Disabilities. In: *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, IEEE, 2011, S. 1–5

- [MAI18] MAID-PROJEKT: *MAID-Projekt*. <https://maid-projekt.de/>, 2018. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [MCD<sup>+</sup>20] MIŠEIKIS, J. ; CARONI, P. ; DUCHAMP, P. ; GASSER, A. ; MARKO, R. ; MIŠEIKIENĖ, N. ; ZWILLING, F. ; DE CASTELBAJAC, C. ; EICHER, L. ; FRÜH, M. ; FRÜH, H.: Lio-A Personal Robot Assistant for Human-Robot Interaction and Care Applications. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 5 (2020), Nr. 4, S. 5339–5346
- [Mea19] MEAL TIME PARTNERS: *Meal Time Partners Dining System*. <http://www.mealtimepartners.com/>, 2019. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Med17] MEDIZINISCHER DIENST DES SPITZENVERBANDES BUND DER KRANKENKASSEN E.V.: *Das neue Begutachtungsinstrument der sozialen Pflegeversicherung - Die Selbstständigkeit als Maß der Pflegebedürftigkeit*. Essen, Deutschland : MDS, 2017 [https://www.mds-ev.de/uploads/media/downloads/Fachinfo\\_PSG\\_II\\_01.pdf](https://www.mds-ev.de/uploads/media/downloads/Fachinfo_PSG_II_01.pdf)
- [Mei17] MEISSNER, A.: Technisierung der professionellen Pflege. Einfluss. Wirkung. Veränderung. In: *Gestaltung des Sozial-und Gesundheitswesens im Zeitalter von Digitalisierung und technischer Assistenz* Nomos Verlagsgesellschaft, 2017, S. 153–172
- [MHN<sup>+</sup>10] MUKAI, T. ; HIRANO, S. ; NAKASHIMA, H. ; KATO, Y. ; SAKAIDA, Y. ; GUO, S. ; HOSOE, S.: Development of a Nursing-Care Assistant Robot RIBA that can Lift a Human in its Arms. In: *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2010, S. 5996–6001
- [Mic21a] MICROSOFT: *Azure Kinect Developer Kit*. <https://azure.microsoft.com/en-in/services/kinect-dk/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Mic21b] MICROSOFT: *Azure Kinect Developer Kit - Requirements*. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/system-requirements>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Mic21c] MICROSOFT: *Azure Kinect Developer Kit Depth Camera*. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/depth-camera>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Mic21d] MICROSOFT: *Azure Kinect Developer Kit HW-Specification*. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/hardware-specification>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021

- [Mic21e] MICROSOFT: *Azure Kinect Developer Kit Multi-Camera-Sync*. <https://docs.microsoft.com/de-DE/azure/Kinect-dk/multi-camera-sync>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Mic21f] MICROSOFT: *Azure Kinect Developer Kit Use Image Transformation*. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/Kinect-dk/use-image-transformation>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Mic21g] MICROSOFT: *K4A GitHub Issue 816*. <https://github.com/microsoft/Azure-Kinect-Sensor-SDK/issues/816#issuecomment-583161328>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [MKS<sup>+</sup>13] MORALES, Y. ; KALLAKURI, N. ; SHINOZAWA, K. ; MIYASHITA, T. ; HAGITA, N.: Human-Comfortable Navigation for an Autonomous Robotic Wheelchair. In: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IEEE*, 2013, S. 2737–2743
- [MMd18] MARTINEZ-MARTIN, E. ; DEL POBIL, A. P.: Personal robot assistants for elderly care: an overview. In: COSTA, A. (Hrsg.) ; JULIAN, V. (Hrsg.) ; NOVAIS, P. (Hrsg.): *Personal Assistants: Emerging Computational Technologies*. Springer, 2018, S. 77–91
- [Mob15] MOBILE INDUSTRIAL ROBOTS: *Der MIR 100*. <https://www.mobile-industrial-robots.com/de/solutions/robots/mir100/>, 2015. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [MPG<sup>+</sup>15] MAVRIDIS, N. ; PIERRIS, G. ; GALLINA, P. ; MOUSTAKAS, N. ; ASTARAS, A.: Subjective Difficulty and Indicators of Performance of Joystick-Based Robot Arm Teleoperation with Auditory Feedback. In: *2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, IEEE, 2015, S. 91–98
- [MRM<sup>+</sup>10] MAESO, S. ; R., M. ; MAYOL, J. A. ; BLASCO, J. A. ; GUERRA, M. ; ANDRADAS, E. ; PLANA, M. N.: Efficacy of the Da Vinci Surgical System in Abdominal Surgery Compared with that of Laparoscopy: A Systematic Review and Meta-Analysis. In: *Annals of Surgery* 252 (2010), Nr. 2, S. 254–262
- [MS13] MOE, S. ; SCHJØLBERG, I.: Real-time Hand Guiding of Industrial Manipulator in 5 DOF using Microsoft Kinect and Accelerometer. In: *2013 IEEE RO-MAN*, IEEE, 2013, S. 644–649
- [MSHZ20] MA, Y. ; SHENG, B. ; HART, R. ; ZHANG, Y.: The Validity of a Dual Azure Kinect-based Motion Capture System for Gait Analysis: A preliminary Study. In: *2020 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, IEEE, 2020, S. 1201–1206

- [MSW17] MOHAMMED, A. ; SCHMIDT, B. ; WANG, L.: Active Collision Avoidance for Human–Robot Collaboration Driven by Vision Sensors. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 30 (2017), Nr. 9, S. 970–980
- [MV09] MARTINS, H. ; VENTURA, R.: Immersive 3-D Teleoperation of a Search and Rescue Robot using a Head-Mounted Display. In: *2009 IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation*, IEEE, 2009, S. 1–8
- [NCZ<sup>+</sup>17] NOCCARO, A. ; CORDELLA, F. ; ZOLLO, L. ; DI PINO, G. ; GUGLIEMELLI, E. ; FORMICA, D.: A Teleoperated Control Approach for Anthropomorphic Manipulator using Magneto-Inertial Sensors. In: *2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, IEEE, 2017, S. 156–161
- [NEK16] NOWOSSADECK, S. ; ENGSTLER, H. ; KLAUS, D.: Pflege und Unterstützung durch Angehörige. In: *Report Altersdaten 1* (2016), S. 1–23
- [NLL17] NIEHORSTER, D. C. ; LI, L. ; LAPPE, M.: The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. In: *i-Perception* 8 (2017), Nr. 3, S. 1–23
- [NMB21] NASCIMENTO, H. ; MUJICA, M. ; BENOUSSAAD, M.: Collision Avoidance Interaction Between Human and a Hidden Robot Based on Kinect and Robot Data Fusion. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 6 (2021), Nr. 1, S. 88–94
- [NPS<sup>+</sup>15] NAOTUNNA, I. ; PERERA, C. J. ; SANDARUWAN, C. ; GOPURA, R. A. ; LALITHARATNE, T. D.: Meal Assistance Robots: A Review on Current Status, Challenges and Future Directions. In: *2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, IEEE, 2015, S. 211–216
- [OMS<sup>+</sup>19] OPHASWONGSE, C. ; MURRAY, R. C. ; SANTAMARIA, V. ; WANG, Q. ; AGRAWAL, S. K.: Human Evaluation of Wheelchair Robot for Active Postural Support (WRAPS). In: *Robotica* 37 (2019), Nr. 12, S. 2132–2146
- [OZM<sup>+</sup>20] OPIYO, S. ; ZHOU, J. ; MWANGI, E. ; KAI, W. ; SUNUSI, I.: A Review on Teleoperation of Mobile Ground Robots: Architecture and Situation Awareness. In: *International Journal of Control, Automation and Systems* 19 (2020), S. 1384–1407
- [Pan15] PANASONIC: *Panasonic Autonomous Delivery Robots - HOSPI - Aid Hospital Operations at Changi General Hospital*. <https://news.panasonic.com/global/topics/2015/44009.html>, 2015. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021

- [PCM17] PAN, J. ; CHITTA, S. ; MANOCHA, D.: Probabilistic Collision Detection Between Noisy Point Clouds Using Robust Classification. In: SICILIANO, B. (Hrsg.) ; KHATIB, O. (Hrsg.): *Robotics Research : The 15th International Symposium ISRR*. Cham, Schweiz : Springer, 2017, Kapitel 2, S. 77–94
- [PGCB19] PIAZZA, C. ; GRIOLI, G. ; CATALANO, M.G. ; BICCHI, A.: A Century of Robotic Hands. In: *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 2 (2019), Nr. 1, S. 1–32
- [PJB16] PARK, S. ; JUNG, Y. ; BAE, J.: A Tele-Operation Interface with a Motion Capture System and a Haptic Glove. In: *2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, IEEE, 2016, S. 544–549
- [PK12] PIERCE, R. M. ; KUCHENBECKER, K. J.: A Data-Driven Method for Determining Natural Human-Robot Motion Mappings in Teleoperation. In: *2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, IEEE, 2012, S. 169–176
- [PKA18] PAPADOPOULOS, I. ; KOULOGLIOTI, C. ; ALI, S.: Views of Nurses and other Health and Social Care Workers on the Use of Assistive Humanoid and Animal-like Robots in Health and Social Care: A Scoping Review. In: *Contemporary Nurse* 54 (2018), Nr. 4-5, S. 425–442
- [PLK17] PERERA, C. J. ; LALITHARATNE, T. D. ; KIGUCHI, K.: EEG-Controlled Meal Assistance Robot with Camera-Based Automatic Mouth Position Tracking and Mouth Open Detection. In: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2017, S. 1760–1765
- [PMJT19] PU, L. ; MOYLE, W. ; JONES, C. ; TODOROVIC, M.: The Effectiveness of Social Robots for Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Studies. In: *The Gerontologist* 59 (2019), Nr. 1, S. 37–51
- [Poi21a] POINT CLOUD LIBRARY: *Point Cloud Library - Region Growing Algorithm*. [https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/region\\_growing\\_segmentation.html](https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/region_growing_segmentation.html), 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Poi21b] POINT CLOUD LIBRARY: *Point Cloud Library Iterative Closest Point Algorithm*. [https://pointclouds.org/documentation/classpcl\\_1\\_iterativeclosestpoint.html](https://pointclouds.org/documentation/classpcl_1_iterativeclosestpoint.html), 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [PPMT16] POPIĆ, S. ; PEZER, D. ; MRAZOVAC, B. ; TESLIĆ, N.: Performance evaluation of using Protocol Buffers in the Internet of Things communication. In: *2016 In-*



- ternational Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, IEEE, 2016, S. 261–265
- [PPTD20] PINO, O. ; PALESTRA, G. ; TREVINO, R. ; DE CAROLIS, B.: The Humanoid Robot NAO as Trainer in a Memory Program for Elderly People with Mild Cognitive Impairment. In: *International Journal of Social Robotics* 12 (2020), Nr. 1, S. 21–33
- [RC11] RUSU, R. B. ; COUSINS, S.: 3D is here: Point Cloud Library (PCL). In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2011, S. 1–4
- [RDT<sup>+</sup>14] RANASINGHE, R. ; DANTANARAYANA, L. ; TRAN, A. ; LIE, S. ; BEHRENS, M. ; LIU, L.: Smart hoist: An Assistive Robot to Aid Carers. In: *2014 13th International Conference on Control Automation Robotics Vision (ICARCV)*, IEEE, 2014, S. 1285–1291
- [Rea21] REALSENSE, Intel: *RealSense LiDAR*. <https://www.intelrealsense.com/lidar-camera-1515/#>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Ret21] RETHINK ROBOTICS: *Sawyer Black Edition Kollaborativer Roboter*. <https://www.rethinkrobotics.com/de/sawyer>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [RL01] RUSINKIEWICZ, S. ; LEVOY, M.: Efficient variants of the ICP algorithm. In: *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, IEEE, 2001, S. 145–152
- [RMP<sup>+</sup>16] RIZZON, L. ; MORO, F. ; PASSERONE, R. ; MACII, D. ; FONTANELLI, D. ; NAZEMZADEH, P. ; CORRÀ, M. ; PALOPOLI, Luigi ; PRATTICHIZZO, D.: c-Walker: A Cyber-Physical System for Ambient Assisted Living. In: DE GLORIA, A. (Hrsg.): *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society: APPLEPIES 2014*. Cham, Schweiz : Springer, 2016, Kapitel 10, S. 75–82
- [RMP20] ROTHGANG, H. ; MÜLLER, R. ; PREUSS, B. ; DIEKMANN, J. (Hrsg.) ; HOFFMANN, N. (Hrsg.) ; MARSCHALL, U. (Hrsg.) ; OSTERKAMP, N. (Hrsg.) ; WITTKOP, C. (Hrsg.): *Schriftenreihe zur Gesundheitsanalyse*. Bd. 26: *Barmer Pflegebericht 2020*. Berlin, Deutschland : Barmer, 2020
- [Rob21] ROBOTICS, SoftBank: *Pepper*. <https://www.softbankrobotics.com/us/pepper>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021

- [RSB15] RODEHUTSKORS, T. ; SCHWARZ, M. ; BEHNKE, S.: Intuitive Bimanual Telemanipulation under Communication Restrictions by Immersive 3D Visualization and Motion Tracking. In: *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, IEEE, 2015, S. 276–283
- [RT20] RANEV, D. ; TEIXEIRA, J.: History of Computer-Assisted Surgery. In: *Surgical Clinics of North America* 100 (2020), Nr. 2, S. 209–218
- [SBMN16] SCHAUER, J. ; BEDKOWSKI, J. ; MAJEK, K. ; NÜCHTER, A.: Performance Comparison between State-of-the-Art Point-Cloud based Collision Detection Approaches on the CPU and GPU. In: *IFAC-PapersOnLine* 49 (2016), Nr. 30, S. 54–59
- [Sch10] SCHOENFELD, B. J.: Squatting Kinematics and Kinetics and their Application to Exercise Performance. In: *The Journal of Strength & Conditioning Research* 24 (2010), Nr. 12, S. 3497–3506
- [Sch21] SCHMEDES, C.: Altenpflege in Deutschland. In: *Emotionsarbeit in der Pflege: Beitrag zur Diskussion über die psychische Gesundheit Pflegenden in der stationären Altenpflege*. Wiesbaden, Deutschland : Springer, 2021, Kapitel 4, S. 71–117
- [SCP+ 16] SHEN, X. ; CHONG, Z. J. ; PENDLETON, S. ; FU, G. M. J. ; QIN, B. ; FRAZZOLI, E. ; ANG, M. H.: Teleoperation of On-Road Vehicles via Immersive Telepresence Using Off-the-shelf Components. In: MENEGATTI, E. (Hrsg.) ; MICHAEL, N. (Hrsg.) ; BERNS, K. (Hrsg.) ; YAMAGUCHI, H. (Hrsg.): *Intelligent Autonomous Systems 13*, Springer, 2016, S. 1419–1433
- [SEC21] SECOM: *mySpoon*. <https://www.secom.co.jp/english/myspoon/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [SHJT16] SALAU, J. ; HAAS, J. H. ; JUNGE, W. ; THALLER, G.: Extrinsic calibration of a multi-Kinect camera scanning passage for measuring functional traits in dairy cows. In: *Biosystems Engineering* 151 (2016), S. 409–424
- [SHKZ17] STARKE, S. ; HENDRICH, N. ; KRUPKE, D. ; ZHANG, J.: Evolutionary Multi-objective Inverse Kinematics on Highly Articulated and Humanoid robots. In: *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2017, S. 6959–6966
- [Sim21] SIMULAIDS: *Rescue Randy*. <https://simulaids.co.uk/product/i-a-f-f-rescue-randy-with-additional-reinforcement-79kg/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021

- [SKL<sup>+</sup>20] SUN, D. ; KISELEV, A. ; LIAO, Q. ; STOYANOV, T. ; LOUTFI, A.: A New Mixed-Reality-Based Teleoperation System for Telepresence and Maneuverability Enhancement. In: *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 50 (2020), Nr. 1, S. 55–67
- [SKS14] SHIN, S. ; KIM, D. ; SEO, Y.: Controlling Mobile Robot Using IMU and EMG Sensor-Based Gesture Recognition. In: *2014 Ninth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*, IEEE, 2014, S. 554–557
- [SKS<sup>+</sup>19] STOTKO, P. ; KRUMPEN, S. ; SCHWARZ, M. ; LENZ, C. ; BEHNKE, S. ; KLEIN, R. ; WEINMANN, M.: A VR System for Immersive Teleoperation and Live Exploration with a Mobile Robot. In: *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2019, S. 3630–3637
- [SL16] SHAFAEI, A. ; LITTLE, J. J.: Real-Time Human Motion Capture with Multiple Depth Cameras. In: *2016 13th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, IEEE, 2016, S. 24–31
- [SLF<sup>+</sup>17] SASS, A. ; LANGE, C. ; FINGER, J. D. ; ALLEN, J. ; BORN, S. ; HOEBEL, J. ; KUHNERT, R. ; MÜTERS, S. ; THELEN, J. ; SCHMICH, P. ; VARGA, M. ; VON DER LIPPE, E. ; WETZSTEIN, M. ; ZIESE, T.: „Gesundheit in Deutschland aktuell“ – Neue Daten für Deutschland und Europa Hintergrund und Studienmethodik von GEDA 2014/2015-EHIS. In: *Journal of Health Monitoring* 2 (2017), Nr. 1, S. 1–8
- [SLG<sup>+</sup>17] SHUAI, L. ; LI, C. ; GUO, X. ; PRABHAKARAN, B. ; CHAI, J.: Motion Capture With Ellipsoidal Skeleton Using Multiple Depth Cameras. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 23 (2017), Nr. 2, S. 1085–1098
- [SMKL17] SCHIENKIEWITZ, A. ; MENSINK, G. ; KUHNERT, R. ; LANGE, C.: Übergewicht und Adipositas bei Erwachsenen in Deutschland. In: *Journal of Health Monitoring* 2 (2017), Nr. 2, S. 1–8
- [SMP<sup>+</sup>19] SCHNEIDER, M. ; MÜLLER, S. ; PRESCHER, T. ; BAUER, C. ; BRADL, P. ; PALZER, V. ; LOOSE, T. ; ZERTH, J.: Das Pflegepraxiszentrum Nürnberg, Technikbereitschaft und Technikakzeptanz als Bestandteil einer systematischen Untersuchung von Innovationsbarrieren von Technologien in der Pflege. In: *Assistive Technik für selbstbestimmtes Wohnen* 6 (2019), S. 135–140
- [SMV<sup>+</sup>13] SCHROETER, C. ; MUELLER, S. ; VOLKHARDT, M. ; EINHORN, E. ; HUIJNEN, C. ; VAN DEN HEUVEL, H. ; VAN BERLO, A. ; BLEY, A. ; GROSS, H.: Realization and User Evaluation of a Companion Robot for People with Mild

- Cognitive Impairments. In: *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2013, S. 1153–1159
- [Sof21] SOFTBANK ROBOTICS: *Softbank Robotics Homepage*. <https://www.softbankrobotics.com/emea/de/index>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [SOLK20] SOHN, J. H. ; OH, S. ; LEE, C. H. ; KIM, S. S.: Recursive Inverse Kinematics Analysis for Teaching Human Motion to a Humanoid Social Robot using a Depth Camera. In: *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, IEEE, 2020, S. 1151–1154
- [Spr18] SPRINGER: AriA: Robotik für die Altenpflege der Zukunft. In: *Heilberufe 70* (2018), S. 49–49
- [SRDB14] SAMADI, B. ; RAISON, M. ; DETREMBLEUR, C. ; BALLAZ, L.: Real-time Detection of Reaction Forces During Gait on a Ground Equipped with a Large Force Platform. In: *2014 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, IEEE, 2014, S. 1–3
- [SS19] SONNENBURG, A. ; SCHRÖDER, A.: *Pflegewirtschaft in Deutschland Entwicklung der Pflegebedürftigkeit und des Bedarfs an Pflegepersonal bis 2035*. Osna-brück, Deutschland : GWS, 2019
- [SSB10] SCHREIBER, G. ; STEMMER, A. ; BISCHOFF, R.: The Fast Research Interface for the Kuka Lightweight Robot. In: *IEEE Workshop on Innovative Robot Control Architectures for Demanding (Research) Applications How to Modify and Enhance Commercial Controllers (ICRA 2010)*, IEEE, 2010, S. 15–21
- [SSD<sup>+</sup>20] STIEFLER, S. ; SEIBERT, K. ; DOMHOFF, D. ; GÖRRES, S. ; WOLF-OSTERMANN, K. ; PESCHKE, D.: Einflussfaktoren für einen Heimeintritt bei bestehender Pflegebedürftigkeit–eine systematische Übersichtsarbeit. In: *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen* 153-154 (2020), S. 60–75
- [SSP<sup>+</sup>18] SHARMA, C. A. A. ; SAI VISHNU KUMAR, A. S. K. ; PRASAD, A. ; BEGUM, R. ; SHARVANI, G. S. ; MANJUNATH, A. E.: Multifaceted bio-medical applications of exoskeleton: A review. In: *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, IEEE, 2018, S. 11–15
- [Sta18] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS): *Sterbetafeln - Ergebnisse aus der laufenden Berechnung von Periodensterbetafeln für Deutschland und die Bundesländer 2015/2017*. Wiesbaden, Deutschland : Destatis, 2018 <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/>

- Bevoelkerung/Sterbefaelle-Lebenserwartung/  
Publikationen/Downloads-Sterbefaelle/  
periodensterbetafeln-bundeslaender-5126204177004.pdf?\_\_  
blob=publicationFile
- [Sta20] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS): *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit Bevölkerung mit Migrationshintergrund – Ergebnisse des Mikrozensus 2019*. Wiesbaden, Deutschland : Statistisches Bundesamt, 2020
- [Sta21a] STATISTA: *Arbeitslosenquote in Deutschland im Jahresdurchschnitt von 2005 bis 2021*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1224/umfrage/arbeitslosenquote-in-deutschland-seit-1995/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Sta21b] STATISTA: *Entwicklung der Lebenserwartung bei Geburt in Deutschland nach Geschlecht in den Jahren von 1950 bis 2060*. <https://bit.ly/3caQ08o>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Sta21c] STATISTA: *Mittelwerte von Körpergröße laut RKI*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/260920/umfrage/mittelwerte-von-groesse-gewicht-und-bmi-bei-maennern-nach-alter/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Sta21d] STATISTA: *Mittelwerte von Körpergröße laut RKI*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/260916/umfrage/mittelwerte-von-groesse-gewicht-und-bmi-bei-frauen-nach-alter/#:~:text=Durchschnittsgr%C3%B6%C3%9Fe%20und%20Gewicht%20von%20Frauen%20nach%20Alter&text=Die%20durchschnittliche%20K%C3%B6rpergr%C3%B6%C3%9Fe%20von%20Frauen,BMI%20von%2026%2C5%20Punkten.>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Sta21e] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS): *Wanderungen zwischen Deutschland und dem Ausland, Zugezogene, Fortgezogene und Saldo*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Wanderungen/Tabellen/wanderungen-alle.html>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [STT17] SAKURAI, H. ; TASAKI, R. ; TERASHIMA, K.: Medical Round Robot Tracking a Specified Person Based on Highly Accurate Position Estimation Considering Attitude Angle Compensation of Wearable Sensor. In: *2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, IEEE, 2017, S. 385–388

- [Swi16] SWIACZNY, F.: Demografischer Wandel und Migration in Deutschland. In: GENKOVA, P. (Hrsg.) ; RINGEISEN, T. (Hrsg.): *Handbuch Diversity Kompetenz: Band 1: Perspektiven und Anwendungsfelder*. Wiesbaden, Deutschland : Springer, 2016, Kapitel 2, S. 155–172
- [SYFD19] SU, H. ; YANG, C. ; FERRIGNO, G. ; DE MOMI, E.: Improved Human–Robot Collaborative Control of Redundant Robot for Teleoperated Minimally Invasive Surgery. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 4 (2019), Nr. 2, S. 1447–1453
- [TCN<sup>+</sup>17] TSAGARAKIS, N. G. ; CALDWELL, D. G. ; NEGRELLO, F. ; CHOI, W. ; BACCELLIERE, L. u. a.: Walk-Man: A High-Performance Humanoid Platform for Realistic Environments. In: *Journal of Field Robotics* 34 (2017), Nr. 7, S. 1225–1259
- [TDCH21] TÖLGYESSY, M. ; DEKAN, M. ; CHOVANEC, Ľ. ; HUBINSKÝ, P.: Evaluation of the Azure Kinect and Its Comparison to Kinect V1 and Kinect V2. In: *Sensors* 21 (2021), Nr. 2, S. 1–23
- [Thi88] THIEDE, R.: Die besondere Lage der älteren Pflegebedürftigen: Empirische Analysen und sozialpolitische Überlegungen auf der Basis aktuellen Datenmaterials. In: *Sozialer Fortschritt* 37 (1988), Nr. 11, S. 250–255
- [TKA<sup>+</sup>19] TABTI, N. ; KARDOFAKI, M. ; ALFAYAD, S. ; CHITOUR, Y. ; BEN OUEZDOU, F. ; DYCHUS, E.: A Brief Review of the Electronics, Control System Architecture, and Human Interface for Commercial Lower Limb Medical Exoskeletons Stabilized by Aid of Crutches. In: *2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, IEEE, 2019, S. 1–6
- [TL18] THEOBALD, H. ; LEIDIG, H. A.: *Study der Hans-Böckler-Stiftung*. Bd. 383: *Pflegearbeit in Deutschland, Japan und Schweden: Wie werden Pflegekräfte mit Migrationshintergrund und Männer in die Pflegearbeit einbezogen?* Düsseldorf, Deutschland : Hans-Böckler-Stiftung, 2018
- [Toy21] TOYOTA: *Toyota T-HR3*. <https://global.toyota/en/detail/19666346>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [TRE20] TESCH-RÖMER, C. ; ENGSTLER, H.: *Wohnsituation der Menschen ab 65 Jahren: mit Angehörigen, allein oder im Pflegeheim*. Berlin, Deutschland : DZA, 2020 (DZA-Fact Sheet)
- [tSH<sup>+</sup>17] TEN HARKEL, T. C. ; SPEKSNIJDER, C. M. ; HEIJDEN, F. van d. ; BEURSKENS, C. H. G. ; INGELS, K. J. A. O. ; MAAL, T. J. J.: Depth Accuracy of the RealSense F200: Low-Cost 4D Facial Imaging. In: *Scientific Reports* 7 (2017), S. 1–8

- [TTLJ19] TSITSIMPELIS, I. ; TAYLOR, C. J. ; LENNOX, B. ; JOYCE, M. J.: A Review of Ground-Based Robotic Systems for the Characterization of Nuclear Environments. In: *Progress in Nuclear Energy* 111 (2019), S. 109–124
- [TTT17] THINH, N. T. ; THANG, L. H. ; THANH, T. T.: Design Strategies to Improve Self-Feeding Device - FeedBot for Parkinson Patients. In: *2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, IEEE, 2017, S. 1–6
- [Uni21] UNIVERSAL ROBOTS (GERMANY): *Universal Robots Produkte*. <https://www.universal-robots.com/de/produkte/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Val21] VALVE COOPERATION: *SteamVR*. <https://www.steamvr.com/de/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [vBN<sup>+</sup>19] VAN DER PUTTE, D. ; BOUMANS, R. ; NEERINCX, M. ; RIKKERT, M. O. ; DE MUL, M.: A Social Robot for Autonomous Health Data Acquisition Among Hospitalized Patients: An Exploratory Field Study. In: *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, IEEE, 2019, S. 658–659
- [VCR<sup>+</sup>13] VITAL, J. P. M. ; COUCEIRO, M. S. ; RODRIGUES, N. M. M. ; FIGUEIREDO, C. M. ; FERREIRA, N. M. F.: Fostering the NAO Platform as an Elderly Care Robot. In: *2013 IEEE 2nd International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, IEEE, 2013, S. 1–5
- [VDI19] VDI: Ein Rollator mit Motor. In: *Pflegezeitschrift* 72 (2019), S. 60–61
- [VHI<sup>+</sup>20] VOGEL, J. ; HAGENGRUBER, A. ; ISKANDAR, M. ; QUERE, G. ; LEIPSCHER, U. ; BUSTAMANTE, S. ; DIETRICH, A. ; HÖPPNER, H. ; LEIDNER, D. ; ALBUSCHAFFER, A.: EDAN: An EMG-controlled Daily Assistant to Help People With Physical Disabilities. In: *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2020, S. 4813–4190
- [Vic21] VICON MOTION SYSTEMS LTD: *VICON Cameras*. <https://www.vicon.com/hardware/cameras/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [Vir21] VIRGA, Salvatore: *GitHub IFL-CAMP*. [https://github.com/IFL-CAMP/iiwa\\_stack/tree/master/iiwa\\_description/urdf](https://github.com/IFL-CAMP/iiwa_stack/tree/master/iiwa_description/urdf), 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [VJM<sup>+</sup>19] VINOJ, P. G. ; JACOB, S. ; MENON, V. G. ; RAJESH, S. ; KHOSRAVI, M. R.: Brain-Controlled Adaptive Lower Limb Exoskeleton for Rehabilitation of Post-Stroke Paralyzed. In: *IEEE Access* 7 (2019), S. 132628–132648

- [VORT05] VIDEMAN, T. ; OJAJÄRVI, A. ; RIIHIMÄKI, H. ; TROUP, J. D. G.: Low Back Pain Among Nurses: A Follow-Up Beginning at Entry to the Nursing School. In: *Spine* 30 (2005), Nr. 20, S. 2334–2341
- [WBL<sup>+</sup>19] WU, Y. ; BALATTI, P. ; LORENZINI, M. ; ZHAO, F. ; KIM, W. ; AJOUDANI, A.: A Teleoperation Interface for Loco-Manipulation Control of Mobile Collaborative Robotic Assistant. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 4 (2019), Nr. 4, S. 3593–3600
- [WEB15] WINCK, R. C. ; ELTON, M. ; BOOK, W. J.: A Practical Interface for Coordinated Position Control of an Excavator Arm. In: *Automation in Construction* 51 (2015), S. 46–58
- [WHM<sup>+</sup>14] WEISSERT-HORN, M. ; MEYER, M. D. ; JACOBS, M. ; STERN, H. ; RASKE, H. ; LANDAU, K.: Ergonomisch richtige Arbeitsweise beim Transfer von Schwerstpflegebedürftigen. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 68 (2014), Nr. 3, S. 175–184
- [Wil20] WILKE, C. B.: Demografischer Wandel in Deutschland–Hintergründe, Zukunftsszenarien und Arbeitsmarktpotenziale. In: L. REBEGGIANI, M. W. C. B. Wilke W. C. B. Wilke (Hrsg.): *Megatrends aus Sicht der Volkswirtschaftslehre*. Wiesbaden, Deutschland : Gabler, 2020, S. 3–24
- [Wir19] WIRTH, A.: Körperliche Komplikationen der Adipositas. In: ZWAAN, Martina de (Hrsg.) ; HERPERTZ, Stephan (Hrsg.) ; ZIPFEL, Stephan (Hrsg.): *Psychosoziale Aspekte der Adipositas-Chirurgie*. Berlin, Heidelberg, Deutschland : Springer, 2019, Kapitel 2, S. 9–28
- [WMZ17] WANG, H. ; MECHAM, R. ; ZHANG, B.: A Method Targeting Repair in Space: Tele-operating a Collaborative Robot with Virtual Reality. In: *2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, IEEE, 2017, S. 1068–1071
- [WRP<sup>+</sup>20] WHITNEY, D. ; ROSEN, E. ; PHILLIPS, E. ; KONIDARIS, G. ; TELLEX, S.: Comparing Robot Grasping Teleoperation Across Desktop and Virtual Reality with ROS Reality. In: AMATO, N. M. (Hrsg.) ; HAGER, G. (Hrsg.) ; THOMAS, S. (Hrsg.) ; TORRES-TORRITI, M. (Hrsg.): *Robotics Research*. Cham, Schweiz : Springer, 2020, S. 335–350
- [WSS<sup>+</sup>05] WADA, K. ; SHIBATA, T. ; SAITO, T. ; SAKAMOTO, K. ; TANIE, K.: Psychological and Social Effects of One Year Robot Assisted Activity on Elderly People at a Health Service Facility for the Aged. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2005, S. 2785–2790



- [WYC<sup>+</sup>19] WANG, Z. ; YU, B. ; CHEN, J. ; LIU, C. ; ZHAN, K. ; SUI, X. ; XUE, Y. ; LI, J.: Research on Lidar Point Cloud Segmentation and Collision Detection Algorithm. In: *2019 6th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, IEEE, 2019, S. 475–479
- [XKP<sup>+</sup>20] XIA, H. ; KWON, J. ; PATHAK, P. ; AHN, J. ; SHULL, P. B. ; PARK, Y. L.: Design of A Multi-Functional Soft Ankle Exoskeleton for Foot-Drop Prevention, Propulsion Assistance, and Inversion/Eversion Stabilization. In: *2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, IEEE, 2020, S. 118–123
- [YBZ20] YEHEZKEL, L. ; BERMAN, S. ; ZARROUK, D.: Overcoming Obstacles With a Reconfigurable Robot Using Reinforcement Learning. In: *IEEE Access* 8 (2020), S. 217541–217553
- [YON17] YEW, A. W. W. ; ONG, S. K. ; NEE, A. Y. C.: Immersive Augmented Reality Environment for the Teleoperation of Maintenance Robots. In: *Procedia CIRP* 61 (2017), S. 305–310
- [Yua21] YUANDA ROBOTICS: *Yuanda Yu Yu+ 5/100*. <https://www.yuanda-robotics.de/roboter/>, 2021. – Zuletzt zugegriffen am 17.03.2021
- [ZKS<sup>+</sup>20] ZÖLLICK, J. C. ; KUHLMEY, A. ; SUHR, R. ; EGGERT, S. ; NORDHEIM, J. ; BLÜHER, S.: Akzeptanz von Technikeinsatz in der Pflege. In: JACOBS, K. (Hrsg.) ; KUHLMEY, A. (Hrsg.) ; GRESS, S. (Hrsg.) ; KLAUBER, J. (Hrsg.) ; SCHWINGER, A. (Hrsg.): *Pflege-Report 2019: Mehr Personal in der Langzeitpflege - aber woher?* Berlin, Heidelberg, Deutschland : Springer, 2020, Kapitel 17, S. 211–218
- [ZLW<sup>+</sup>16] ZHAO, L. ; LIU, Y. ; WANG, K. ; LIANG, P. ; LI, R.: An Intuitive Human Robot Interface for Tele-Operation. In: *2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, IEEE, 2016, S. 454–459
- [ZSZ<sup>+</sup>17] ZEIAEE, A. ; SOLTANI-ZARRIN, R. ; LANGARI, R. ; TAFRESHI, R.: Design and Kinematic Analysis of a Novel Upper Limb Exoskeleton for Rehabilitation of Stroke Patients. In: *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)* IEEE, 2017, S. 759–764



# Anhang A

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Lebenserwartung ab Geburt in unterschiedlichen Geburtenzeiträumen für Männer und Frauen [Ges21b]. . . . .	6
2.2	Deutsche Bevölkerung in Millionen, eingeteilt in Altersgruppen nach der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung [Ges21a]. . . . .	7
2.3	Wanderungssaldo nichtdeutscher Menschen in den Jahren von 2011 bis 2019. Hinweis Destatis: „Die Ergebnisse ab dem Berichtsjahr 2016 sind aufgrund methodischer Änderungen und technischer Weiterentwicklungen nur bedingt mit den Vorjahreswerten vergleichbar. Die Genauigkeit der Ergebnisse des Berichtsjahres 2016 ist u. a. aufgrund von Unstimmigkeiten in Zusammenhang mit der melderechtlichen Behandlung von Schutzsuchenden eingeschränkt.“ [Sta21e]. . . . .	8
2.4	Pflegequote in Deutschland über alle Altersgruppen [Ges21c]. Hinweis: Durch die Einführung eines neuen Pflegebedürftigkeitsbegriffs können die Daten vor 2017 nur eingeschränkt mit den Daten von 2017 verglichen werden [Sch21, S. 71]. . . . .	10
2.5	Arbeitsunfähigkeitstage durch Rückenschmerzen je 100 Versicherungsjahre in den Jahren von 2016-2018 laut Barmer Pflegereport 2020 [RMP20, S. 188]. . . . .	14
4.1	Der Roboter <i>Pepper</i> beim Einsatz im Krankenhaus [vBN <sup>+</sup> 19] © 2019 IEEE. . . . .	29
4.2	Der Roboterrollstuhl <i>senä</i> . Ein kommerzieller Rollstuhl ist mit Sensorik und Aktorik ausgestattet, welche über einen Microcontroller mit einem Laptop kommunizieren [GGF06] © 2006 IEEE. . . . .	31
4.3	Der <i>Jaco</i> Roboterarm. Innerhalb einer Studie von Maheu et al., die der Evaluation zum Einsatz bei Rollstuhlfahrern dient, wird der Roboterarm gesteuert, um alltägliche Gegenstände zu greifen [MAFR11] © 2011 IEEE. . . . .	34

4.4	Das Gerät <i>Smart Hoist</i> , mit dem Patiententransfers für Pfleger erleichtert werden sollen. Der umfunktionierte Patientenlifter ist mit mehreren Sensoren und Aktoren ausgestattet. Die Griffe ermöglichen eine Steuerung des Geräts über Dehnungsmessstreifen (Front RGB-D Camera: Vordere Farb- und Tiefenbildkamera, Sling: Trage, Reverse Camera: Rückwärtskamera, Strain Gauges: Dehnungsmessstreifen, Tablet (UI): Tablet (Nutzerinterface), Batteries: Batterien, eStop: Notaus, Powered Wheels: Angetriebene Räder) [RDT <sup>+</sup> 14] © 2014 IEEE. . . . .	35
4.5	Der Roboter <i>RIBA</i> trägt einen Menschen in seinen Armen [MHN <sup>+</sup> 10] © 2010 IEEE.	37
4.6	Der Unterwasserroboter <i>Ocean One (a)</i> und die dazugehörige Steuerungskonsole <b>(b)</b> [KYB <sup>+</sup> 16] © 2016 IEEE. . . . .	42
4.7	Drei verschiedene Gesichter, aus je zwei verschiedenen Blickwinkeln, dargestellt als Punktwolken mit dem <i>LiveScan3D</i> -System von Kowalski et al. [KND15] © 2015 IEEE. . . . .	46
4.8	Ein teleoperierter Roboter, der zur Telemanipulation eingesetzt werden kann. <b>(a)</b> : Der Operator steuert den Roboter mithilfe eines HMDs und Controllern fern. <b>(b)</b> : Der gesteuerte Roboter [RSB15] © 2015 IEEE. . . . .	49
5.1	Vereinfachte Darstellung des ausgewählten Setups für die Roboterfernsteuerung. Ein am Pflegebett befindlicher Pfleger (rot) führt den Transfer eines Patienten (grün) gemeinsam mit einem ferngesteuerten Roboter (gelb) durch. Der Roboter wird direkt von einem Operator (orange) durch ein immersives Eingabeinterface, bestehend aus VR-Geräten (grau), gesteuert. Die Tiefenbildkameras (blau) erlauben ein visuelles Feedback. Steuerungssignale erreichen das Robotersystem vom Ort des Operators aus. Haptisches Feedback aus Kraftsensordaten des Robotersystems und visuelles Feedback aus den Kameras erreicht den Operator vom Ort des Pflegebetts aus. Zwischen beiden Orten ist ein Kommunikationskanal geöffnet, damit sich Pfleger (rot) und Operator (orange) austauschen können. . . . .	54
5.2	Die vier Roboter, deren Einsatz für den Anwendungsfall sinnvoll erscheint. <b>(a)</b> : Universal Robots <i>UR5e</i> © Universal Robotics (Germany) GmbH. Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Universal Robotics (Germany) GmbH. <b>(b)</b> : Kuka <i>LBR iiwa 7 R800</i> © Kuka AG. Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Kuka AG. <b>(c)</b> : Yuanda <i>Yu+5/100</i> © Yuanda Robotics GmbH. Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Yuanda Robotics GmbH. <b>(d)</b> : Franka Emika <i>Panda</i> . . . . .	57
5.3	Die ausgewählten Hauptkomponenten des Gesamtsystems in einer groben Geräteübersicht. Das Tiefenbildkamerasystem basiert auf den vier Tiefenbildkameras vom Typ K4A. Das Robotersystem wird durch zwei Roboterarme des Typs Kuka <i>LBR iiwa 7 R800 touch electrical</i> realisiert. In einem spezialisierten Netzwerk werden Daten mithilfe der Protokolle von <i>Robot Operating System</i> (ROS) und <i>Protocol Buffers</i> (ProtoBuf) ausgetauscht. Für die Fernsteuerung wird das VR-System HTC <i>Vive</i> eingesetzt und die Entwicklungsplattform <i>Unity 3D</i> wird zur Programmierung eingesetzt. . . . .	62

6.1	Die <i>Azure Kinect</i> (K4A) von verschiedenen Seiten ohne die mitgelieferte Abdeckung. Bei der Vorderseite (a) ist links am äußersten Rand die Farbkamera und rechts daneben die Tiefenkamera zu sehen. Seitlich (b) sind Fassungen für die Montage eingelassen. Die Anschlüsse sind in Abbildung (c) zu erkennen. Von links nach rechts im Bild sind diese SyncOut, Spannungsversorgung, USB-C und SyncIn. Auf der Oberseite der K4A sind die Mikrofone eingelassen. . . . .	64
6.2	Kombination der Datenstreams mit der Look-Up-Table (LUT) im Modus Near Field of View (NFOV) unbinned. Für die Erzeugung einer kolorierten dreidimensionalen Punktwolke wird das Tiefenbild mit der LUT verrechnet. Anschließend wird das gemappte Farbbild für die Kolorierung auf die dreidimensionalen Daten gelegt. . . . .	67
6.3	Die Positionierung der vier K4As im Pflegelabor der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Die Kameras sind 130 cm vom Mittelpunkt der Liegefläche entfernt, auf 180 cm Höhe und 52° geneigt. K4A0 ist die Master-K4A. . . . .	69
6.4	Die Netzwerktopologie hinsichtlich des gesamten Tiefenbildkamerasystems. K4A0 ist die Masterkamera, die bei der Synchronisation der Kameras als Master dient. . . . .	70
6.5	Die Koordinatensysteme der vier K4As im Raum. Die Kamera K4A0 bildet die Wurzel für die weiteren Kameras und ist einem Referenzkoordinatensystem (base_link_multikinects), welches sich auf dem Basiskoordinatensystem befindet, untergeordnet. . . . .	73
6.6	Der Ablauf der Registrierung. Die Styroporkugel muss zunächst in die Szene eingebracht werden. Nach der Eingabe des Aufnahmebefehls wird für jede einzelne <i>Azure Kinect</i> (K4A) ein Standbild der nächsten verfügbaren Punktwolke extrahiert und segmentiert. Sofern es weitere zu verarbeitende Punktwolken gibt, werden diese Schritte wiederholt. Anschließend wird in allen verarbeiteten Punktwolken nach der Kugel gesucht. Sollte diese in mindestens einer Punktwolke nicht auffindbar sein, muss die Prozedur nach Korrektur der Kugelposition erneut stattfinden. Sofern die Kugel in allen Punktwolken erkannt wird, werden diese Positionen abgespeichert und der Vorgang muss mit mindestens zwei weiteren Kugelpositionen erneut starten. Sobald mindestens drei Kugelpositionen verarbeitet wurden, kann die Registrierung berechnet werden. . . . .	74
6.7	Der K4A Streaming Client, ausgeführt auf jedem Kompaktcomputer. Nach dem Setzen der Parameter wird eine Verbindung zum Hauptcomputer hergestellt. Falls dies möglich ist, wird der Datenstrom initialisiert und die Protobuf-Objekte werden erstellt. Die von der K4A akquirierten Daten durchlaufen eine Vorverarbeitung, werden in die Protobuf-Objekte eingefügt und anschließend versendet. Dieser Vorgang wiederholt sich bis das Programm extern beendet wird. Das erste Datenpaket welches an den Hauptcomputer versendet wird, enthält zudem einmalig eine LUT, welche notwendig ist, um die Tiefenbilddaten in Positionen im Raum umzurechnen. . . . .	75

6.8	Die Start() Methode des Skripts der Serverentität. Hier wird die Registrierung geladen und auf die Punktwolkenobjekte angewendet. Danach werden Netzwerksockel erstellt und ein TCP-Listener-Thread gestartet, welcher auf eingehende Verbindungen von den Kompaktcomputern wartet. . . . .	78
6.9	Der TCP-Listener-Thread wartet auf Verbindungen der Kompaktcomputer und startet, sobald eine Verbindung vorliegt, einzelne Client-Threads. Diese Client-Threads werden parallel und unabhängig voneinander ausgeführt. . . . .	78
6.10	Der Client Thread liest die Streamdaten und konvertiert sie in ein Format, welches in Unity 3D lesbar ist und speichert diese in den Datencontainer <i>K4APointCloudData</i> . 79	79
6.11	Die Update() Methode überprüft zunächst, ob Einträge im Datencontainer <i>K4APointCloudData</i> existieren. Ein Eintrag beinhaltet jeweils die Farb- und Tiefenbilddaten einer K4A. Nach der Initialisierung des 3D-Meshes, welches als Grundgerüst für das Anzeigen der Daten verwendet wird, kann die Punktwolke mit den K4A-Daten aus dem Datencontainer dargestellt werden. . . . .	79
6.12	Das Verhalten unterschiedlicher Shader bei Punktwolken in vereinfachter Darstellung. In Abbildung <b>(a)</b> (Ausgangssituation) sind zwei unterschiedliche Objekte abgebildet, die sich nicht berühren. In Abbildung <b>(b)</b> sind diese Objekte als Punktwolkenrepräsentation dargestellt. Eine Zuordnung existiert nicht mehr. Durch einen herkömmlichen Shader werden in <b>(c)</b> Punkte der Punktwolke (möglicherweise falsch) verbunden und aufgrund der Farbinformation Objekte dargestellt, die in der Realität nicht existieren. Durch den Einsatz eines Shaders, der Scheiben auf den Positionen der Punkte erzeugt, können in Abbildung <b>(d)</b> die Objekte erahnt werden. 80	80
6.13	Die Punktwolkenrepräsentation der Puppe aus zwei unterschiedlichen Richtungen. In Abbildung <b>(a)</b> ist der Blickwinkel aus Sicht der Haupt-K4A dargestellt. In Abbildung <b>(b)</b> befindet sich der Blickpunkt direkt über der Puppe. . . . .	81
6.14	Die Reichweite des Kuka <i>LBR iiwa 7 R800 touch electrical</i> . In <b>(a)</b> ist die Seitenansicht abgebildet, in <b>(b)</b> die Ansicht aus der Vogelperspektive © Kuka. Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Kuka AG. . . . .	82
6.15	Die Roboterteile zwischen den Gelenken (Links). Im Einzelnen: <b>(a)</b> : Link 0, <b>(b)</b> : Link 1, <b>(c)</b> : Link 2, <b>(d)</b> : Link 3, <b>(e)</b> : Link 4, <b>(f)</b> : Link 5, <b>(g)</b> : Link 6, <b>(h)</b> : Link 7. Die Abbildung des Endeffektorflansches Link 7 entspricht in diesem Modell der Standardausführung des Roboters und nicht dem, in dieser Arbeit genutzten, Ausführung <i>touch electrical</i> . . . . .	82
6.16	Die zusätzliche Hardware, zum Betrieb eines Kuka <i>LBR iiwa 7 R800</i> . Das <i>Cabinet</i> <b>(a)</b> ist über zwei Anschlüsse mit dem Roboter und einem Anschluss mit dem <i>Smartpad</i> <b>(b)</b> verbunden. Über einen herkömmlichen Anschluss über Schutzkontaktsteckdose wird das <i>Cabinet</i> an das Stromnetz angeschlossen. . . . .	83
6.17	Die Zusammenschluss der Komponenten um den Roboter mit dem <i>Fast Robot Interface</i> (FRI) fernzusteuern. Von einem Computer aus werden Steuerungssignale an den Roboter über FRI an das <i>Cabinet</i> gesendet, welches mit dem Roboter verbunden ist. . . . .	85

6.18	Der positionsbasierte Impedanzcontroller. Eine Sollposition ist zu erreichen, wobei durch den Impedanzcontroller nach dem Feder-Masse-Dämpfer-System eine Kraft $F_{bef}$ berechnet wird. Diese wird intern in Drehmomente und somit in Gelenkänderungen umgewandelt [Die16, S. 17]. Der Roboter wird durch externe Kräfte $F_{ext}$ beeinflusst, was die Ist-Position beeinflusst und nach Verarbeitung im Impedanzcontroller somit zu einer Veränderung der Kraft $F_{bef}$ führt. . . . .	87
6.19	Der Sockel, der für jeweils einen Roboterarm genutzt wird. Durch einen Adapter wird der Sockel an die Aluminiumleiste des Bettes montiert. . . . .	87
6.20	Die Aluminiumschiene (a), die zur Montage der Robotersockel genutzt wird. Die Roboter sind am Pflegebett montiert (b) und schränken die Funktionen des Betts nicht ein. . . . .	88
6.21	Die Netzwerktopologie des Robotersystems am Pflegebett. Die beiden Kuka <i>LBR iiwa 7 R800</i> sind mit ihren zugehörigen <i>Cabinet</i> -Computern verbunden, welche Steuersignale über <i>Fast Robot Interface</i> erhalten. Die ROS-Computer wandeln Steuersignale aus dem ROS-Datenformat in Steuersignale für das <i>Fast Robot Interface</i> um. . . . .	89
6.22	Das Werkzeug, welches einer halb geöffneten menschlichen Hand nachempfunden ist (a). In Abbildung (b) wird das Werkzeug unter den Oberschenkel des Patientensimulators geschoben. . . . .	90
6.23	Das Werkzeug, welches einem Handballen nachempfunden ist (a). In Abbildung (b) drückt der Roboter unter Nutzung des Werkzeugs gemeinsam mit einer Person den Patientensimulator in den Sitz. . . . .	90
6.24	Der Ablauf des Programms auf dem <i>Cabinet</i> . Es kann zunächst zwischen Drehmomentbefehlsmodus oder Positionsbefehlsmodus ausgewählt werden. Anschließend kann die Steifheit der Gelenke eingestellt werden. Das Programm sendet daraufhin die eingehenden Befehle für die Gelenke zur internen Verarbeitung weiter und bleibt bis zur Beendigung in dieser Schleife. . . . .	92
6.25	Das HTC <i>Vive</i> -VR-System, welches in dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Es besteht aus den zwei Basistationen <i>Lighthouse</i> (1), dem HMD (2) und den beiden VR-Controllern (4). Zusätzlich werden die beiden VR-Tracker (3) eingesetzt. . . .	94
6.26	Die Positions- und Orientierungsbestimmung eines VR-Trackers auf Grundlage des emittierten Infrarotlasers in Seitenansicht. Der Winkel $\alpha$ beschreibt den Unterschied zwischen dem Normalvektor der Basistation <i>Lighthouse</i> . Dieser kann ermittelt werden, da der Infrarotlaser in einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit die Umgebung abtastet. Aus den Winkeln der einzelnen Fotodioden, die das Licht erfasst haben, und dem Normalvektor kann eine absolute Position des VR-Trackers ermittelt werden [BSC <sup>+</sup> 18] © 2018 IEEE. . . . .	95
6.27	Die Modelle innerhalb der virtuellen Umgebung. Die beiden Roboterarme und das Pflegebett sind als virtuelle Modelle in der Szene vorhanden. Es können, wie beim Pflegebett zu sehen, unterschiedliche Transparenzgrade eingestellt werden. Die Punktwolken sind in dieser Abbildung nicht dargestellt. . . . .	97

6.28	Der ausgedruckte Marker ist am Robotersockel installiert. Bewegungen des Betts beeinflussen die Position und Rotation des Markers. Dies kann mithilfe der K4A-Daten genutzt werden um eine Registrierung zwischen virtuellen Modellen und der Punktwolke zu erreichen. . . . .	98
6.29	Der Transformationsbaum hinsichtlich des virtuellen Markers und des Markers in der Punktwolke. Der gestrichelte Pfeil gibt an, dass die Berechnung der Transformation über das grundlegende Weltkoordinatensystem erfolgen muss. Die errechnete Transformation muss auf die Transformation von K4A0, der Wurzel des Multi-K4A-Systems, angewendet werden. . . . .	100
6.30	Die von Nocco et al. genutzte Konfiguration für das Mapping von Menschenarm auf Roboterarm (Kuka LWR 4+). Auf der linken Seite ist der Roboter mit dem Basis- und Endeffektorkoordinatensystem abgebildet. Auf der rechten Seite ist ein Mensch dargestellt, der Inertialsensorik trägt. Das Koordinatensystem $P_{shoulder}$ korrespondiert demnach mit dem Basiskoordinatensystem des Roboters und $P_{hand}$ mit dem Endeffektorkoordinatensystem des Roboters [NCZ <sup>+</sup> 17] © 2017 IEEE. . . . .	101
6.31	Das Mapping von Menschenarm auf Roboter. Der Endeffektor wird auf eine 5 cm nach vorne verlagerte Position vor dem Controller gemappt. Gleichzeitig wird die Mitte des unbeweglichen Teils (Link 5) zwischen vorletztem Gelenk und dem davor durch einen Tracker auf der Oberseite des Unterarms abgebildet. . . . .	102
6.32	Das Robotermodell neben den Controllermodellen. An der Vorderseite des VR-Controller-Modells ist in einem Abstand von 5 cm ein transparentes Modell des Endeffektors angehängt. Der VR-Tracker ist komplett durch das transparente Modell des Roboterteils Link 5 ersetzt. Das Robotermodell folgt diesen beiden Modellen. . . . .	103
6.33	Unterschiedliche Gelenkpositionen führen zu gleichem Ergebnis, sofern das Mapping nur in der Nähe des Endeffektors stattfindet. Das Ergebnis der Ausrichtung des Roboterarms, hinsichtlich der Position von Link 5 und des Endeffektors, ist in (a) und (b) nahezu identisch. Die Gelenkpositionen unterscheiden sich jedoch für die Gelenke, die nah an der Roboterbasis sind, erheblich. Dies kann an der Position des orangefarbenen Gelenks gesehen werden. . . . .	103
6.34	Die Zustände des Systems während der Nutzung. Zunächst befindet sich das System in Bereitschaft, wobei bereits alle Kommunikations- und Feedbackkanäle hergestellt sind. Eine Roboterbewegung wird erst durch das Drücken und Halten des Totmanschalters möglich, wobei das System in den Zustand Teleoperation wechselt. Durch eine Sicherheitsabschaltung, beispielsweise durch einen Nothalt, wird ein Fehlerzustand eingenommen, der einen Neustart erfordert. Innerhalb aller Zustände kann die Registrierung zwischen Punktwolkenrepräsentation und virtuellen Modellen vorgenommen werden. . . . .	108
6.35	Das Gesamtsystem im Einsatz. Der Operator (links) steuert das Robotersystem über das VR-System fern. Die Sicht des Operators zum aufgenommenen Zeitpunkt ist in der Mitte dargestellt. Die Roboterarme sind am Pflegebett montiert. . . . .	109



6.36	Der Aufbau des Gesamtsystems in der vollständigen Darstellung. Ein am Pflegebett befindlicher Pfleger (rot) führt den Transfer eines Patienten (grün) gemeinsam mit den ferngesteuerten Kuka-Robotern und der nötigen Roboterhardware (gelb) durch. Die direkte Steuerung durch den Operator (orange) durch ein immersives Eingabeinterface, findet mithilfe der VR-Geräte (grau) statt. Die Tiefenbildkameras des Typs <i>Azure Kinect</i> (K4A) (blau) erlauben mithilfe der Kompaktcomputer eine Übertragung zum Hauptcomputer. Dieser verarbeitet und empfängt alle Feedback- und Steuerungsdaten. . . . .	110
6.37	Die Komponenten im Gesamtsystem. Am Ort des Pflegebetts befinden sich sowohl die <i>Azure Kinect</i> (K4A) Tiefenkameras als auch die beiden Roboter Kuka <i>LBR iiwa 7 R800</i> . Diese sind mit der beschriebenen Hardware verknüpft. Der Austausch von visuellem Feedback findet über die Schnittstelle ProtoBuf statt. Die Steuerungssignale für die Roboter sowie die Feedbackdaten, hinsichtlich der aufgewendeten Kraft, werden über Nachrichten des <i>Robot Operating System</i> (ROS) versendet. Über das HTC <i>Vive</i> -Virtual-Reality (VR)-System kann der Operator die Roboter steuern und dabei das Feedback empfangen. Die Programmierschnittstelle zwischen Hauptcomputer und HTC <i>Vive</i> ist <i>SteamVR</i> . . . . .	111
6.38	Die Koordinatensysteme des Gesamtsystems im Überblick. Als Wurzel ist der Ursprung von <i>Unity 3D</i> gewählt. Durch das Tiefenbildkamerasystem, der Position des Markers in der Punktwolke und der Position des virtuellen Markers können virtuelle Robotermodelle und die Roboter aus der Punktwolkenrepräsentation überlagert werden. Die Steuerung mittels des VR-Systems erfolgt ebenfalls über mehrere Koordinatensysteme der einzelnen Geräte. . . . .	112
7.1	Das typische Rauschen der Tiefenbildwerte bei der Betrachtung einer Fläche in 800 mm Entfernung im Vergleich der Tiefenbildkameras <i>Kinect v1</i> ( <b>a</b> ), <i>Kinect v2</i> ( <b>b</b> ) und <i>Azure Kinect</i> (K4A) ( <b>c</b> ) nach Tölgyessy et al. Bei der K4A ist der Tiefenbildmodus NFOV binned gewählt. In allen Bildern sind Werte über 2 mm auf 2 mm reduziert. Die Achsen repräsentieren die Pixelpositionen. Es ist deutlich erkennbar, dass das Rauschverhalten bei der K4A besser ist als bei den Vorgängerversionen [TDCH21] © 4.0. . . . .	114
7.2	Die 30 Messpunkte, an denen die Styroporkugel zur Messung der Güte der Registrierung herangezogen wird. Auf der linken Seite ( <b>a</b> ), ist das Bett vom Kopfende aus betrachtet. Die Ebenen in Z-Richtung sind auf den Höhen 75 cm (0), 100 cm (1) und 125 cm (2). In der Vogelperspektive ( <b>b</b> ) ist die Einteilung in X-Richtung bei 35 cm (0), 70 cm (1), 105 cm (2), 140 cm (3) und 175 cm (4) gewählt. In Y-Richtung befinden sich die Messpunkte bei 30 cm (0) und 60 cm (1). . . . .	117

7.3	Der Prozentsatz an Punkten die der Kugel zugehörig sind und unter 1 cm Abstand zur Einheitskugel aufweisen, für Ebene Z0 <b>(a)</b> , Ebene Z1 <b>(b)</b> und Ebene Z3 <b>(c)</b> . Im Durchschnitt beträgt der Wert Z0=96,42 % bei einer Standardabweichung von 0,81 %, Z1=97,73 % bei einer Standardabweichung von 1,48 % und Z2=97,12 % bei einer Standardabweichung von 1,88 % . . . . .	119
7.4	Das Schieben des Patientensimulators durch einen Roboterarm. In <b>(a)</b> ist die Ausgangslage dargestellt. Der Roboterarm berührt den Patientensimulator nur leicht. Durch das Aufwenden einer Kraft in dem Gelenk, welches der Roboterbasis am nächsten ist, kann der Patientensimulator auf dem Bett verschoben werden. Die Verschiebung ist auf Abbildung <b>(b)</b> dargestellt. Das Gelenk erreicht dabei Drehmomente von bis zu 80 Nm. . . . .	122
7.5	Die Latenzmessung zur Bestimmung der Verzögerungen in der Punktwolkendarstellung. In der Ausgangssituation des Experiments <b>(a)</b> wird die Tasse noch nicht angeleuchtet. In <b>(b)</b> wird die Tasse zum Zeitpunkt 19:59:530 erhellt, die Punktwolke zeigt jedoch keine Änderung. Sowohl die Tasse als auch ihre Punktwolkenrepräsentation sind erst in Abbildung <b>(c)</b> zum Zeitpunkt 19:59:659 erhellt. Eine Latenz von 129 ms ist gegeben. . . . .	126
7.6	Der Latenztests für die Messung der Verzögerung von Steuerungsbefehleingabe und Roboterbewegung. Die Ausgangsposition von Operatorarm und Roboterarm sind mit einer roten Linie gekennzeichnet. Eine Veränderung dieser Position ist mit einer grünen Linie dargestellt. Zum Zeitpunkt in <b>(a)</b> haben sich weder Operatorarm noch Roboter bewegt. In Abbildung <b>(b)</b> hat sich der Arm des Operators bereits nach oben bewegt, der Roboterarm verharrt jedoch auf seiner Position (Zeit 1:33:569). In <b>(c)</b> startet die Roboterbewegung, die von der Armbewegung des Roboters abgeleitet wird (Zeit: 1:33:612). Demnach ist eine Verzögerung von 43 ms gegeben. . . . .	128
7.7	Der Studienablauf für die Probanden. Zunächst werden Mobilitätsassessments durchgeführt. Die Puppe wird in zwei unterschiedlichen Varianten transferiert. Anschließend findet der robotergestützte Transfer unter Nutzung des Systems aus dieser Arbeit statt. Abschließend wird ein weiterer, für diese Arbeit nicht relevanter, Test mit einer automatischen Robotersteuerung durchgeführt. . . . .	131
7.8	Die drei relevanten Durchführungen des simulierten Patiententransfers. In <b>(a)</b> ist eine herkömmliche Herangehensweise für den Transfer abgebildet (Variante 1). In Abbildung <b>(b)</b> wird ein ergonomisch vorteilhafter Transfer dargestellt (Variante 2). In <b>(c)</b> wird der Transfer mithilfe des Roboterarms durchgeführt (Variante 3). . . . .	132
7.9	Die eingesetzte Kraftmessplatte. Sie ist zusätzlich mit einem Raster versehen. Die Richtungen der Kräfte sind am Rand dargestellt. Die Kraft $F_z$ zeigt senkrecht in Richtung Boden. . . . .	134
7.10	Die Elektroden am Körper eines Probanden, die zur Messung des SEMG-Signals der betreffenden Muskeln benötigt werden © Anna Brinkmann. Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Anna Brinkmann. . . . .	135

7.11	Die Daten der Kraftmessplatte für den herkömmlichen Transfer beim Proband 626. Die roten Punkte zeigen die Peaks an, die mit einem auf Nachbarschaftsbetrachtung basierenden Peakfinder gefunden werden. Der maximale Ausschlag beträgt 1088 N bei 12 Sekunden und 452 Millisekunden. Die Daten des Transfers sind in Phasen eingeteilt. . . . .	139
7.12	Die Daten der Kraftmessplatte für den robotergestützten Transfer beim Proband 626. Der Peakfinder findet keine Peaks. Die Kraft $F_z$ bleibt unterhalb der erwarteten Gewichtskraft. . . . .	139
7.13	Das SEMG-Signal für verschiedene Muskeln im herkömmlichen Transfer bei Proband 626. Der Transfer ist in Phasen eingeteilt. VM: Vastus Medialis, RF: Rectus Femoris, BF: Biceps Femoris, GM: Gluteus Maximus, ES <sub>l</sub> : Erector Spinae links, ES <sub>r</sub> : Erector Spinae rechts. . . . .	142
7.14	Das SEMG-Signal für verschiedene Muskeln im robotergestützten Transfer bei Proband 626. Der Transfer ist in Phasen eingeteilt. VM: Vastus Medialis, RF: Rectus Femoris, BF: Biceps Femoris, GM: Gluteus Maximus, ES <sub>l</sub> : Erector Spinae links, ES <sub>r</sub> : Erector Spinae rechts. . . . .	142
7.15	Der simulierte Patiententransfer aus der Studie mit beiden Roboterarmen. In <b>(a)</b> beginnt der Transfer, wobei nun auch der zweite Roboter mit dem Werkzeug am Oberschenkel des Patientensimulators eine Unterstützung bietet. Der Transfer wird gemeinsam durchgeführt. In <b>(b)</b> ist die Seitenlage des Patientensimulators erreicht.	145
7.16	Ein Roboterarm stellt das Bein des Patientensimulators auf und fixiert dieses. Somit hat die Person am Pflegebett beide Hände frei und braucht das Bein nicht selbst zu stabilisieren. . . . .	146
7.17	Ein ferngesteuerter Roboterarm des Gesamtsystems unterstützt bei der simulierten Mobilisierung der Beine des Patientensimulators. . . . .	147
7.18	Eine Pappkiste wird eingeklemmt und angehoben. Neben den Werkzeugen können auch andere Teile des Roboters genutzt werden um Objekte zu berühren oder zu bewegen. . . . .	148
C.1	Krafdaten von Proband 409 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor. . .	207
C.2	Krafdaten von Proband 409 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor. . .	208
C.3	Krafdaten von Proband 418 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor. . .	209
C.4	Krafdaten von Proband 418 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor. . .	210
C.5	Krafdaten von Proband 449 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor. . .	211
C.6	Krafdaten von Proband 449 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor. . .	212
C.7	Krafdaten von Proband 524 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor. . .	213
C.8	Krafdaten von Proband 524 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor. . .	214
C.9	Krafdaten von Proband 534 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor. . .	215
C.10	Krafdaten von Proband 534 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor. . .	216
C.11	Krafdaten von Proband 549 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor. . .	217
C.12	Krafdaten von Proband 549 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor. . .	218

---

C.13	Krafdaten von Proband 626 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor. . .	219
C.14	Krafdaten von Proband 626 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor. . .	220
C.15	Krafdaten von Proband 627 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor. . .	221
C.16	Krafdaten von Proband 627 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor. . .	222
C.17	Krafdaten von Proband 708 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor. . .	223
C.18	Krafdaten von Proband 708 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor. . .	224
C.19	SEMG-Daten von Proband 409 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.	225
C.20	SEMG-Daten von Proband 409 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.	226
C.21	SEMG-Daten von Proband 418 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.	227
C.22	SEMG-Daten von Proband 418 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.	228
C.23	SEMG-Daten von Proband 449 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.	229
C.24	SEMG-Daten von Proband 449 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.	230
C.25	SEMG-Daten von Proband 524 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.	231
C.26	SEMG-Daten von Proband 524 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.	232
C.27	SEMG-Daten von Proband 534 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.	233
C.28	SEMG-Daten von Proband 534 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.	234
C.29	SEMG-Daten von Proband 549 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.	235
C.30	SEMG-Daten von Proband 549 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.	236
C.31	SEMG-Daten von Proband 626 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.	237
C.32	SEMG-Daten von Proband 626 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.	238
C.33	SEMG-Daten von Proband 627 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.	239
C.34	SEMG-Daten von Proband 627 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.	240
C.35	SEMG-Daten von Proband 708 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.	241
C.36	SEMG-Daten von Proband 708 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.	242

## **Anhang B**

# **Messung der Güte der Registrierung**

## Messung der Güte der Registrierung

### Height 0

	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>0</b>	96,6039%	96,4054%	95,7324%	97,7846%	97,4983%
<b>1</b>	96,3681%	96,1619%	96,6249%	94,7275%	96,3271%

Mittelwert	Standardabw	Gesamt MW
96,4234%	0,81%	

### Height 1

	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>0</b>	98,6770%	95,9946%	96,1391%	98,6997%	99,5112%
<b>1</b>	98,2014%	97,0053%	95,0517%	99,0405%	99,0029%

97,7323%	1,48%	97,0919%
----------	-------	----------

### Height 2

	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>0</b>	97,4014%	96,4290%	94,0845%	97,2409%	99,7145%
<b>1</b>	98,8184%	95,3346%	94,7305%	97,7179%	99,7273%

97,1199%	1,88%	
----------	-------	--

# **Anhang C**

## **Studiendaten**

### **C.1 Tabelle**





prf= robotergestützter Transfer

429 409prf		418pr2				635 418prf2				449pr		875 449prf				524pr																																																																																																																																																																																																																																														
	21800		20170		10970				6800		8450				6830			12400		22170		9750				3750		4000				3830			-9400		2000		-1220				-3050		-4450				-3000			29.400	41400	13600	15400	18750	26750			10600	13000	18000	27000		7500	9000			41400	44400	15400	18900	26750	33750			13000	17500	27000	32000		9000	12300			44400	52400	18900	20600	33750	43750			17500	19000	32000	38000		12300	13850		PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull					698		674	752			960		890	935		900	676					709			714			985		900	910		928						690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>				
	12400		22170		9750				3750		4000				3830			-9400		2000		-1220				-3050		-4450				-3000			29.400	41400	13600	15400	18750	26750			10600	13000	18000	27000		7500	9000			41400	44400	15400	18900	26750	33750			13000	17500	27000	32000		9000	12300			44400	52400	18900	20600	33750	43750			17500	19000	32000	38000		12300	13850		PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull					698		674	752			960		890	935		900	676					709			714			985		900	910		928						690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																					
	-9400		2000		-1220				-3050		-4450				-3000			29.400	41400	13600	15400	18750	26750			10600	13000	18000	27000		7500	9000			41400	44400	15400	18900	26750	33750			13000	17500	27000	32000		9000	12300			44400	52400	18900	20600	33750	43750			17500	19000	32000	38000		12300	13850		PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull					698		674	752			960		890	935		900	676					709			714			985		900	910		928						690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																						
	29.400	41400	13600	15400	18750	26750			10600	13000	18000	27000		7500	9000			41400	44400	15400	18900	26750	33750			13000	17500	27000	32000		9000	12300			44400	52400	18900	20600	33750	43750			17500	19000	32000	38000		12300	13850		PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull					698		674	752			960		890	935		900	676					709			714			985		900	910		928						690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																							
	41400	44400	15400	18900	26750	33750			13000	17500	27000	32000		9000	12300			44400	52400	18900	20600	33750	43750			17500	19000	32000	38000		12300	13850		PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull					698		674	752			960		890	935		900	676					709			714			985		900	910		928						690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																								
	44400	52400	18900	20600	33750	43750			17500	19000	32000	38000		12300	13850		PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull					698		674	752			960		890	935		900	676					709			714			985		900	910		928						690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																									
PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull					698		674	752			960		890	935		900	676					709			714			985		900	910		928						690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																																										
			698		674	752			960		890	935		900	676					709			714			985		900	910		928						690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																																																											
			709			714			985		900	910		928						690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																																																																												
			690			794			956		895	971		918						688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																																																																																													
			688			731			946		917									665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																																																																																																														
			665						911		915									674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																																																																																																																															
			674						909		915									655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																																																																																																																																																
			655						891		900						<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																																																																																																																																																																	
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>709</b>	<b>674</b>	<b>794</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>985</b>	<b>917</b>	<b>971</b>	<b>928</b>	<b>676</b>																																																																																																																																																																																																																																																		

push	pull	lateral	push	pull	lateral	push	pull	lateral	push	pull	lateral	push	pull	lateral	push	pull	lateral																																																						
404,8944	425,6028	399,1379	425,4956	686,5971	657,7337	639,6931	659,1402	629,5052	639,6919	897,701	874,8158	891,0466	851,5195	864,4769	871,2034	640,9567	564,8254	100	100,0936137	99,8944088	105,0880427	100	100	100	96,00101719	95,70821747	99,99981241	100	100	100	94,85558109	98,81816263	97,77304576	100	100		-3,3972			51,5971			24,1402			22,701			-23,4805			20,9567			<b>-0,39805</b>						<b>27,4569</b>						<b>46,1815</b>				
100	100,0936137	99,8944088	105,0880427	100	100	100	96,00101719	95,70821747	99,99981241	100	100	100	94,85558109	98,81816263	97,77304576	100	100		-3,3972			51,5971			24,1402			22,701			-23,4805			20,9567			<b>-0,39805</b>						<b>27,4569</b>						<b>46,1815</b>																						
	-3,3972			51,5971			24,1402			22,701			-23,4805			20,9567			<b>-0,39805</b>						<b>27,4569</b>						<b>46,1815</b>																																								
	<b>-0,39805</b>						<b>27,4569</b>						<b>46,1815</b>																																																										

0.08997902501105819	0.408625263959525	0.20624872496674262	0.14326405559388977	0.12311886254865555	0.33708837708890826
0.3746254926155172	0.3084935953863995	0.19771980218450752	0.15349001029106987	0.2317367909879227	0.15859432031451415
0.061971548505643084	0.24821078793107232	0.17539134180695254	0.12008554141189222	0.07889278756135319	0.14223153449072423
0.04184733506697771	0.09357587566735094	0.09561087352992469	0.10832582815710642	0.08114027326032028	0.13772380581863333
0.4297144898948683	0.47750790345252686	0.3168034997869221	0.13675753441949065	0.14837834846573306	0.32805867394396127
0.33233042175939964	0.238364457896836	0.2018596484962289	0.30156517879373457	0.4252665365752965	0.6356747278958528
0,08997902501105819	-0,01048 0,408625263959525	0,20624872496674262	-0,20238 0,14326405559388977	0,12311886254865555	-0,02015 0,33708837708890826
0,3746254926155172	-0,08638 0,3084935953863995	0,19771980218450752	-0,11077 0,15349001029106987	0,2317367909879227	0,07825 0,15859432031451415
0,061971548505643084	-0,51609 0,24821078793107232	0,17539134180695254	-0,07282 0,12008554141189222	0,07889278756135319	-0,04119 0,14223153449072423
0,04184733506697771	-0,28035 0,09357587566735094	0,09561087352992469	0,00203 0,10832582815710642	0,08114027326032028	-0,02719 0,13772380581863333
<b>0,4297144898948683</b>	<b>-0,14793 0,47750790345252686</b>	<b>0,3168034997869221</b>	<b>-0,16070 0,13675753441949065</b>	<b>0,14837834846573306</b>	<b>0,01162 0,32805867394396127</b>
<b>0,33233042175939964</b>	<b>-0,09361 0,238364457896836</b>	<b>0,2018596484962289</b>	<b>-0,03650 0,30156517879373457</b>	<b>0,4252665365752965</b>	<b>0,12370 0,6356747278958528</b>
	-0,18914		-0,09686		0,02084
	89,57		50,47		85,94
	81,26		64,09		150,98
	10,72		70,66		65,70
	12,99		102,17		74,90
	74,39		66,35		108,50
	78,02		84,69		141,02

620 524prf		534pr		530 534prf2		549pr		880 549prf		627pr	
17780		8350		35580		6200		53120		28200	
3150		4060		3830		3800		49640		26400	
-14630		-4290		-31750		-2400		-3480		-1800	
13150	18150	12500	15300	17.380	22830	9.830	11.830	21650	28650	9550	13550
18150	23150	15300	20000	22380	30830	11.830	13.830	28650	34650	13550	21550
23150	30150	20000	21000	30830	38830	13.830	16.830	34650	43650	21550	22550

PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull	PeaksPush	PeaksPull
		597		605		938		902		1114	
		563		593		945		910		1101	
		571				924				1068	
		549								1035	
		592									
		675									
		564									
0	0	0	675	0	605	0	945	942	910	0	1114

push	pull	lateral	push	pull	lateral	push	pull	lateral	push	pull	lateral	push	pull	lateral	push	pull	lateral
614,59023	555,0625	582,8983	627,8323	544,23787	518,1557	509,4533	506,2093	534,7368	543,8386	894,40282	857,2598	896,7121	856,4269	863,7273	877,29602	971,41803	971,7071
100	86,59906356	103,1997322	102,1546177	100	100	100	93,0125094	103,2000227	106,7494508	100	100	100	95,75404738	100,7544387	97,83474763	100	100
	-64,9375			14,23787			-23,7907			14,40282			-23,5731			11,41803	
	85,8942						38,02857						37,97592				

0.8252206983397206	0.06331875080376967	0.08298269484970258	0.24288500215409192	0.04425927381835293	0.09838099548671038
0.22497552655221953	0.11921998748242735	0.128057327446709	1	0.41502494252771077	1
0.15941535406721943	0.06622899885212127	0.0736036682591201	0.06214123731886169	0.12489009577589276	0.3258185362387941
0.2129501266170536	0.11193884002233667	0.09756742998351592	0.06084683792569471	0.10084959771609772	0.12179856883478973
0.2739610215670203	0.20200146073317998	0.25262435072483175	0.47201724727245825	0.14503459381210032	0.7501385557976289
1	0.1450521411595795	0.20602380424555117	0.33898560489062934	0.19104367962854338	0.5174674032107187
0.8252206983397206	0,48813 0,06331875080376967	0,08298269484970258	0,01966 0,24288500215409192	0,04425927381835293	-0,19863 0,09838099548671038
0,22497552655221953	0,06638 0,11921998748242735	0,128057327446709	0,00884 1,10810	0,41502494252771077	-0,69308 1,29980
0,15941535406721943	0,01718 0,06622899885212127	0,0736036682591201	0,00737 0,06214123731886169	0,12489009577589276	0,06275 0,3258185362387941
0,2129501266170536	0,07523 0,11193884002233667	0,09756742998351592	-0,01437 0,06084683792569471	0,10084959771609772	0,04000 0,12179856883478973
<b>0,2739610215670203</b>	<b>0,20200146073317998</b>	<b>0,25262435072483175</b>	<b>0,47201724727245825</b>	<b>0,14503459381210032</b>	<b>-0,32698 0,7501385557976289</b>
<b>1,06351</b>	<b>0,42784 0,1450521411595795</b>	<b>0,20602380424555117</b>	<b>0,06097 0,33898560489062934</b>	<b>0,19104367962854338</b>	<b>-0,14794 0,5174674032107187</b>
	0,17011		0,02218		-0,21065
	244,81		131,06		18,22
	141,86		107,41		37,45
	112,08		111,14		200,98
	154,62		87,16		165,74
	83,51		125,06		30,73
	167,30		142,03		56,36



615 2prf2

52000 62000  
62000 64000  
64000 68000

PeaksPush PeaksPull PeaksPush

CHTIGT!

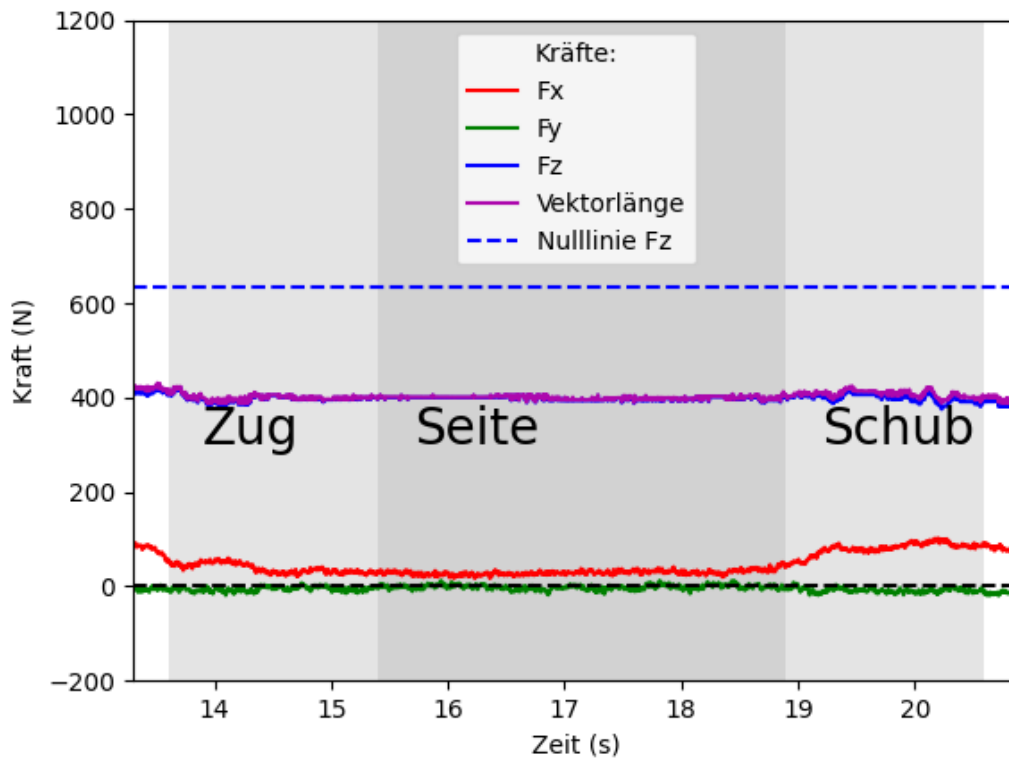
0 0 0

push	pull	lateral	push
657,9796	640,0306	640,8592	638,6735
100	103,6949609	109,0559837	97,06585128

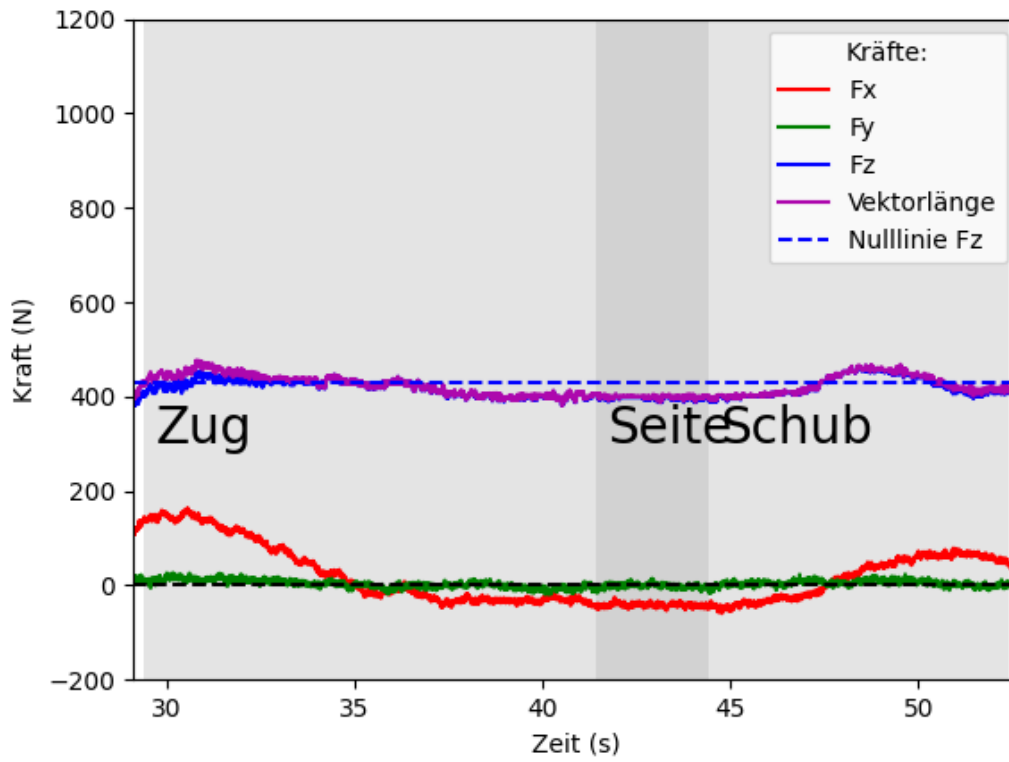


## C.2 Diagramme

### C.2.1 Kraftdaten



**Abbildung C.1:** Kraftdaten von Proband 409 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.2:** Krafdaten von Proband 409 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.

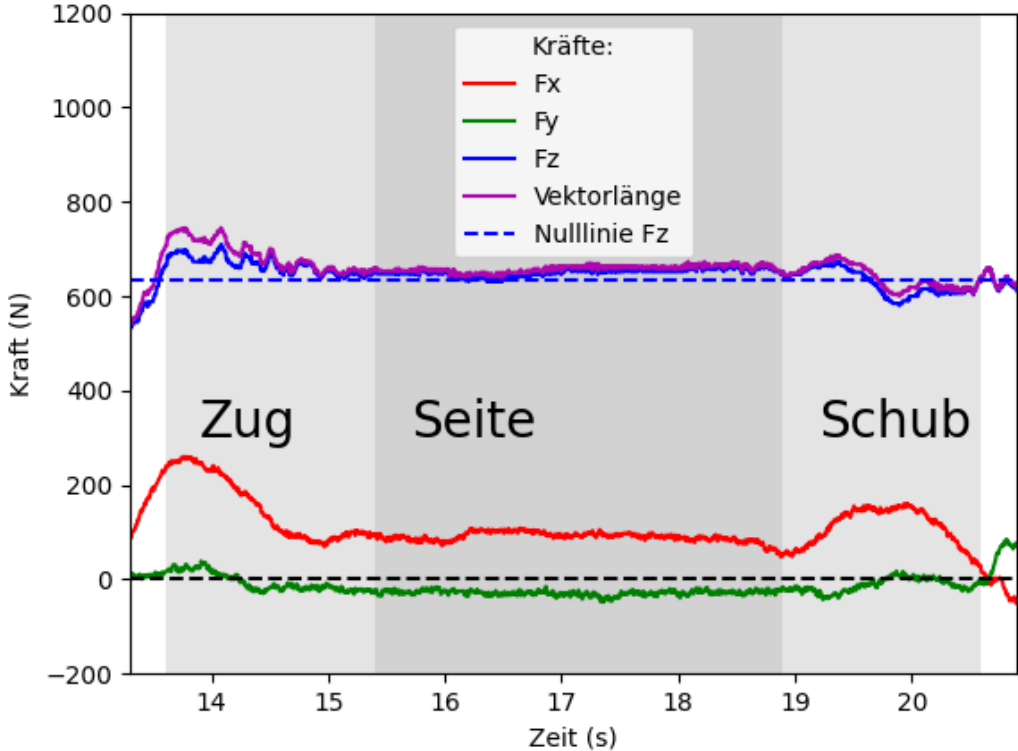
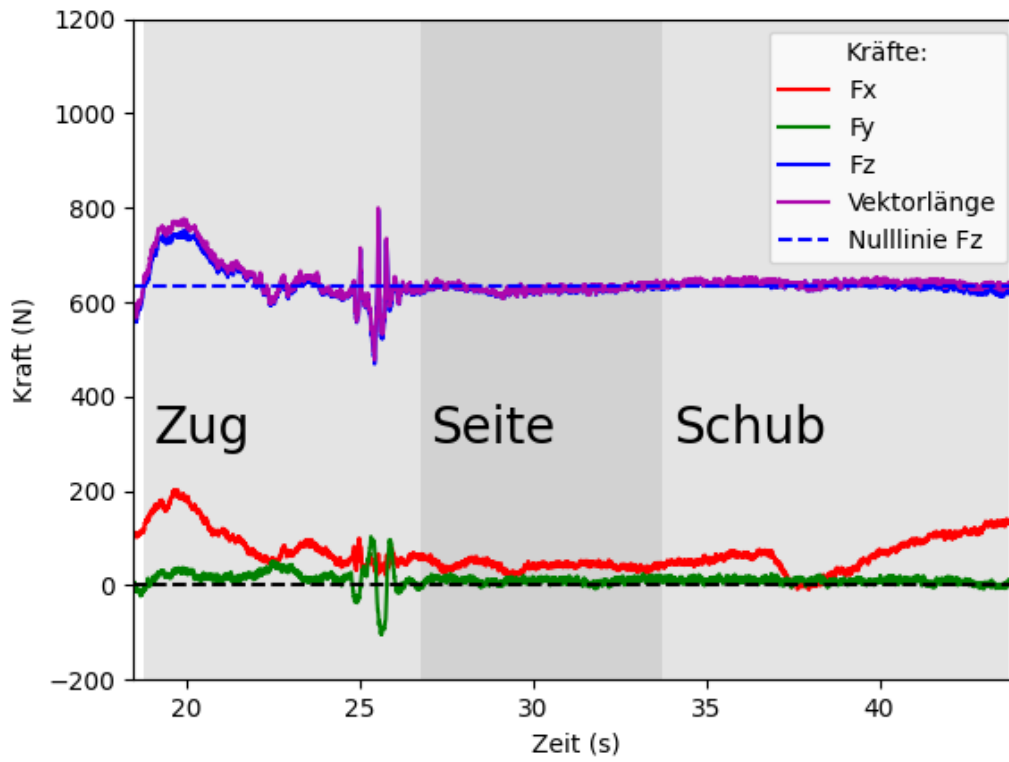
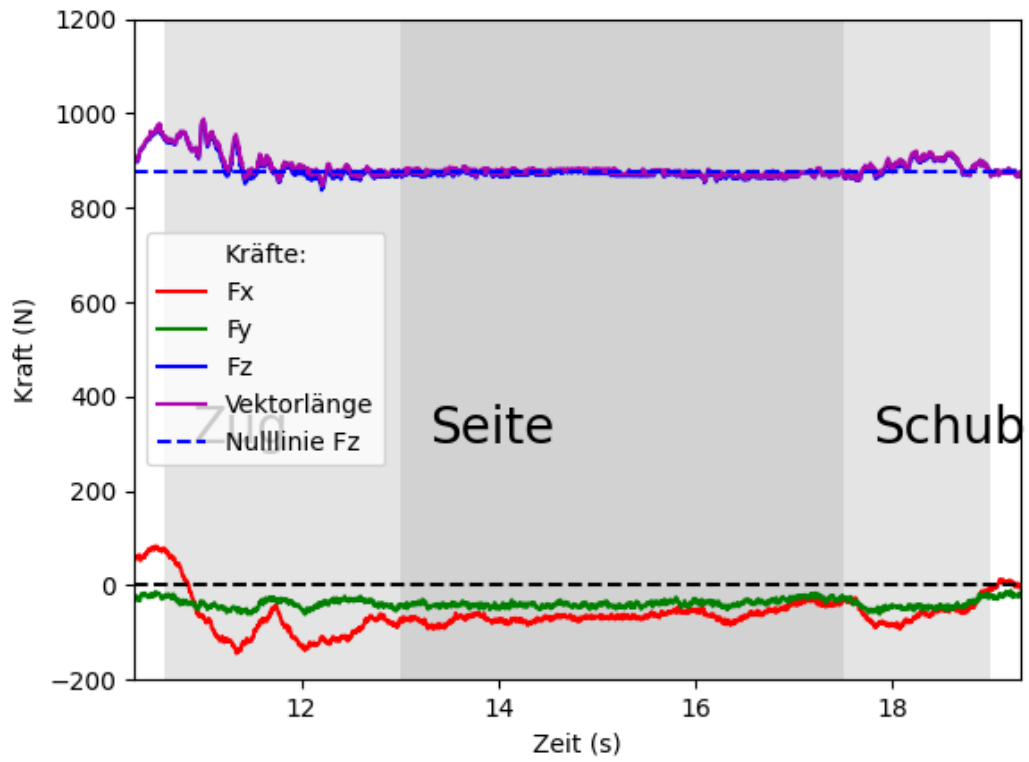


Abbildung C.3: Krafdaten von Proband 418 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.

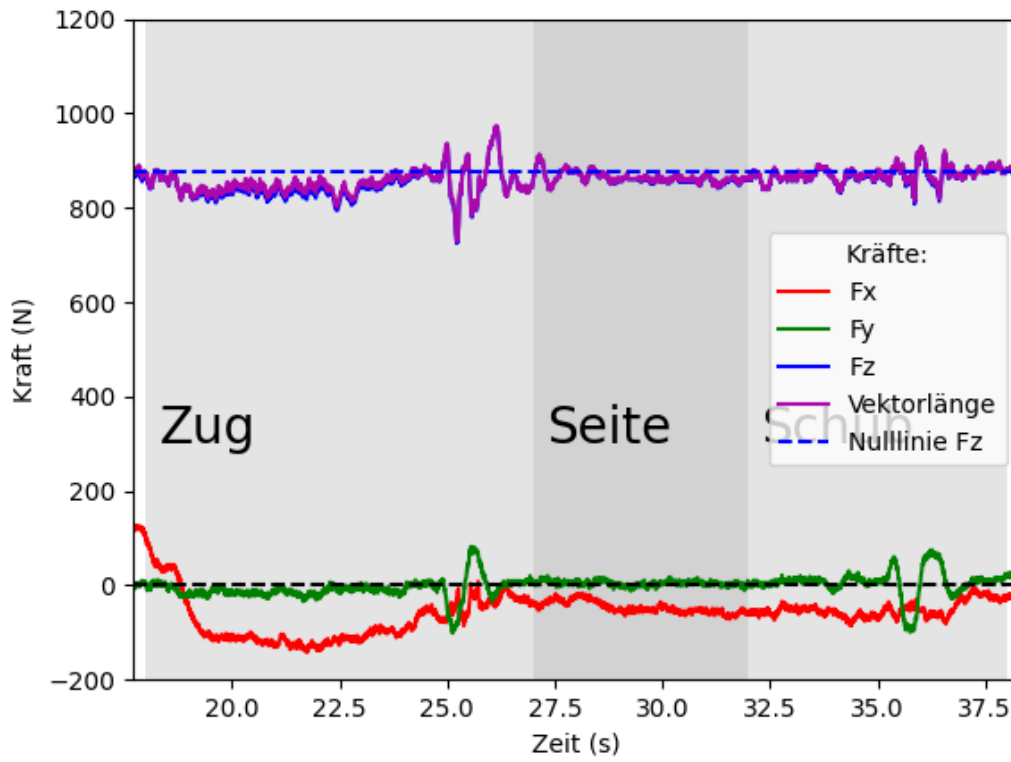


**Abbildung C.4:** Krafdaten von Proband 418 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.





**Abbildung C.5:** Krafdaten von Proband 449 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.6:** Krafdaten von Proband 449 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.

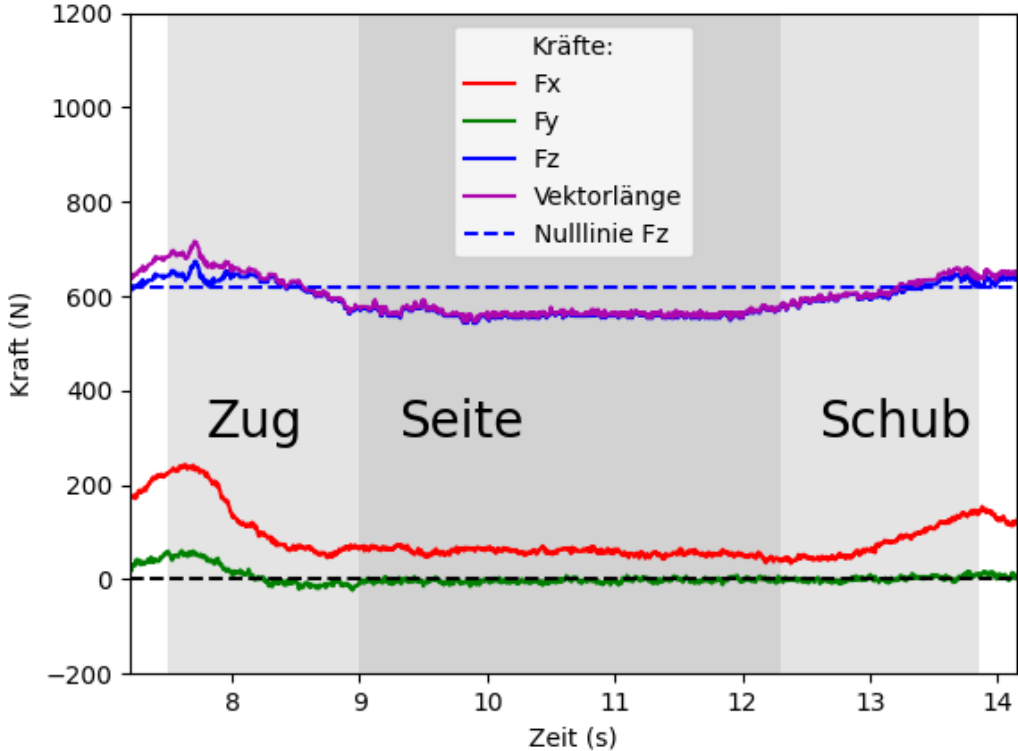
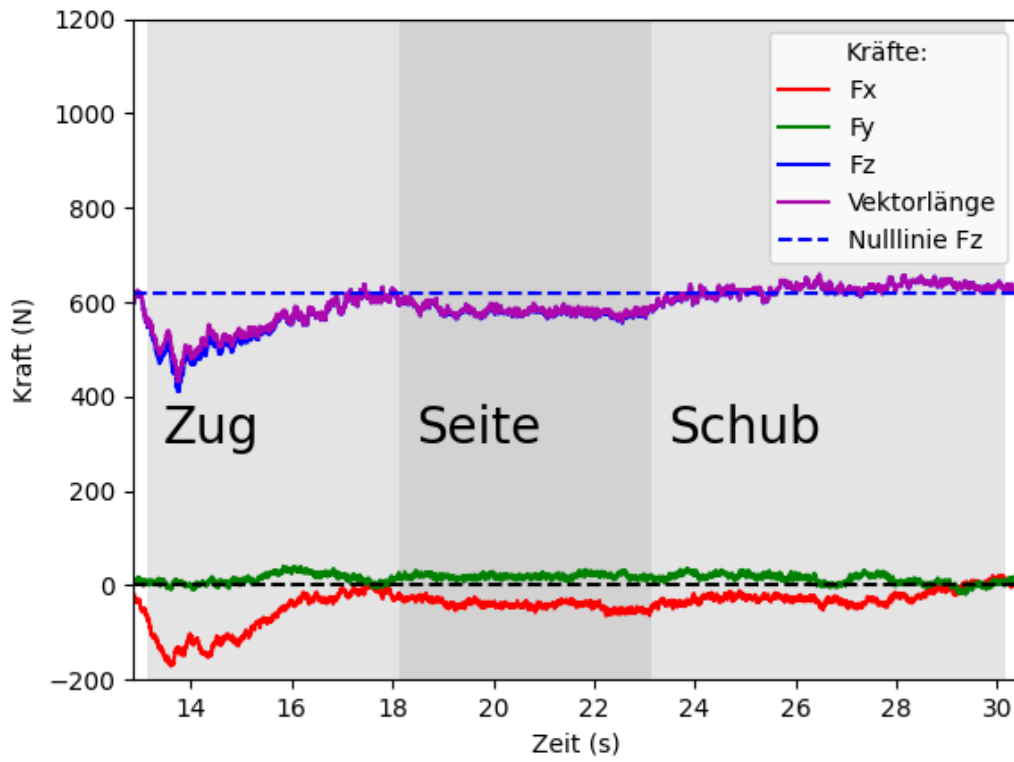
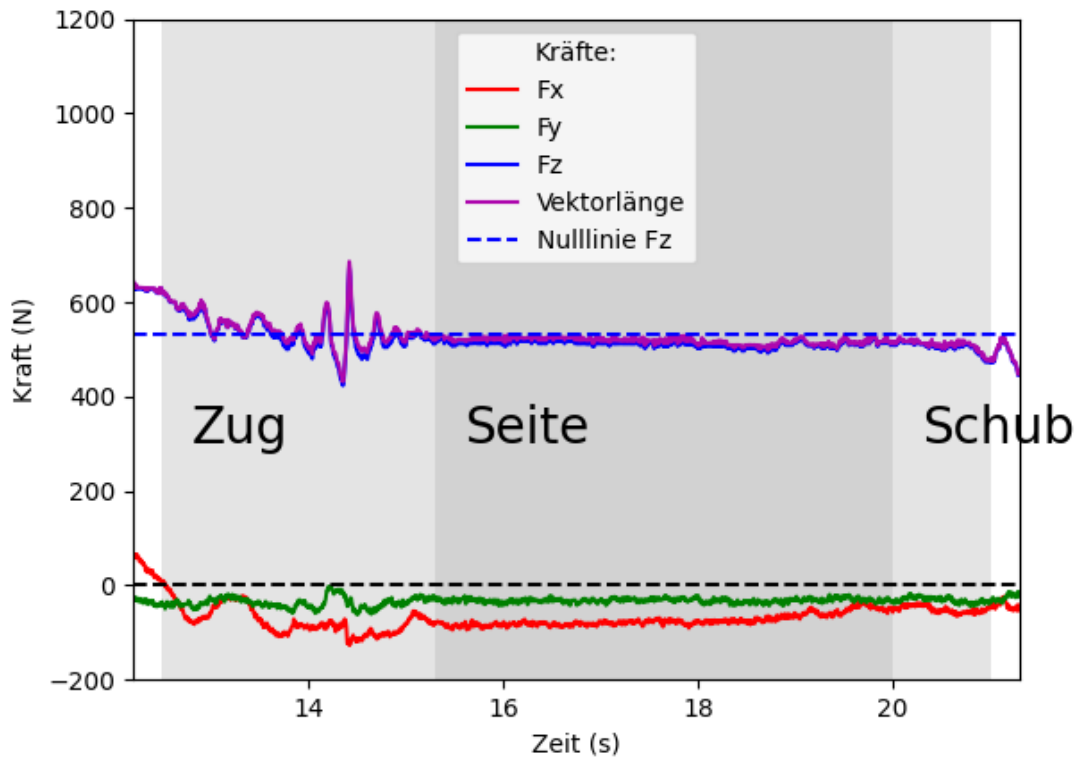


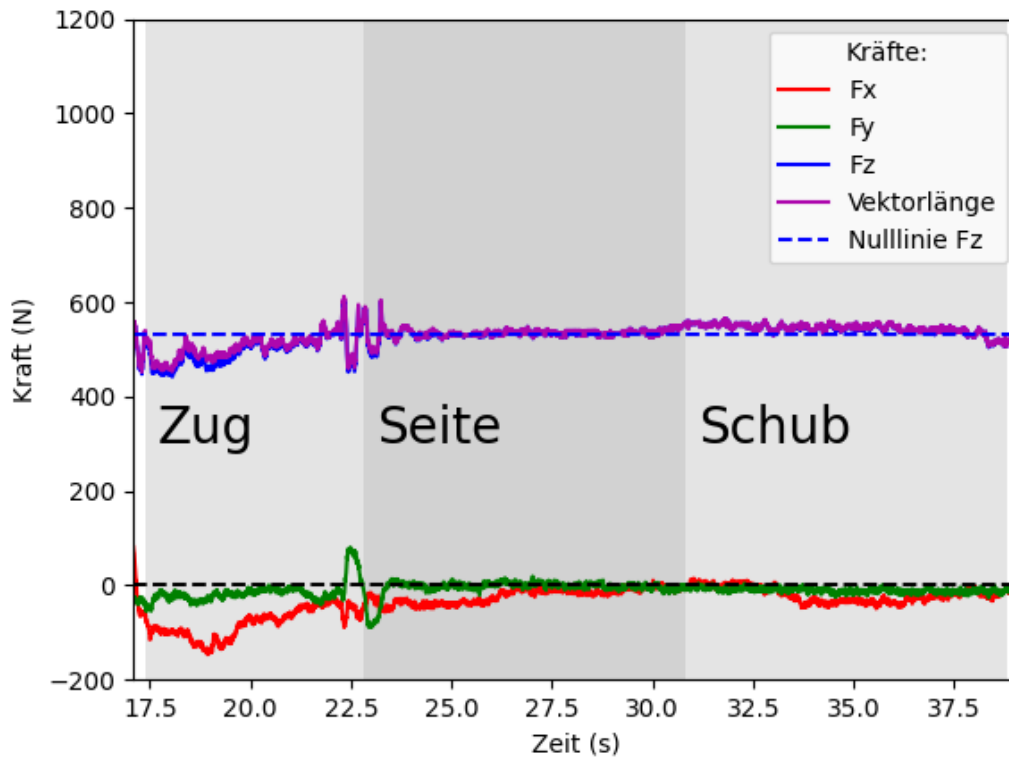
Abbildung C.7: Krafdaten von Proband 524 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



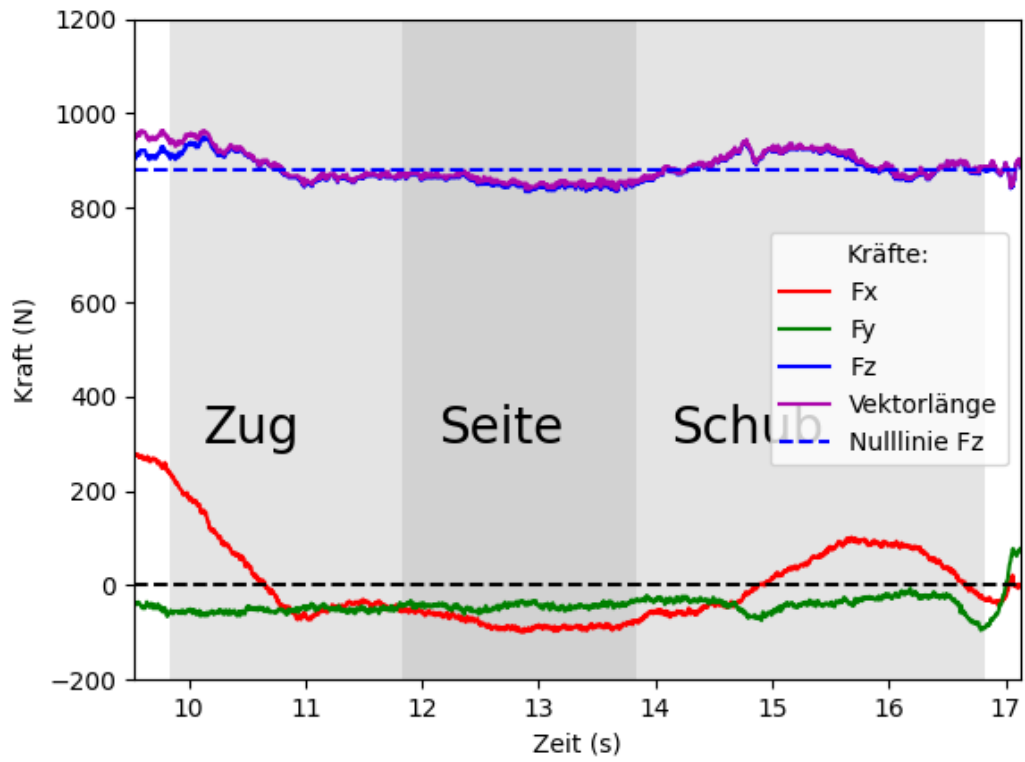
**Abbildung C.8:** Krafdaten von Proband 524 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.9:** Krafdaten von Proband 534 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.10:** Krafdaten von Proband 534 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.11:** Kraftdaten von Proband 549 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.

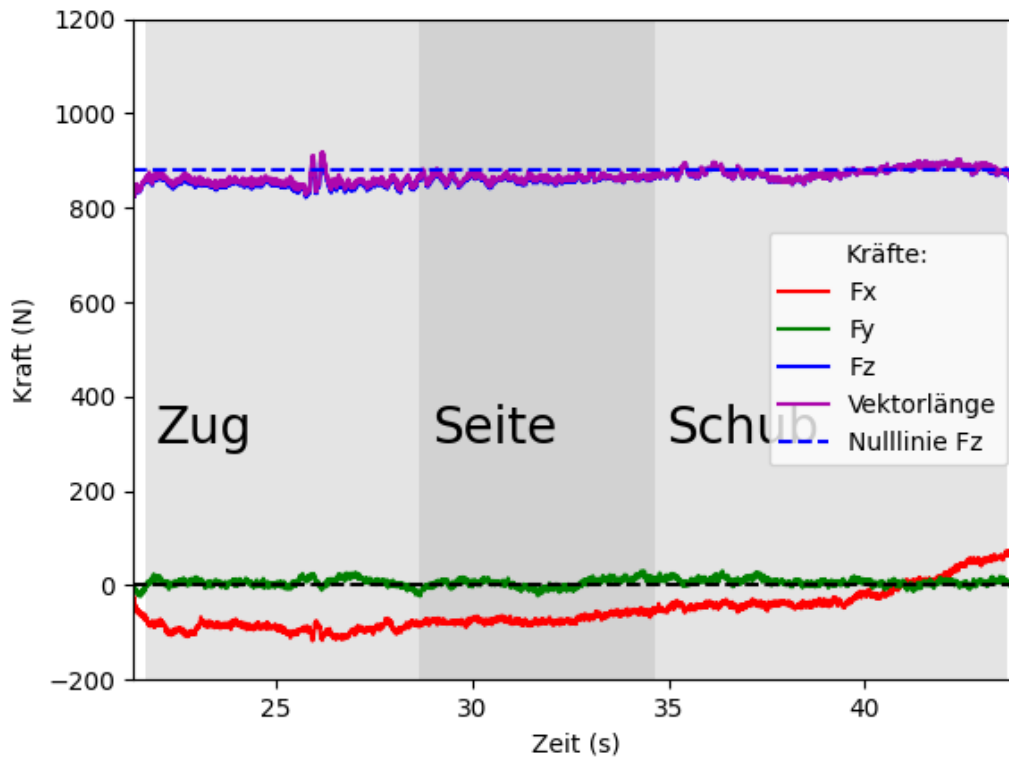


Abbildung C.12: Krafdaten von Proband 549 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.



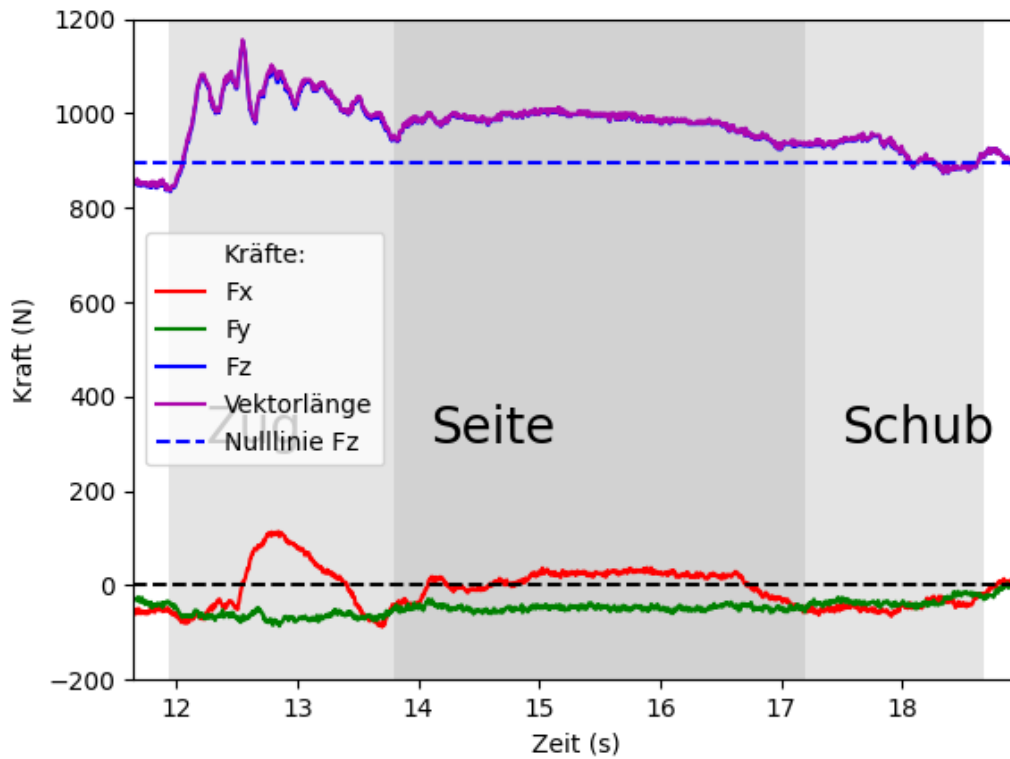


Abbildung C.13: Kraftdaten von Proband 626 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.

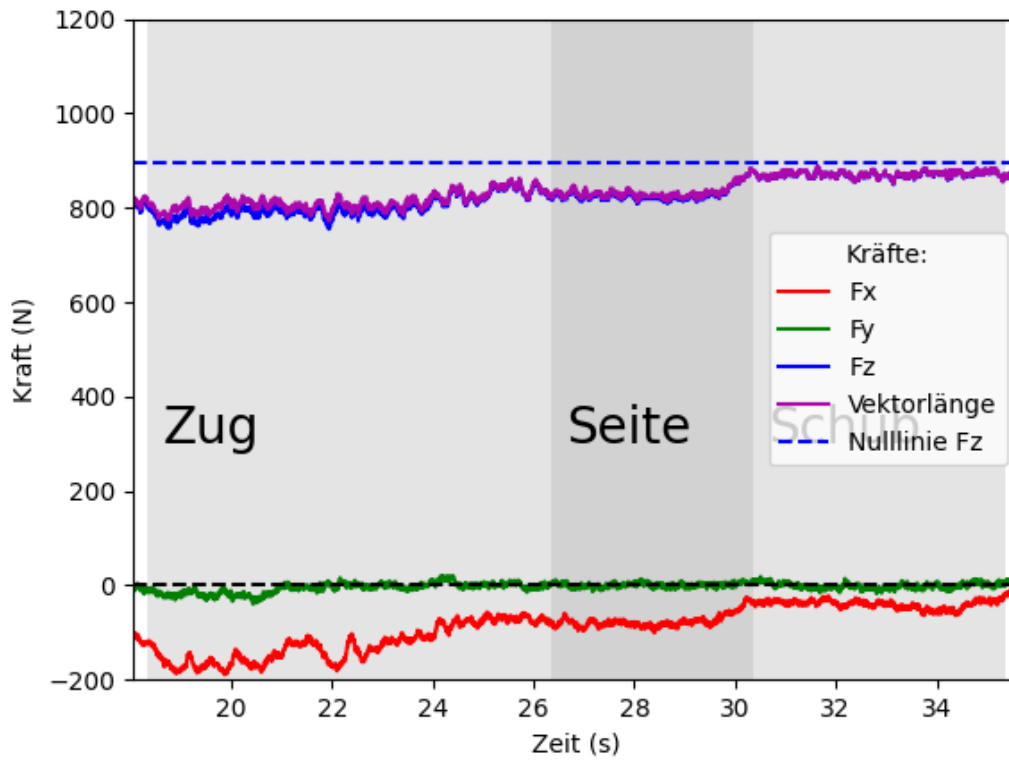


Abbildung C.14: Krafdaten von Proband 626 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.

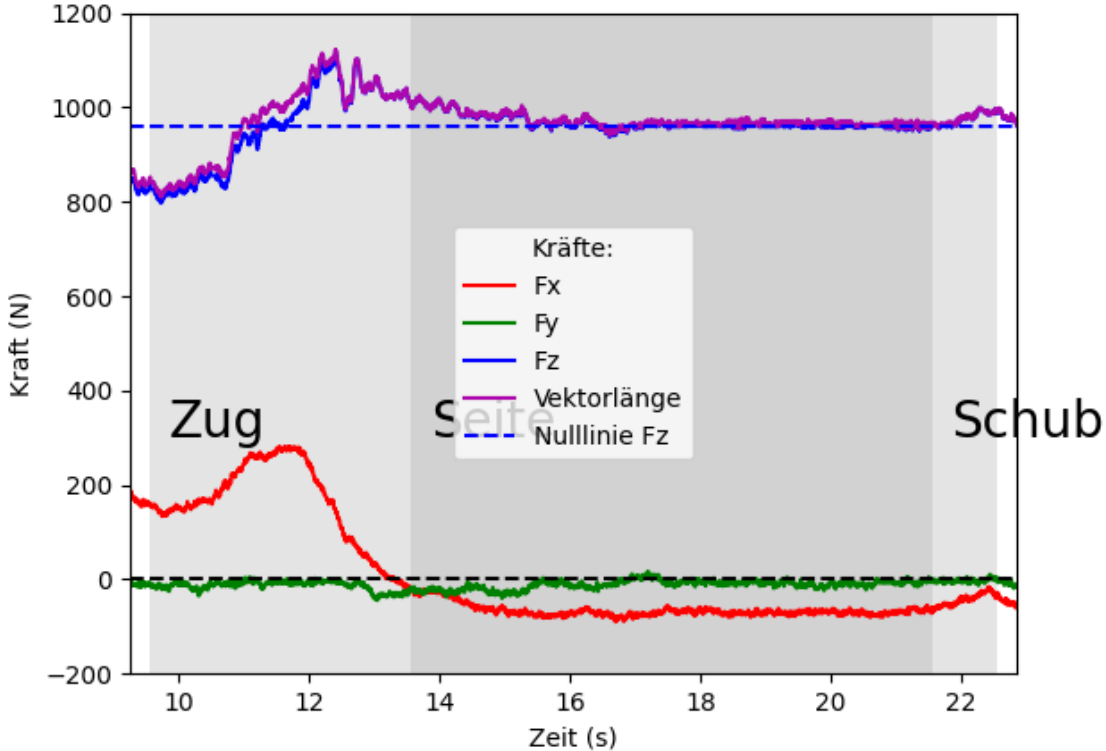
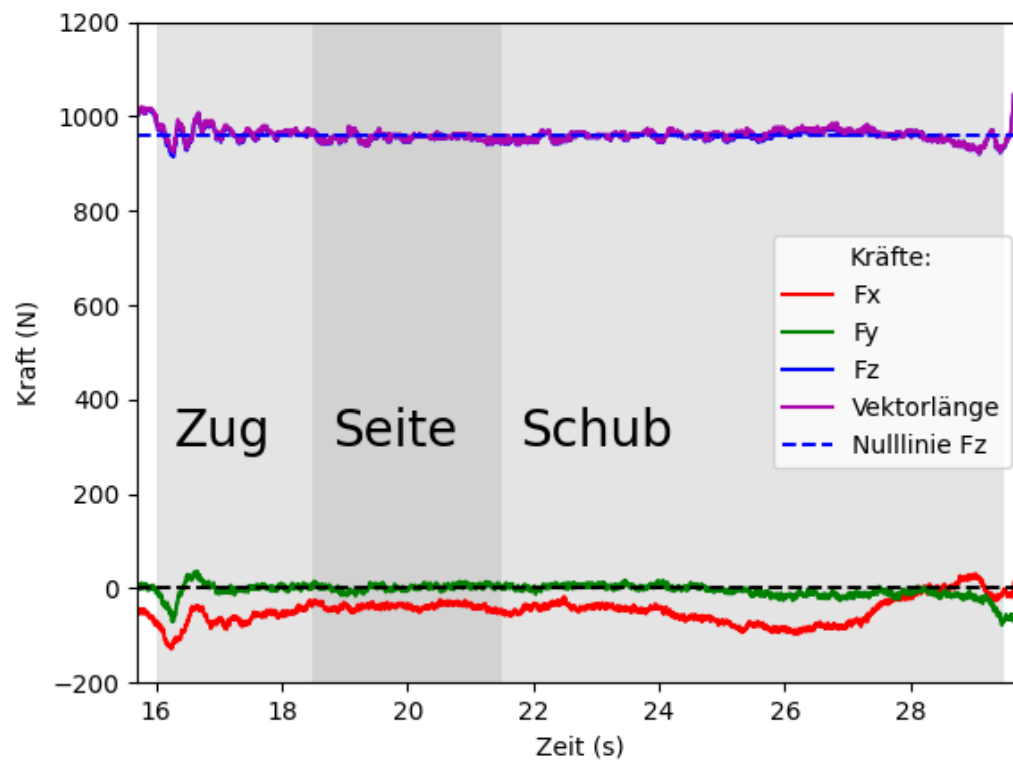
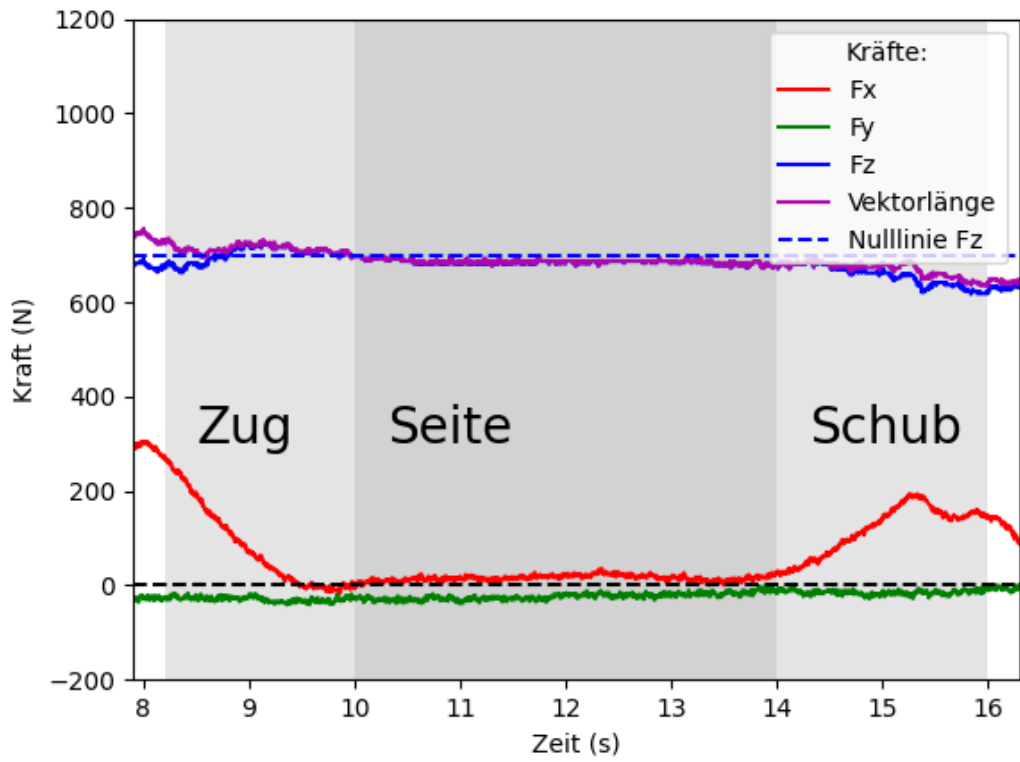


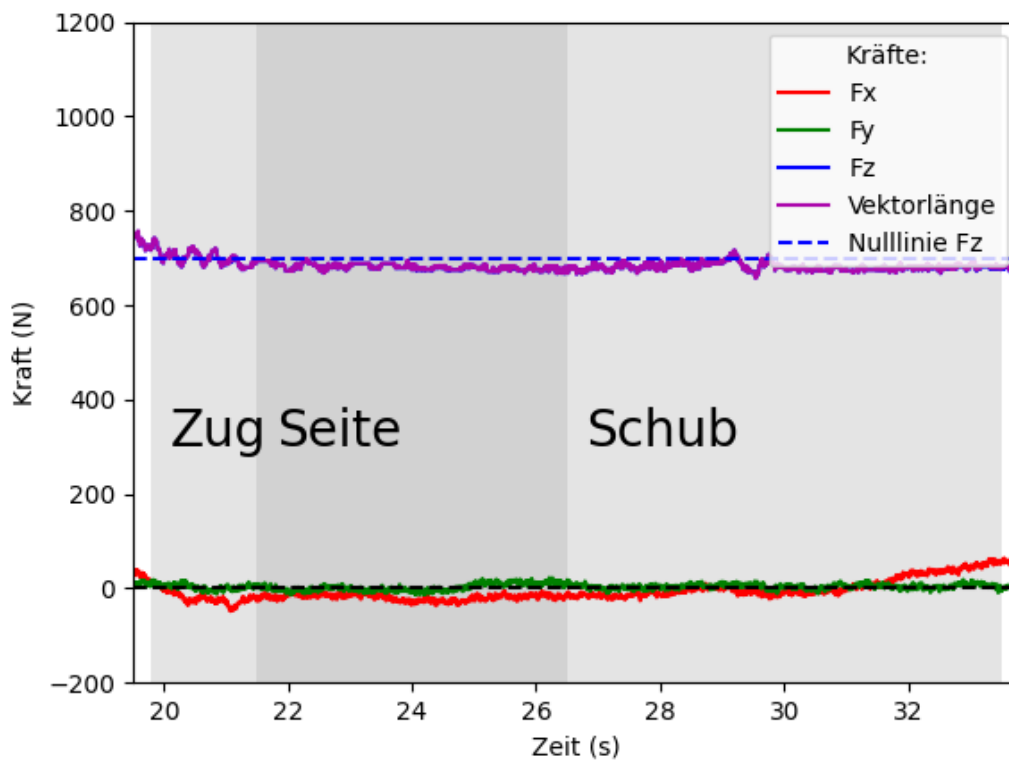
Abbildung C.15: Kraftdaten von Proband 627 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.16:** Krafdaten von Proband 627 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.

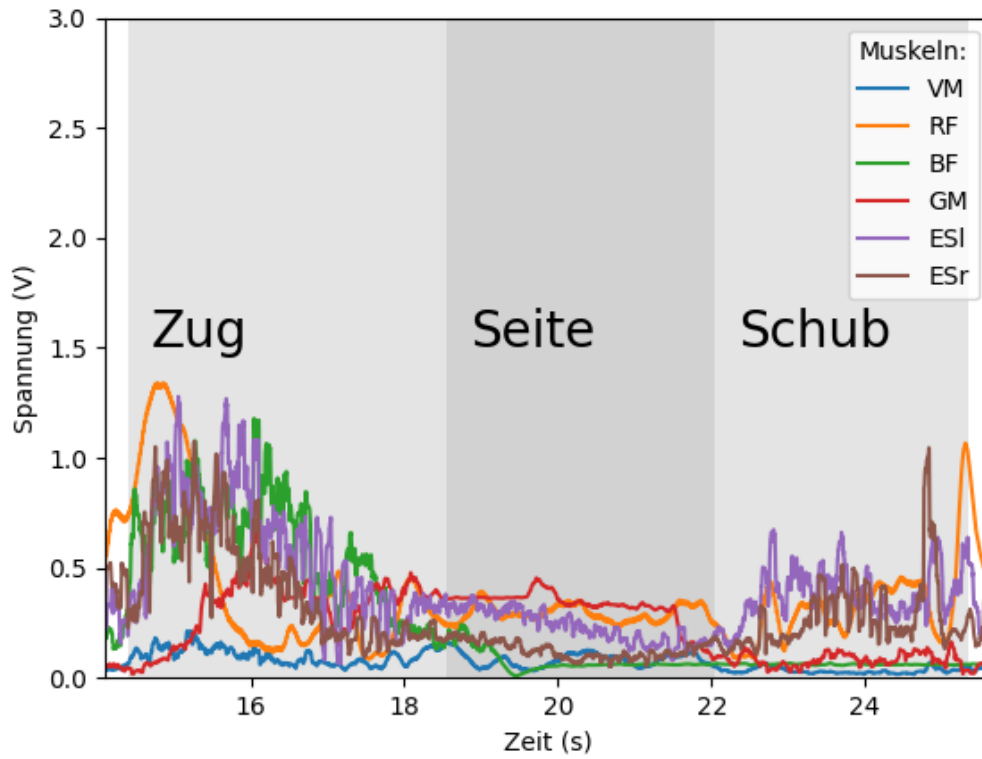


**Abbildung C.17:** Kraftdaten von Proband 708 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.

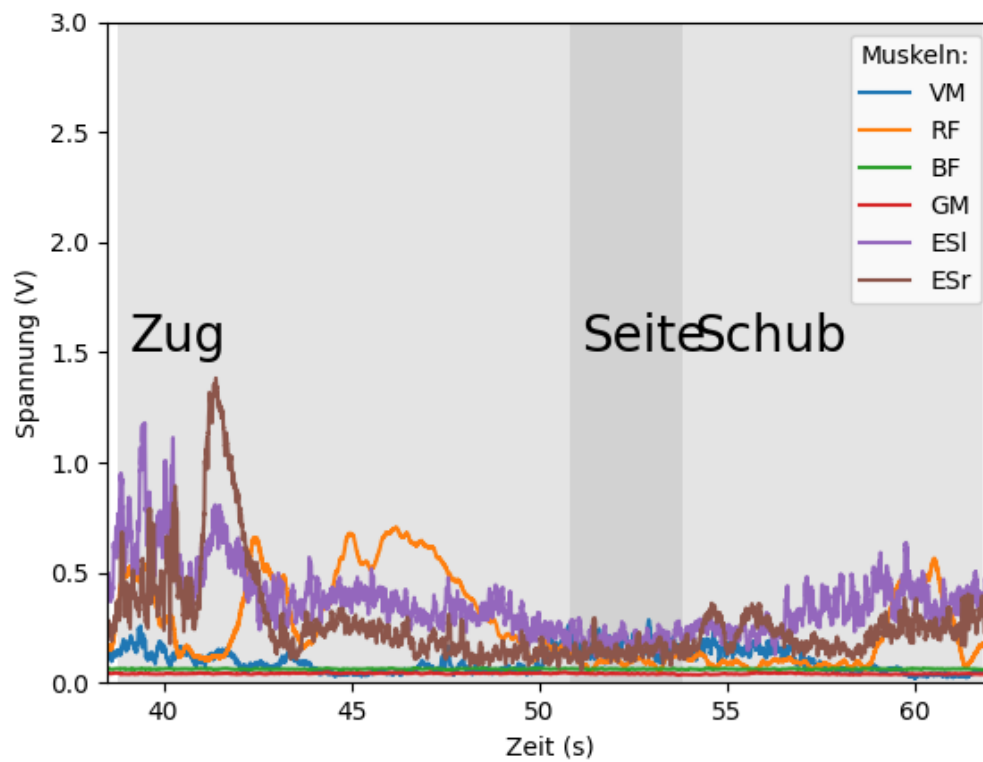


**Abbildung C.18:** Krafdaten von Proband 708 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.

### C.2.2 SEMG-Daten

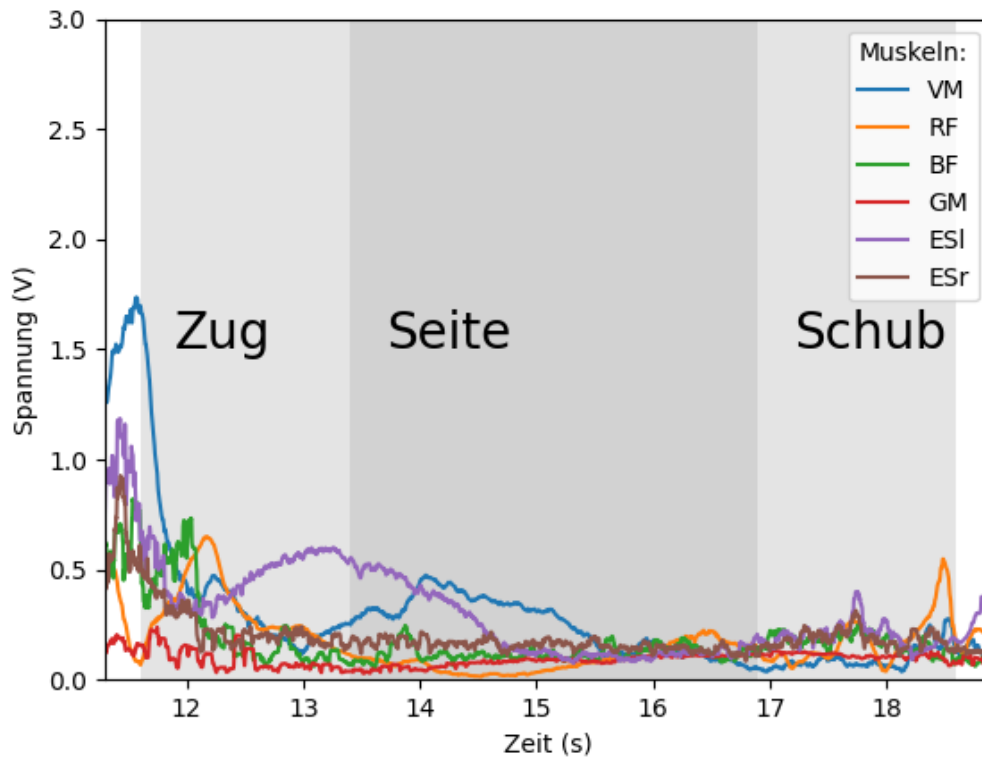


**Abbildung C.19:** SEMG-Daten von Proband 409 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.

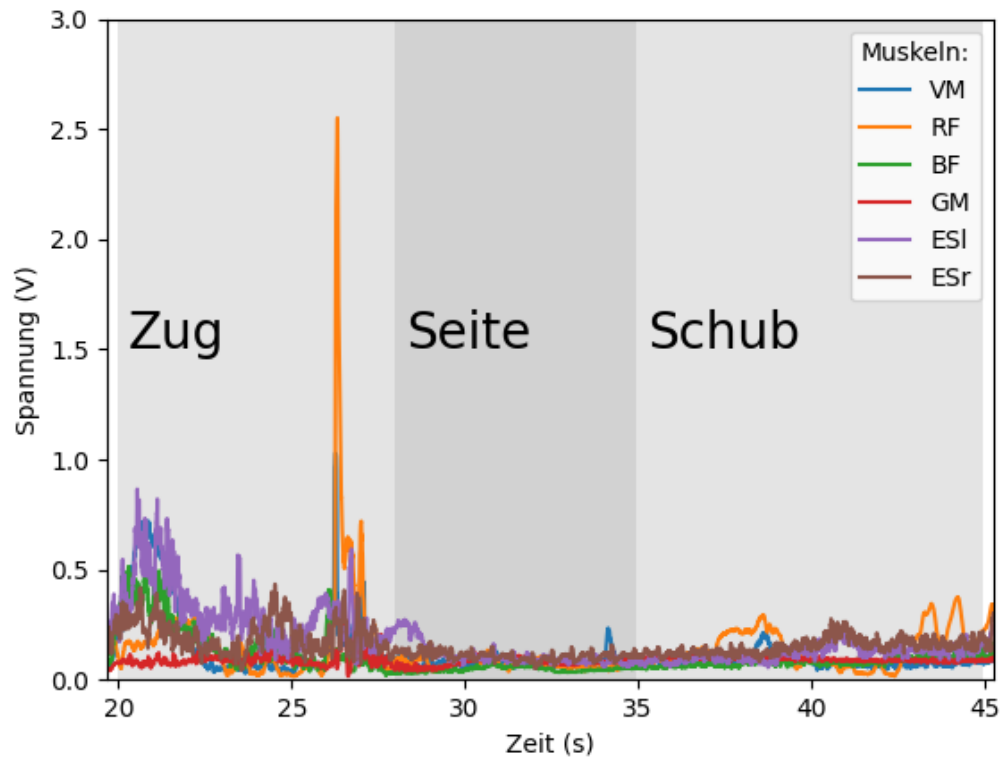


**Abbildung C.20:** SEMG-Daten von Proband 409 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.

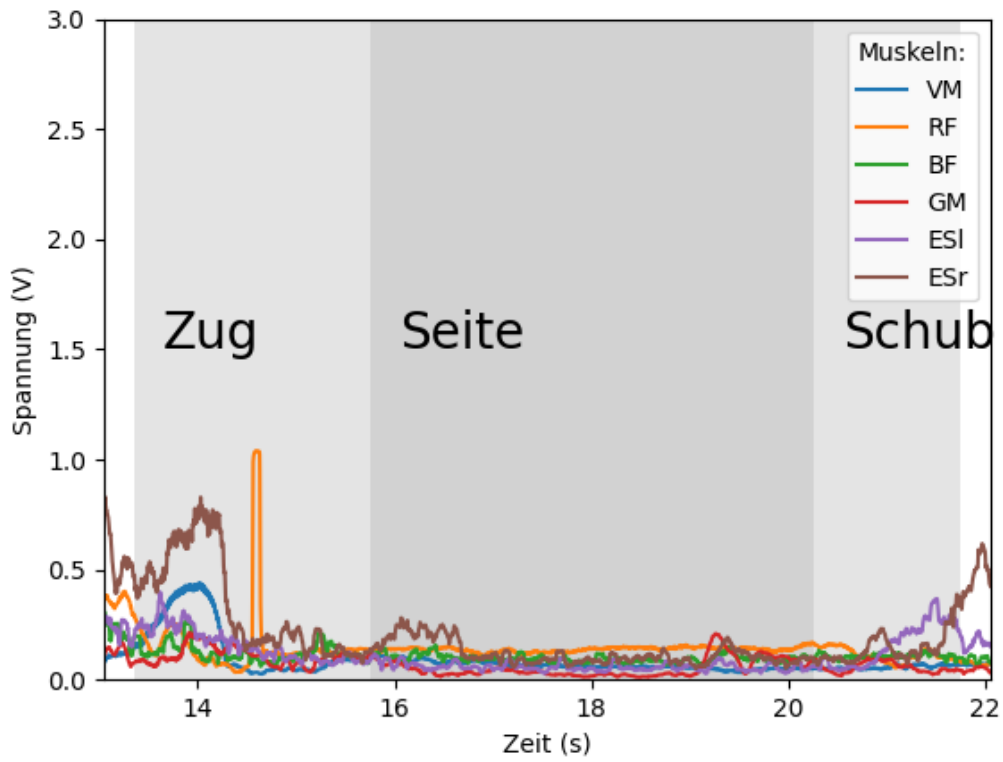




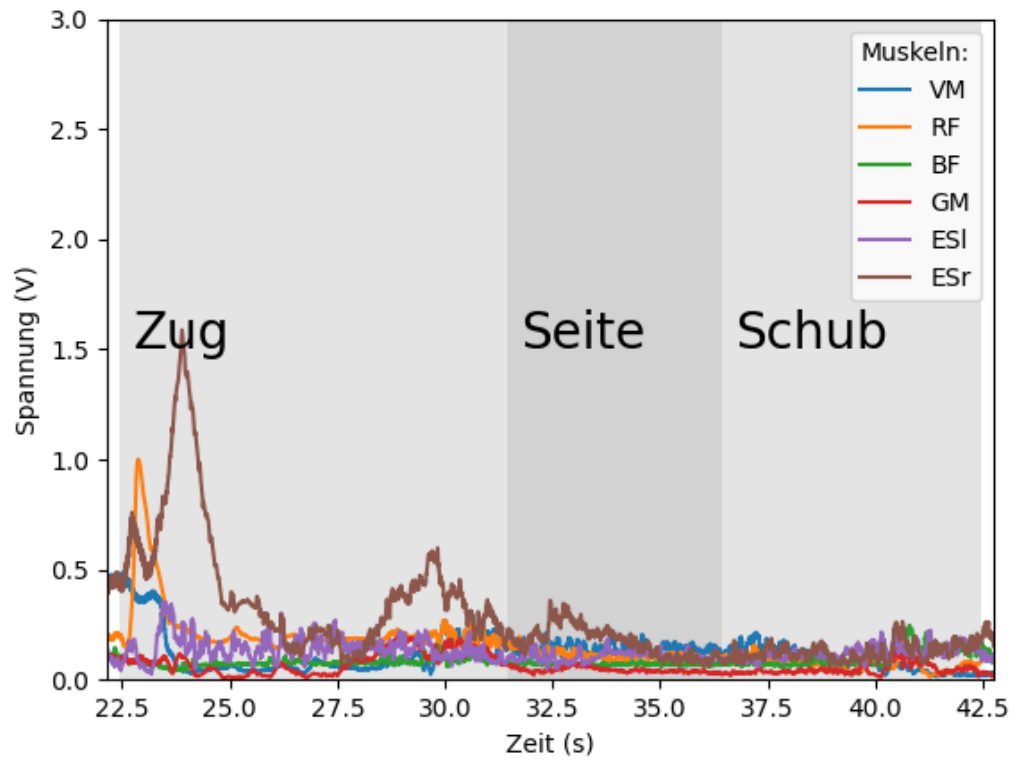
**Abbildung C.21:** SEMG-Daten von Proband 418 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



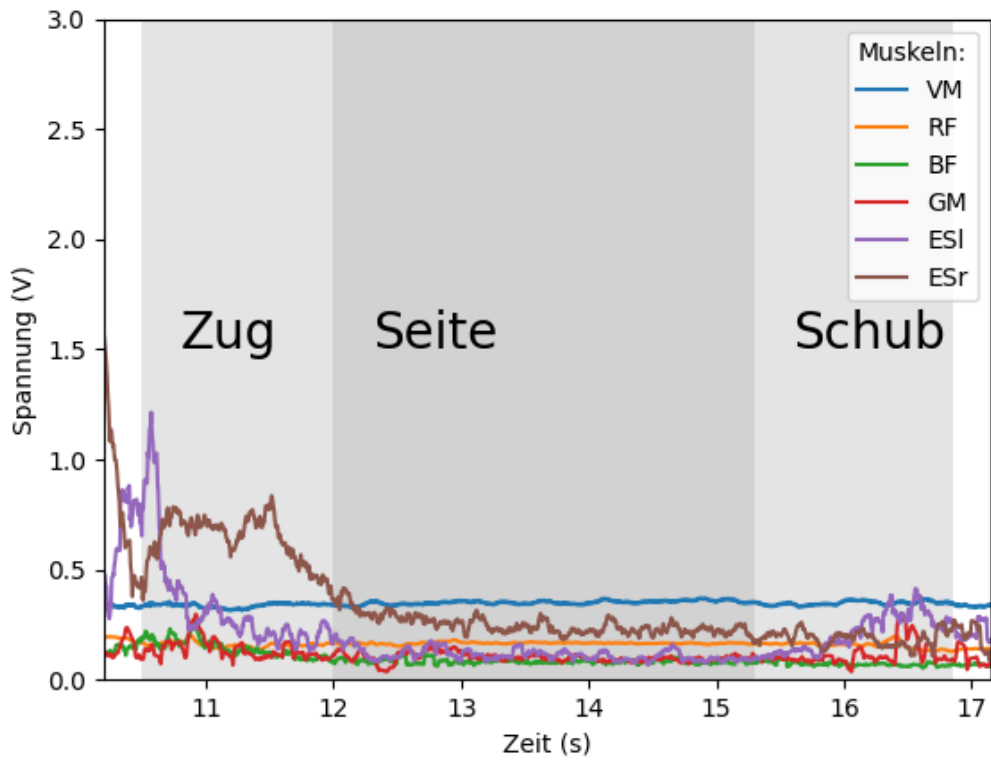
**Abbildung C.22:** SEMG-Daten von Proband 418 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.



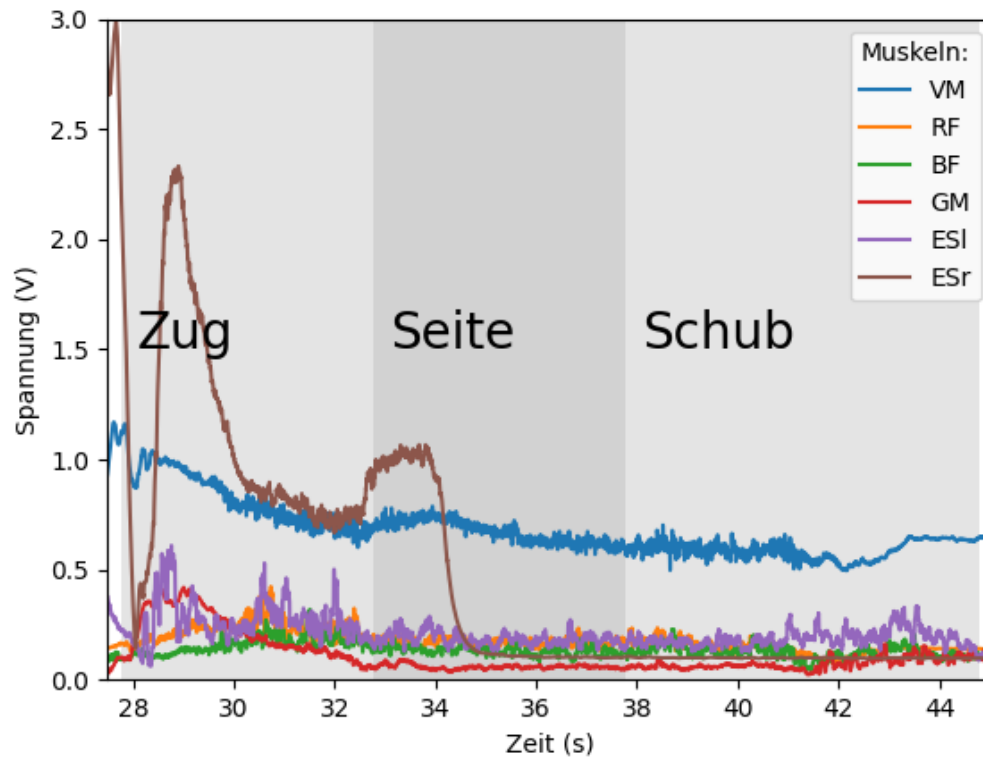
**Abbildung C.23:** SEMG-Daten von Proband 449 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



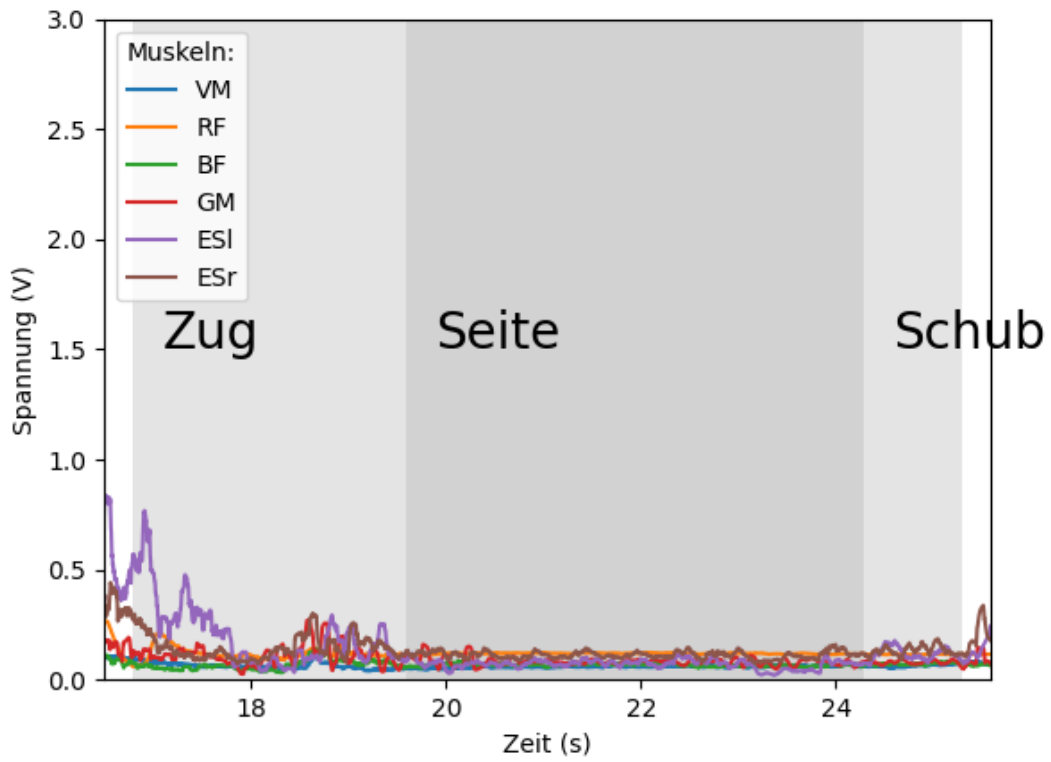
**Abbildung C.24:** SEMG-Daten von Proband 449 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.



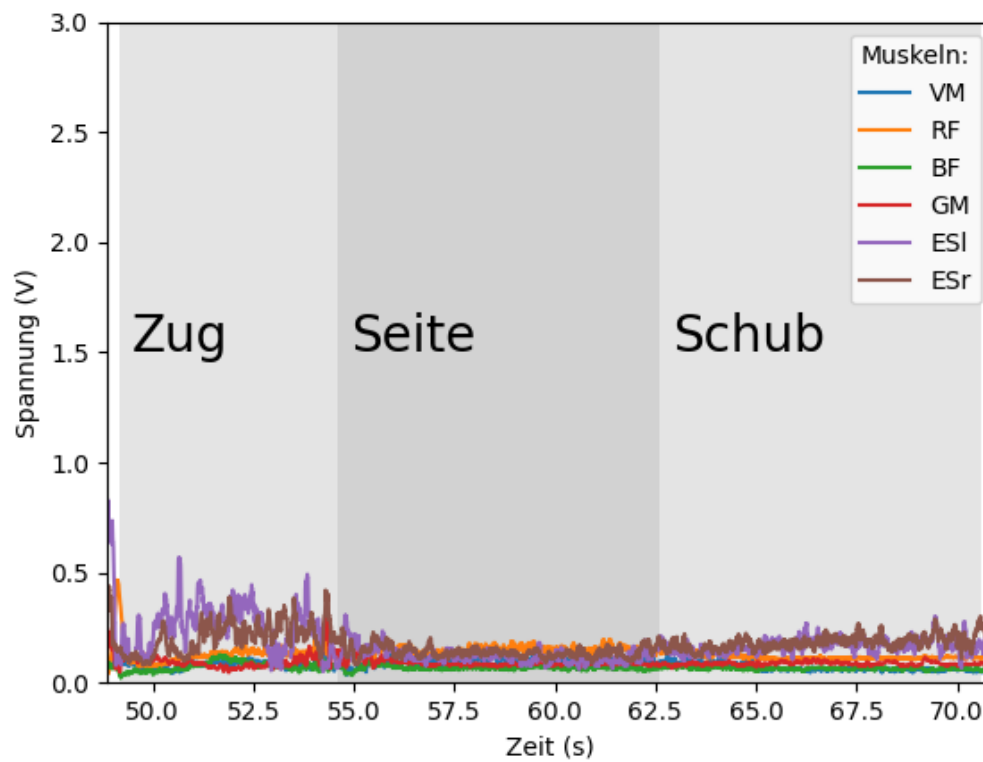
**Abbildung C.25:** SEMG-Daten von Proband 524 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.26:** SEMG-Daten von Proband 524 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.

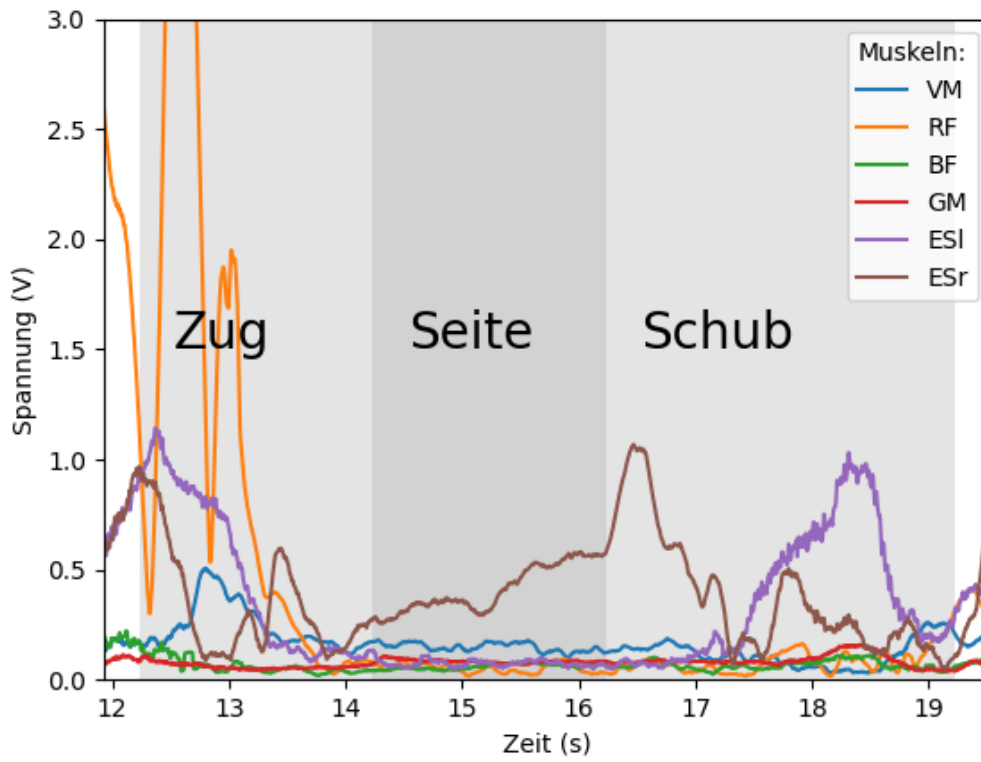


**Abbildung C.27:** SEMG-Daten von Proband 534 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.

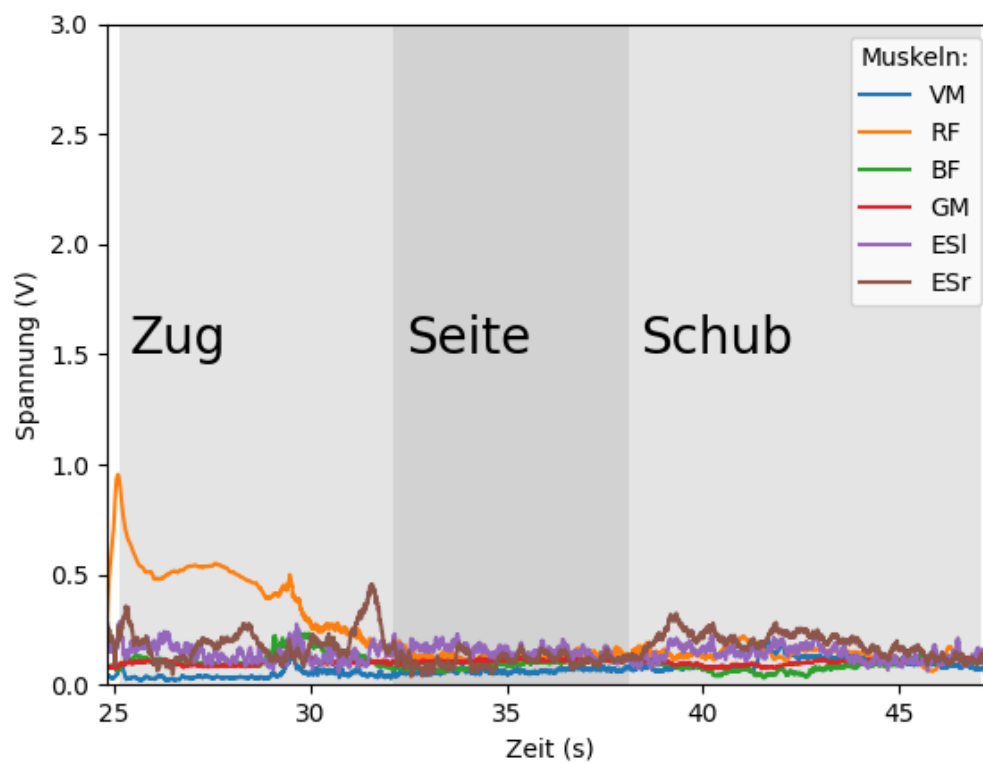


**Abbildung C.28:** SEMG-Daten von Proband 534 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.

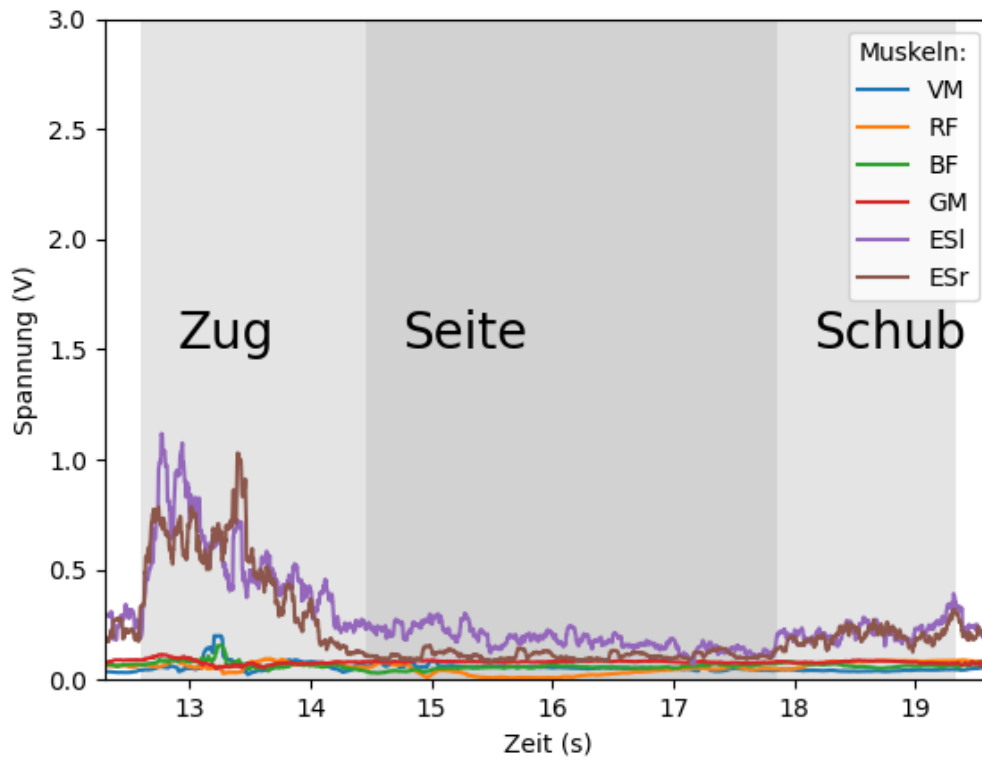




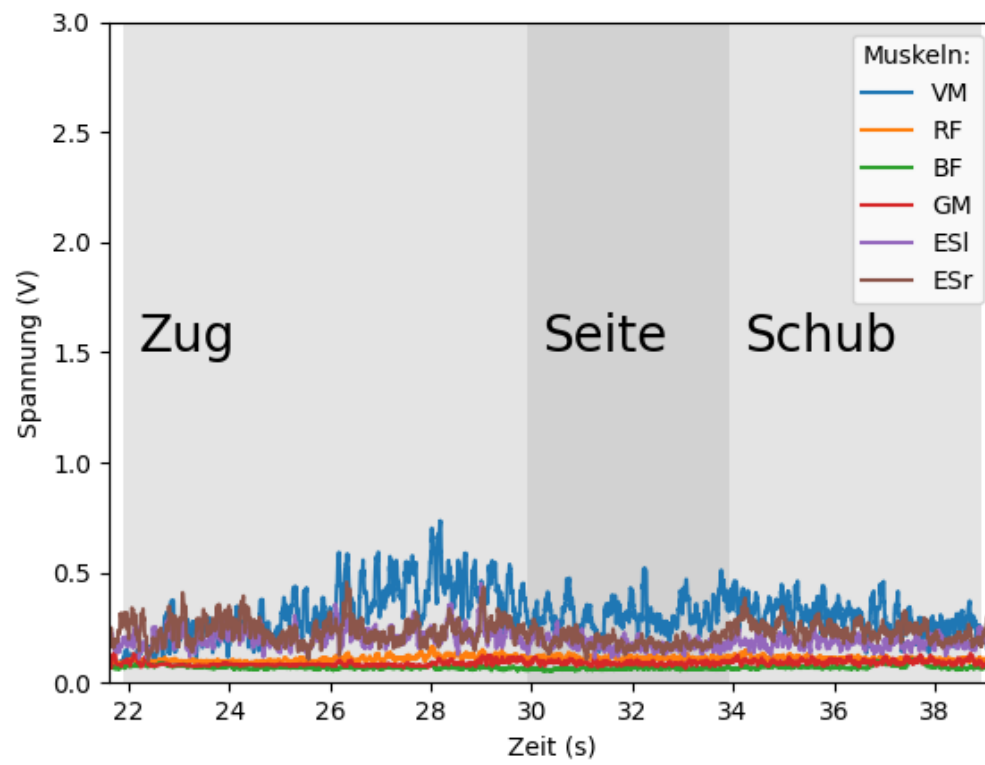
**Abbildung C.29:** SEMG-Daten von Proband 549 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



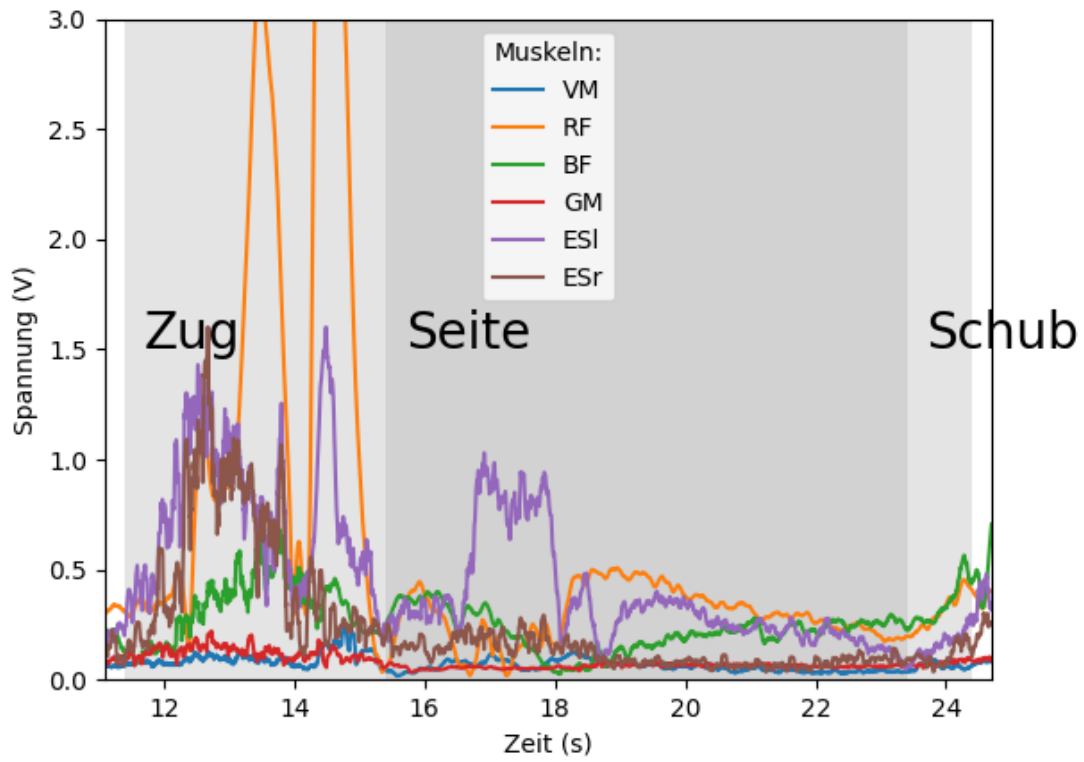
**Abbildung C.30:** SEMG-Daten von Proband 549 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.



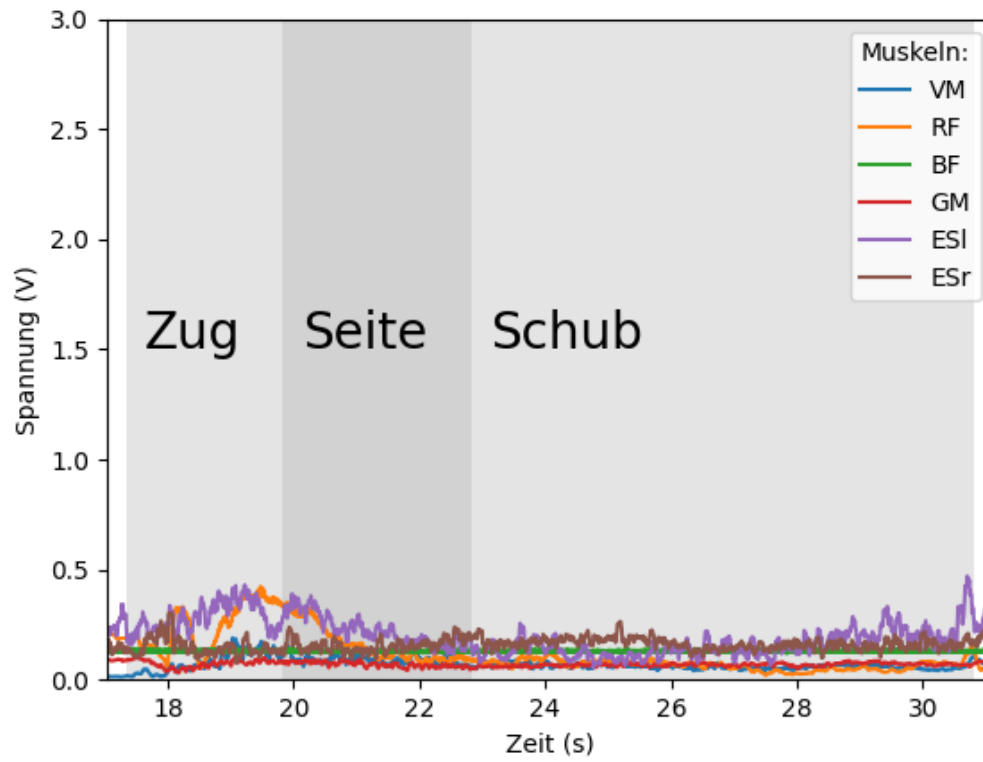
**Abbildung C.31:** SEMG-Daten von Proband 626 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



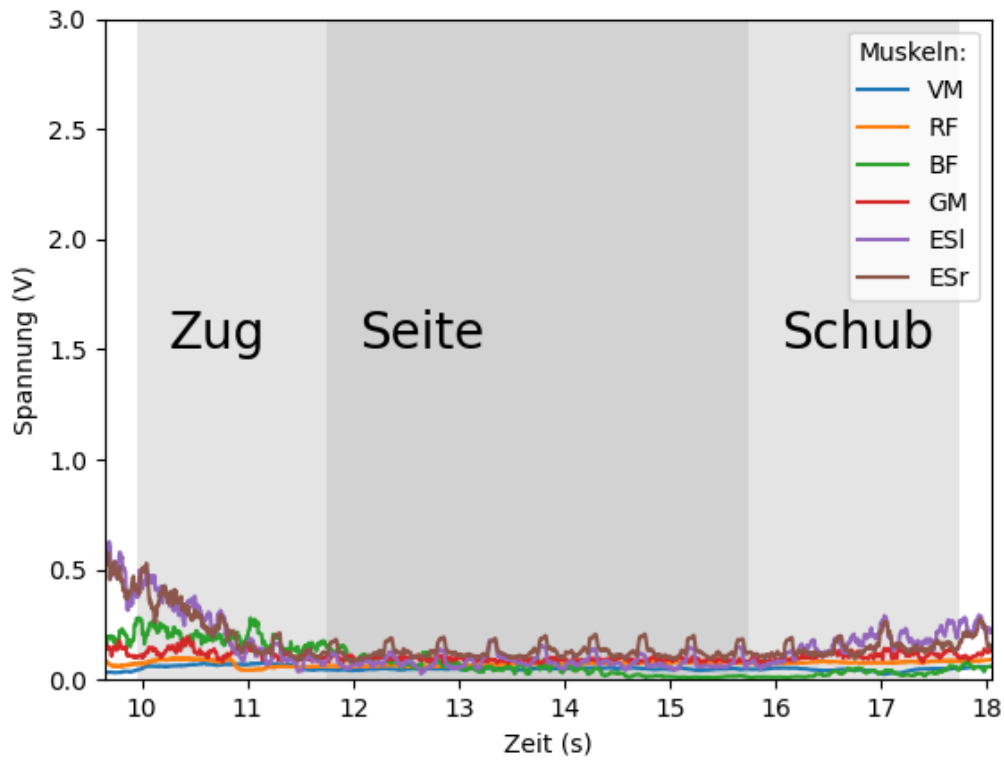
**Abbildung C.32:** SEMG-Daten von Proband 626 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.



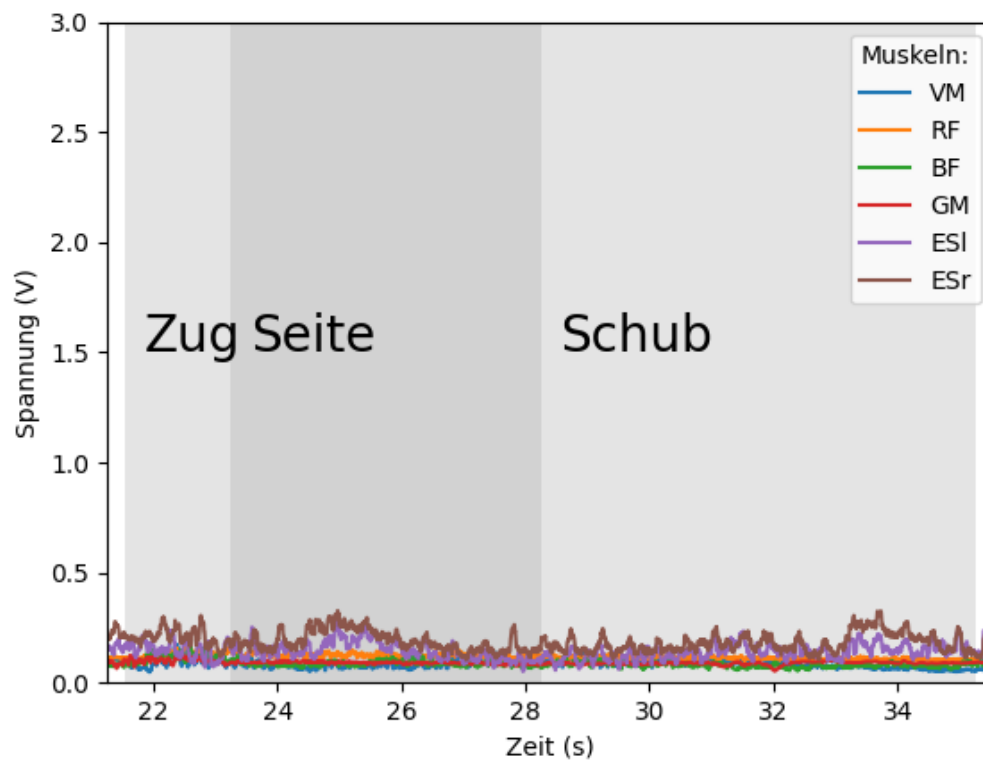
**Abbildung C.33:** SEMG-Daten von Proband 627 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.34:** SEMG-Daten von Proband 627 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.35:** SEMG-Daten von Proband 708 im herkömmlichen Transfer inklusive Kraftvektor.



**Abbildung C.36:** SEMG-Daten von Proband 708 im robotergestützten Transfer inklusive Kraftvektor.



## **Anhang D**

# **Ethikanträge**

**D.1 Studie: Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung**

## BESCHLUSS

### Kommission für Forschungsfolgenabschätzung und Ethik

Sitzung am 25.09.2019

vertraulich

**TOP 4.22 Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung**

**AN: Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften, Department für Versorgungsforschung, Abteilung für Assistenzsysteme und Medizintechnik, Ammerländer Heerstr. 140, 26129 Oldenburg; Weitere Beteiligte: Anna Brinkmann, Conrad Fifelski, ebd.; Christian Kowalski, OFFIS e.V. - Institut für Informatik, FuE Bereich Gesundheit | R&D Division Health, Escherweg 2, 26121 Oldenburg Drs.EK/2019/078**

#### Beschluss

Die Kommission hat keine Bedenken gegen die Durchführung des Vorhabens. Es wird gebeten, den Antrag auf der Basis der folgenden Hinweise/formalen Auflagen zu überarbeiten:

- Auf das Geschlecht der auftragenden Person achten. Einverständnis abfragen, ob es ein Mann oder eine Frau sein soll.

*Herr Hein verlässt die Sitzung während der Abstimmung.*

Nach Überarbeitung ist der Antrag Herrn Schorer zur Prüfung zuzusenden.

beschlossen: -6:0:0-



Kommission für Forschungsfolgenabschätzung und Ethik  
Begleitendes Übersichtsformular für Anträge

1. Name und Anschrift

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein

Ist eine/r der Antragsteller/-innen Arzt/Ärztin: ja  nein

2. Titel der Studie

**Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung**

3. Es handelt sich um einen

Erstantrag  Folgeantrag

Drs. Nr. des Erstantrags: --

4. Zusammenfassung (max 250 Wörter)

Angesichts der soziodemografischen Entwicklung in Deutschland wird sich das Verhältnis von Leistungsempfängern zu Leistungserbringern der Alterssicherungssysteme verschlechtern. Um der daraus abzuleitenden Diskrepanz zwischen Pflegenden und Pflegebedürftigen entgegenzuwirken, werden salutogene Arbeitsbedingungen angestrebt. Im Kontext der Pflege ist vor allem auf die hohe Belastung des Muskel-Skelett-Apparats hinzuweisen, die während der körperlich anstrengenden Pflege Tätigkeiten auf den Körper der Ausführenden wirkt und zu Fehltagen oder sogar zu einem frühzeitigen Austritt aus der Pflege Tätigkeit führen kann. Das manuelle Bewegen der Patienten führt dabei zu mechanischen Belastungen im Bereich der Lendenwirbelsäule und ist daher als Risikofaktor zu charakterisieren. Dabei führt die falsche Arbeitsweise besonders schnell zu gesundheitlichen Beschwerden, da die Belastungen bei einer fehlerhaften Ausführung der Pflege Tätigkeiten stark erhöht werden.

In der Abteilung Assistenzsysteme und Medizintechnik der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg wurde ein Mess- und Analysesystem zur Analyse wichtiger Parameter während des Patiententransfers auf Basis von Tiefenkameras, Kraftmessplatte und Oberflächen-Elektromyografie (EMG) entwickelt. Zusätzlich wurde in Kooperation mit dem OFFIS - Institut für Informatik ein System zur physischen Entlastung bei Pflege Tätigkeiten bestehend aus einem aktuierten Bett und einem Leichtbauroboter zusammengestellt. Die tatsächliche Entlastungsfähigkeit dieses Roboters soll durch eine Studie belegt werden. Das Ziel der Studie ist der Vergleich der auf die Pflegekraft wirkenden Belastungen abgeleitet durch die Bodenreaktionskräfte des Analysesystems. Konkret soll der Roboter beim Transfer einer

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

Rettungspuppe von Fuß- zu Kopfende des Bettes in zwei unterschiedlichen Steuerungsvarianten unterstützen. Für die Analyse werden zusätzlich die Muskelaktivitäten des unteren Rückens, der Gesäßmuskulatur und der Oberschenkel unter Verwendung eines kommerziellen EMGs betrachtet.

5. Fragen zum Forschungsvorhaben

Werden Patienten untersucht, die im Rahmen der Studie ambulant oder stationär behandelt werden? ja  nein

Werden den Patienten/Probanden Medikamente verabreicht oder werden sie invasiven Prozeduren unterzogen? ja  nein

Fällt die Studie unter gesetzliche Regelungen (AMG, MPG, Strahlenschutzgesetz etc.)? ja  nein

Aus welchem Wissenschaftsgebiet entstammt die Fragestellung?  
Robotik, Informatik, Biomechanik

Handelt es sich um eine Studie an Minderjährigen? ja  nein

Handelt es sich um eine Studie an nicht-einwilligungsfähigen Erwachsenen? ja  nein

6. Eingereichte Dokumente (die Punkte unten zum Ankreuzen)

Antrag

Probandeninformation

Einverständniserklärung

In ihrer jeweils aktuellen Form in einer pdf-Datei (mit durchnummerierten Seiten)

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

## Antrag auf Stellungnahme der Kommission für Forschungsfolgenabschätzung und Ethik

### 1. Bezeichnung des Forschungsvorhabens

**Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur  
Prävention biomechanischer Überbelastung**

### 2. Name und Kontaktdaten des Antragstellers (Dienstanschrift):

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften  
Department für Versorgungsforschung, Abteilung für Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Ammerländer Heerstr. 140  
26129 Oldenburg  
Telefon 0441-7984450  
E-Mail: andreas.hein@uni-oldenburg.de

Weitere Beteiligte:

Anna Brinkmann  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Department für Versorgungsforschung, Abteilung für Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Ammerländer Heerstr. 140  
26129 Oldenburg  
Telefon +49 441-7984630  
E-Mail: anna.brinkmann1@uni-oldenburg.de

Conrad Fifelski  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Department für Versorgungsforschung, Abteilung für Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Ammerländer Heerstr. 140  
26129 Oldenburg  
Telefon +49 441-7984630  
E-Mail: conrad.fifelski@uni-oldenburg.de

Christian Kowalski  
OFFIS e.V. - Institut für Informatik  
FuE Bereich Gesundheit | R&D Division Health  
Escherweg 2, 26121 Oldenburg - Germany  
Telefon: +49 441 9722 706  
E-Mail: christian.kowalski@offis.de

### 3. Angaben zu den Rahmenbedingungen des Vorhabens

In der Abteilung Assistenzsysteme und Medizintechnik des Departments für Versorgungsforschung der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg wird an modernster Robotik geforscht, welche in Zukunft schwere Tätigkeiten von Pflegekräften erleichtern soll. Um die Entlastung, welche ein Roboter mit sich bringt, zu evaluieren, wird ein Mess- und Analysesystem eingesetzt. Dieses System wurde in der Abteilung entwickelt und bietet die Möglichkeit, Daten für eine differenzierte Analyse von Pflegetätigkeiten zu liefern. Hierbei wird auf Tiefenkameras, eine Kraftmessplatte und ein EMG-Gerät zurückgegriffen.

Zudem steht die Eruiierung der Relevanz spezifischer Muskeln der unteren Extremität, des Rückenstreckers und der Gesäßmuskulatur bei der Ausführung spezifischer Pflegeszenarien via Elektromyografie (EMG) im Vordergrund. Die für die jeweiligen Szenarien relevanten Muskeln sind in den Kontext zu auftretenden Belastungen zu setzen.

Die Datenerhebung soll ab November 2019 im Pflegeheimlabor der Versorgungsforschung stattfinden.

### 4. Gegenstand und Verfahren des Vorhabens

#### Gegenstand

Angesichts der soziodemografischen Entwicklung Deutschlands werden künftig mehr Seniorinnen und Senioren den Erwerbstätigen gegenüberstehen. Folglich wird sich in Anbetracht der Alterssicherungssysteme das zahlenmäßige Verhältnis von potenziellen Empfängern von Leistungen zu den potenziellen Erbringern dieser Leistungen verschlechtern [Statistisches Bundesamt, 2015; Hornung et al., 2013]. Um dieser zukünftig zu erwartenden Diskrepanz zwischen Pflegenden und Pflegebedürftigen entgegenzuwirken und das deutsche Pflegesystem dahingehend zu stützen, werden salutogene Arbeitsbedingungen, die eine Verlängerung der Lebenszeit in Gesundheit sowohl für Gepflegte als auch für Pflegende unterstützt, angestrebt [Hornung et al., 2013]. Hierbei ist auf die Muskel-Skelett-Belastungen zu verweisen, die während der Pflegetätigkeit auf den Körper der Pflegenden wirken und folglich als einer der Hauptgründe für hohe Fehltage sowie den Austritt aus dem Beruf vor dem Renteneintrittsalter zu bezeichnen sind [Glaser et al., 2005; DAK, 2015; Weißert-Horn et al., 2014]. Manuelles Bewegen der Gepflegten führt zu hohen mechanischen Belastungen im unteren Rückenbereich und ist somit als Risikofaktor zu charakterisieren [Glaser et al., 2005; DAK, 2015; Weißert-Horn et al., 2014]. Besonders falsch ausgeführte Bewegungsabläufe führen zu gesundheitlichen Problemen [DAK, 2015].

Am Beispiel von Patiententransfers wird deutlich, dass diese aufgrund der zur Ausführung notwendigen unterschiedlichen Beanspruchungen als gesundheitsgefährdende Faktoren zu betiteln sind. Langandauernde ungünstige Rumpfhaltungen sowie das Heben, Halten und Ziehen großer Anteile des Patientengewichts ohne die Verwendung von Hilfsmitteln wie beispielsweise Lifter oder kleinen Hilfsmitteln (z.B. Gleitmatte, Rutschbrett) führen dazu, dass die Bandscheiben der Pflegenden im Rahmen dieser Tätigkeit mit bis zu 9 kN komprimiert werden [Jäger et al., 2014]. Dies liegt weit oberhalb anerkannter Dauerbeanspruchungsgrenzwerte [Jäger et al., 2014]. Werden hingegen kleine Hilfsmittel für die pflegerische Tätigkeit verwendet, ist eine deutliche Verringerung der Kompressionskräfte von 9 kN auf knapp 2,5 kN für das Höherlagern von pflegebedürftigen Personen vom Kopfende des Bettes aus zu verzeichnen [Jäger et al., 2014].

Aufgrund der Tatsache, dass trotz Verwendung kleiner Hilfsmittel im Pflegealltag die Belastungsgrenzen je nach Alter der pflegenden Person überschritten werden [Jäger et al., 2014], könnten zusätzliche technische Hilfsmittel womöglich eine verbesserte Unterstützung bieten. Dennoch werden im Pflegealltag bestimmte konventionelle Unterstützungssysteme wie beispielsweise Lifter bzw. Deckenliftersysteme aufgrund der umständlichen Anwendung häufig nicht zur Minderung körperlicher Belastungen in Anspruch genommen [Lutze, 2017]. Während Lifter zwar das Potential bergen, den Rücken der Pflegekraft vollständig zu entlasten, stellt das Manövrieren dieser Lifter - nicht zuletzt aufgrund ihrer unhandlichen Maße - eine große Hürde dar. Trotz des Versuchs, bestehende Lifter zu verbessern [Dantanarayana et al., 2014; Ranasinghe et al., 2014], umfasst die Verwendung solcher Systeme gerade in Bezug auf die Verfügbarkeit, Zeit und Unterstützungsszenarien einige Nachteile. Zudem existieren robotische Ansätze zur physischen Entlastung von pflegenden Personen, wobei diese meist in Form von Exoskeletten realisiert werden [Kawamoto et al., 2003]. Diese Augmentierungen wiederum bieten allerdings den Nachteil, dass sie während der gesamten Arbeitsschicht getragen und robust funktionieren müssen. Um auch den negativen Aspekten von Exoskeletten entgegenzuwirken, wurde ein robotisches Assistenzsystem am aktuierten Pflegebett mithilfe eines montierten Leichtbauroboters (Kuka LBR iiwa 7) an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg in Zusammenarbeit mit dem OFFIS - Institut für Informatik realisiert, welches sowohl der Pflegekraft als auch dem Pflegebedürftigen durch physische Unterstützung eine Hilfe sein kann. Der Vorteil des vorliegenden Systems "STARC - Supportive Transfer Robot for Caregivers" (siehe Abb. 1) liegt darin, dass einerseits der Roboter die Funktion einer/es zusätzlichen Hand/Arms einnehmen kann und der Pflegekraft somit mehr Bewegungsfreiheiten bei Routinetätigkeiten bleiben, andererseits kann das System durch weitere Szenarien wie beispielsweise dem Halten oder Anreichen wichtiger Utensilien erweitert werden und ist somit nicht auf den Transfer des Patienten beschränkt. Für die vorliegende Studie beschränken sich die Funktionalitäten von STARC auf die Unterstützung während des Höherlagerns, bei dem die Unterstützungsbewegungen mit einer vordefinierten Kraft - limitiert durch die maximal zulässigen Drehmomente an den einzelnen Achsen des Leichtbauroboters - durchgeführt werden.



Abb. 1: Aufbau des Aufnahmeszenarios mit Leichtbauroboter, Pflegebett und 3D-Tiefenkamera-System.

Hinzuzufügen ist, dass die Prinzipien der Kinästhetik in Kontexten der Technologieentwicklung (zum Beispiel Krafterückmeldung in virtuellen Umgebungen oder bei OP-Robotern [Kassner, 2013]) berücksichtigt werden sollten. Sowinski et al. empfehlen Prinzipien der Kinästhetik auch in technisch gestützten Zusammenhängen der Mobilisation zu integrieren [Sowinski et al., 2013]. Interdisziplinäres Ziel der Kinästhetik ist die Sensibilisierung von Bewegungswahrnehmung (Kinästhesie) und die lebenslange Entwicklung von Bewegungskompetenz [Marty-Teuber & Knobel, 2018]. Für Mobilisations- und Transferaktivitäten wird das empfohlene Konzept der Kinästhetik im Berufsalltag der beruflichen Pflege jedoch häufig nicht konsequent verwendet [Enke, 2014]. Hinzu kommt, dass die Belastung der unteren Extremität im Kontext rückenentlastender Pflege trotz der Tatsache, dass diese für die Tätigkeiten, die ein seitliches Drehen „aus den Beinen heraus“ erfordern wie beispielsweise der Patiententransfer vom Bett zum Stuhl oder das Höherlagern von der Längsseite sowie der Kopfseite des Bettes, entscheidend ist, zum derzeitigen Stand unerforscht ist [AOK, 2018; Caritas, 2018; DAK, 2018; BGW, 2017]. Die Relevanz spezifischer Muskeln der unteren Extremität für den Patiententransfer sowie das Höherlagern soll im Rahmen der geplanten Studie eruiert und in den Kontext zu auftretenden Belastungen gesetzt werden. Der Fokus wird hierbei auf die Oberschenkelregion in Relation zur Rückenmuskulatur (Lendenwirbelsäule) und Gesäßmuskulatur gesetzt.

Die untere Extremität besteht zu einem Anteil von mehr als 50% der Skelettmuskulatur, wovon der überwiegende Teil in der Oberschenkelregion angelagert ist [Schweitzer et al., 2015; Lee et al., 2004]. Der Musculus quadriceps femoris setzt sich aus den folgenden vier Muskelköpfen zusammen (siehe Abb. 2) und befindet sich an der Vorderseite des Oberschenkels: Musculus rectus femoris, Musculus vastus medialis, Musculus vastus intermedius, Musculus vastus lateralis.

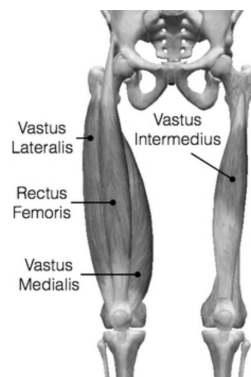
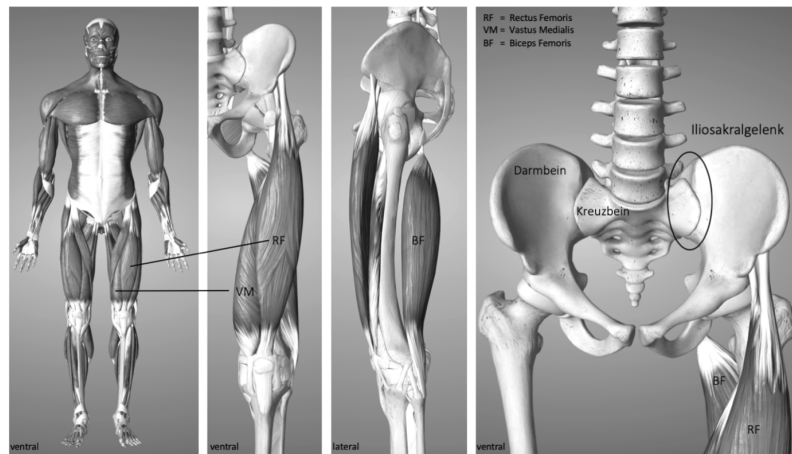


Abb. 2: Die vier Muskelköpfe des M. quadriceps femoris.

Jeder Muskel übernimmt verschiedene Aufgaben, erfüllt jedoch hauptsächlich im Verbund Bewegungs- und Haltefunktionen [Zervos-Kopp, 2009]. Die Hauptaufgaben des M. quadriceps femoris bestehen in der Streckung des Kniegelenks sowie der Hüftbeugung, die beispielsweise entscheidend für alltägliche Prozesse wie das Aufstehen von einem Stuhl sind



[Mansfield et al., 2009]. Die Tatsache, dass der M. quadriceps femoris direkt mit dem Becken über den M. rectus femoris verbunden ist (siehe Abb. 3), verdeutlicht den Einfluss dieser Muskelgruppe auf die Lendenwirbelsäule und damit die Relevanz dessen für rückschonende Pflgetätigkeiten. Die Sehne des M. rectus femoris hat dabei ihren proximalen Ursprung am Becken (siehe Abb. 3) und endet distal am Tuberositas Tibiae (rauer Knochenfortsatz am proximalen Ende der vorderen Schienbeinkante). Die direkte Verbindung von Darmbein und Kreuzbein ist das Iliosacralgelenk (Kreuzdarmbeingelenk) (siehe Abb. 3, rechts). Das Becken ist über das Iliosacralgelenk mit der Lendenwirbelsäule verbunden (siehe Abb. 3, rechts). Über das Iliosacralgelenk wird das gesamte Gewicht des Oberkörpers auf die Hüftgelenke und von dort an die untere Extremität verteilt.

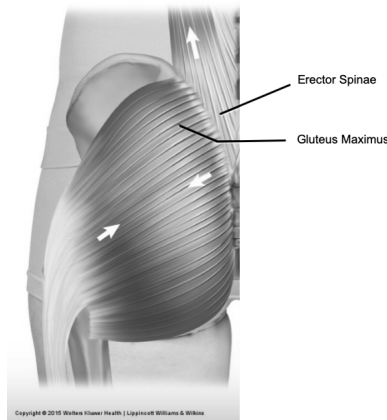


**Abb. 3:** Darstellung der Skelettmuskulatur. Links: ventrale Ansicht der Skelettmuskulatur des menschlichen Körpers (männlich). Mitte: ventrale und laterale Ansicht der Muskeln des Oberschenkels (Vastus Medialis (VM) und Rectus Femoris (RF), ventral – Biceps Femoris (BF), lateral). Rechts: ventrale Ansicht der Hüfte und Lendenwirbelsäule sowie Sehnenursprung von BF und RF.

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass sich der M. quadriceps femoris häufig aufgrund der stetig zunehmenden sitzenden Lebensweise der deutschen Bevölkerung verkürzt [Erb, 2018]. Dadurch steigt die Spannung dieser Muskelgruppe in aufrechter Position. Blockaden im Iliosacralgelenk sowie Schmerzen in der Lendenwirbelsäule sind die Folge, da sowohl die Beweglichkeit des Beckens als auch des Hüftgelenkes durch eine Verkürzung der genannten Muskelgruppe eingeschränkt sind [Erb, 2018]. Durch die Verbindung des M. rectus femoris mit dem Becken werden bei Hüftbeugung Torsionskräfte auf das Iliosacralgelenk übertragen [Hammer et al., 2015]. Es ist anzunehmen, dass eine erhöhte Aktivität dieses Muskels zu Schmerzen im Iliosakralgelenk führen kann [Hammer et al., 2015]. Hierbei ist auf den Schubmodul zu verweisen, der als eine Materialkonstante die mechanischen Eigenschaften des Muskels gegenüber einer Torsion (Verdrehung) beschreibt. Je höher der Schubmodul, desto größer die Steifigkeit des Muskels und desto mehr Widerstand gegenüber einer auftretenden Torsion. Der Schubmodul des M. rectus femoris sinkt mit steigendem Alter,

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

so dass dieser Muskel weniger Widerstand gegenüber auftretenden Torsionskräften entgegenbringen kann [Akagi et al., 2015].



**Abb. 4:** Dorsale Darstellung der großen Gesäßmuskulatur (M. gluteus maximus) und Rückenmuskulatur (M. erector spinae) der linken Körperhälfte.

Darüber hinaus sind der M. gluteus maximus (siehe Abb. 4) als großer Gesäßmuskel sowie der M. biceps femoris (siehe Abb. 3) bedeutend für die Entlastung der Wirbelsäule. Der M. gluteus maximus ist unter anderem aufgrund seiner Funktion der Streckung und Stabilisierung des Oberschenkels mitverantwortlich für den aufrechten Gang. Der M. biceps femoris unterstützt dabei die Kniebeugung und Hüftstreckung. Die Hauptfunktion der Rückenmuskulatur M. erector spinae (siehe Abb. 4) ist die Aufrichtung der Wirbelsäule und die aufrechte Haltung des Kopfes.

Das Ziel der Studie ist die Analyse der folgenden Hypothesen:

**Hypothese 1:**

Durch Anwenden eines Roboterarms zur Unterstützung eines Pflegetransfers (Höherlagern Längsseite und Kopfseite des Bettes) werden die durch den Pflegenden maximal aufgebrauchten Kräfte in der Bewegungsphase entlang der Längsseite des Bettes verringert. Es ergeben sich signifikante Unterschiede hinsichtlich der am Probanden gemessenen Werte bei:

- a) Automatisierter Roboterunterstützung  
Der Roboterarm folgt automatisiert einem vorgegebenen Bewegungsmuster und wird durch Kraftsensorik geregelt.
- b) Telemanipulierter Roboterunterstützung  
Der Roboterarm wird live von einem Studienorganisator ferngesteuert und kann innerhalb der Möglichkeiten des Roboters beliebig bewegt werden. Die Werte der Kraftsensorik werden von den Studienorganisatoren überwacht.

**Hypothese 2:**

Anhand der Sensordaten ist ein charakteristischer Ablauf des ausgeführten Pflegeszenarios sowie der Zusammenhang zwischen auftretender Belastungen und beanspruchter Muskeln erkennbar.

**Hypothese 3:**

Die maximal aufgebrauchten Kräfte im Rahmen der Pflegehandlung korrelieren mit den Messwerten der Handkraft, des Chair Rise Tests und des Sit-To-Stand Tests.

Sowohl auftretenden Bodenreaktionskräfte als auch die Muskelaktivierungen werden in Bezug zu Haltungen bzw. Bewegungen des/der Pflegenden beim Patiententransfer gesetzt. Auf Basis dieser Daten kann geprüft werden, ob aufgrund der Haltung und Bewegungen des/der Pflegenden sowie Beobachtung des Patienten Situationen mit hohen Belastungen bzw. Situationen mit Unterstützungsbedarf erkannt werden können.

**Methoden**

Während des geplanten Forschungsvorhabens wird eine Rettungspuppe als Ersatz für einen tatsächlichen Patienten genutzt. Diese Rettungspuppe weist ein Gewicht von ungefähr 80 kg auf, was dem durchschnittlichen Gewicht eines Patienten entspricht [Steinhäuser et al., 2014]. Ziel des Probanden ist es, die Rettungspuppe nach den Grundsätzen der Kinästhetik vom Fußende eines Pflegebettes in Richtung Kopfende zu transferieren.

Für die nicht-invasive Messung der auftretenden Kräfte sowie der Aufzeichnung der Muskelaktivität werden verschiedene Sensormodalitäten eingesetzt. Die Messungen sowie die qualitative und quantitative Analyse und Bewertung der Pflegeaktivitäten erfolgt dabei in einer Laborumgebung, die jedoch einem Standard-Pflegeheimzimmer nachgebildet ist. In dieser Umgebung sind die folgenden integrierten Sensorsysteme vorhanden:

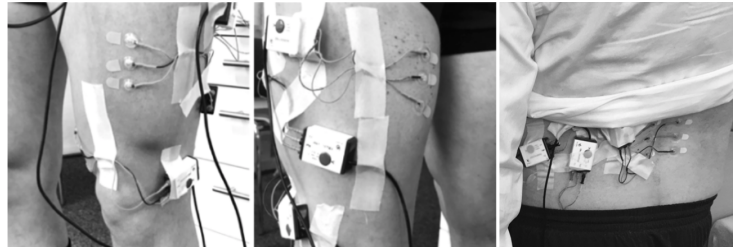
> Kraftmessplatte

Eine Kraftmessplatte (Ground-Reaction-Force-Plate) wird zur zeitlich hochauflösenden Messung der während der ausgeübten Pflegeaktivitäten über die Beine auf den Boden wirkenden Kräfte in den drei unterschiedlichen Raumrichtungen eingesetzt. Die Platte wird so vor dem Pflegebett platziert, dass der/die Pflegenden den Transfer auf der Platte ausführen kann. Mit diesen Daten und den Gewichtsdaten des Probanden sowie des Gepflegten ist ableitbar, welche Handlung zur Reduktion oder Erhöhung der wirkenden Kräfte führen. Des Weiteren kann anhand der generierten Daten eruiert werden, wann welcher Muskel unter welcher Belastung beansprucht wird.

> EMG

Die zeitliche Aktivierung einzelner Muskeln der unteren Extremität sowie des Lendenwirbelbereichs wird bei den ausgeübten Pflegeaktivitäten über nicht-invasive Oberflächen-EMGs gemessen. Die Probanden werden für das Ausführen des Patiententransfers mit einem kommerziellen Oberflächen-Elektromyogramm (EMG)

verkabelt (siehe Abb. 5), um die elektrische Aktivität beanspruchter Muskeln der unteren Extremität (VM, RF, BF, M. gluteus maximus) sowie des Lendenwirbelbereichs (M. erector spinae) während des Pflegeprozesses aufzuzeichnen. Dadurch kann präzise bestimmt werden wann und wie stark welche Muskeln beansprucht werden. Die Vorbereitungs- und Datenaufnahmeprotokolle entsprechen dabei den Richtlinien der International Society of Electrophysiology and Kinesiology und SENIAM (Surface Electromyography for the Non-Invasive Assessment of Muscles) (Hermens, et al., 1999). **Zudem wird beim Anbringen der Elektroden auf der Haut auf das Geschlecht der auftragenden Person geachtet. Vor der Ausführung wird das Einverständnis des Probanden abgefragt, ob die auftragende Person ein Mann oder eine Frau sein soll.**



*Abb. 5: Anbringung der EMG-Elektroden auf der Hautoberfläche. Links: ventrolaterale Ansicht der Elektrodenplatzierung auf der Vorderseite des Oberschenkels (VM und RF). Mitte: Elektrodenplatzierung auf der Rückseite des Oberschenkels (BF, Ansicht posterior). Rechts: Elektrodenplatzierung Rückenmuskulatur Lendenwirbelbereich (M. erector spinae, Ansicht posterior).*

➤ **Kinect-System**

Um die Haltungen und Bewegungen einer Pflegekraft im Rahmen einer ausgeführten Tätigkeit zu analysieren, wird ein Multi-Kinect System eingesetzt. Aus diesen Daten lassen sich Skelettmodelle des/der Pflegenden zur weiteren Verarbeitung ableiten. Die Probanden werden während der Ausführung des Patiententransfers von 4 Tiefenkameras aufgezeichnet, welche es in den 3D-Aufnahmen ermöglichen den Blickpunkt jederzeit frei zu wählen. Dabei kann die 3D-Aufnahmen pausiert und vor- und zurückgespult werden. Diese Aufnahmen erlauben dem Probanden sowie den Kinästhetik-TrainerIn eine umfassende Analyse des Transfers.



*Abb. 6: 3D-Punktwolke des Multi-Kinect Systems.*

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

- Kinästhetik-Trainer  
Während des Transfers ist ein Kinästhetik-Trainer anwesend und begleitet den Transfer.
- Handkraft  
Ein Handdynamometer erfasst quantitativ die isometrische Maximalkraft des Faustschlusses der Pflegeschüler und dementsprechend der Unterarmmuskulatur. Die Handkraft korreliert mit der Muskelkraft der unteren Extremität [Mijnarends et al., 2013]. Es wird auf das Jamar Dynamometer zurückgegriffen, das sowohl validiert als auch weit verbreitet ist [Cruz-Jentoft et al., 2018].
- Chair Rise Test  
Der Chair Rise Test dient als Indikator der Kraft der unteren Extremität [Cruz-Jentoft et al., 2018]. Es wird die Zeit gemessen, die ein Proband benötigt, um fünfmal aus einer sitzenden Position aufzustehen ohne die Verwendung der Arme. Dieser Test wird ebenfalls unter der Nutzung des Kinect-Systems, der Kraftmessplatte, sowie des EMGs durchgeführt. Dementsprechend wird der Stuhl auf der Kraftmessplatte und im Sichtfeld der 4 Tiefenkameras positioniert.
- Sit-to-Stand Test  
Der Sit-To-Stand Test dient der Ermittlung der Leistungsfähigkeit der unteren Extremität [Strassmann et al., 2013]. Der Proband muss innerhalb von 60 Sekunden so oft wie möglich aus dem Sitzen aufstehen und sich wieder auf den Stuhl setzen. Die Arme werden vor der Brust verschränkt und dürfen nicht unterstützend eingesetzt werden. Dieser Test wird ebenfalls unter der Nutzung des Kinect-Systems, der Kraftmessplatte, sowie des EMGs durchgeführt. Dementsprechend wird der Stuhl auf der Kraftmessplatte und im Sichtfeld der 4 Tiefenkameras positioniert.

#### **Experimentelle Aufgaben**

Zunächst erfolgt die Messung der Handkraft sowie des Chair Rise Tests [Cruz-Jentoft et al., 2018] und des Sit-to-Stand Tests [Strassmann et al., 2013]. Daraufhin transferiert der jeweilige Proband eine Rettungspuppe, welche - dem Realfall entsprechend - beispielsweise während der Nacht zu weit in Richtung Fußende des Pflegebettes gerutscht ist und nun nicht ohne Fremdhilfe an die ursprüngliche Position gelangt. Der Transfer soll von Fuß- zu Kopfende erfolgen und beansprucht weniger als drei Minuten. Zunächst wird der Transfer ohne die Unterstützung des Roboters durchgeführt, wodurch die Referenzdaten für den Entlastungsvergleich aufgenommen werden. Bei der nächsten Iteration unterstützt der Roboter durch das Aufbringen einer vordefinierten Kraft auf die Rettungspuppe entlang eines vordefinierten Weges, wobei der Startpunkt der Bewegung durch die Handposition des Probanden vorgegeben wird. Im letzten Durchgang kriegt der Roboter keine Vorgaben, sondern wird vielmehr von einer geübten Person während des Transfers ferngesteuert und soll dadurch bei der Tätigkeit entlasten.

### **Durchführung**

Die Studie wird im Pflegeheimlabor der Universität Oldenburg durchgeführt. Bei der Aufnahme eines Probanden sind sowohl die Mitarbeiter der Universität Oldenburg und mindestens ein Kinästhetik-Trainer anwesend. Zu Beginn der Studie werden die EMG-Elektroden auf der Haut des jeweiligen Probanden geklebt (Oberschenkel, Gesäßmuskulatur, Lendenwirbelsäule, siehe Abb. 5). **Beim Anbringen der Elektroden auf der Haut wird auf das Geschlecht der auftragenden Person geachtet. Es wird das Einverständnis des Probanden abgefragt, ob die auftragende Person ein Mann oder eine Frau sein soll.** Zudem besteht die Möglichkeit die Gerätschaften räumlich getrennt von allen anderen Personen anzulegen. Vor Ausführung des Pflegeszenarios wird bei jedem Probanden die Handkraft der dominanten Hand mit Hilfe des oben beschriebenen Handdynamometers erfasst und notiert. Die Messung erfolgt im Stehen während der Arm seitlich am Körper gehalten und das Ellbogengelenk um 90 Grad gebeugt wird. Zudem erfolgt die Durchführung des Chair Rise Tests. Der jeweilige Proband befindet sich sitzend auf einem Stuhl ohne Armlehnen auf der Kraftmessplatte und hält die Arme verschränkt vor dem Oberkörper. Es wird die Zeit gestoppt, die der Proband benötigt, um fünfmal aus der sitzenden Position aufzustehen ohne die Arme zu verwenden. Die Geschwindigkeit, mit der der Proband von dem Stuhl aufsteht, darf selbst bestimmt werden. Nach Abschluss des Chair Rise Tests absolviert der Proband den Sit-to-Stand Test. Auch hierfür befindet sich der Proband sitzend auf einem Stuhl ohne Armlehnen auf der Kraftmessplatte. Innerhalb von 60 Sekunden muss der Proband so häufig wie möglich aus dem Sitzen aufstehen und sich wieder setzen. Die Arme werden dabei vor der Brust gekreuzt und dürfen nicht zur Unterstützung eingesetzt werden. Die Geschwindigkeit, mit der der Proband von dem Stuhl aufsteht, darf selbst bestimmt werden. In der Sitzposition sollen die Knie des Probanden etwa in einem Winkel von 90° sein. Beim Aufstehvorgang sollten die Knie vollständig gestreckt werden. Die Anzahl der in der vorgegeben Zeit von 60 Sekunden absolvierten Aufstehvorgänge werden notiert.

Nach Abschluss der Tests zur Muskelkraft der unteren Extremität erfolgt die Ausführung des Pflegeszenarios. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, die Puppe vom Fußende zum Kopfende zu transferieren. Während des Transfers befindet sich der jeweilige Proband die ganze Zeit über auf einer Kraftmessplatte, welche vor dem Pflegebett platziert wird. Vier Tiefenkameras erstellen während der Handlung eine 3D-Aufnahme des Transfers (siehe Abb. 6). Sobald der Transfer beendet ist, wird der Roboterarm (siehe Abb. 1) für den jeweiligen Einsatz (Transfer mit Roboter auf einem vordefinierten Weg und Transfer mit ferngesteuertem Roboter) mit demselben Probanden, bei gleicher Aufgabenstellung vorbereitet.

### **Auswertung**

Für die Betrachtung der Kräfte werden während der Transferaufgaben mit der robotischen Unterstützung einerseits kontinuierlich mithilfe der vor dem Pflegebett platzierten Kraftmessplatte die Bodenreaktionskräfte gemessen, andererseits ist der für die Unterstützung verwendete Leichtbauroboter in allen Gelenken mit Drehmomentsensoren ausgestattet. Diese Sensoren werden ebenfalls für die Feinfühligkeit des Roboters genutzt, da hierüber die Kraftübertragung geregelt wird. Nach Durchführung der Tätigkeiten sollen die Bodenreaktionskräfte zusammen mit den am Roboter wirkenden Kräften in Relation gebracht und verglichen werden, um so Rückschlüsse auf die tatsächliche Entlastung zu ziehen.

Für die Muskelaktivitätsmessung werden neben der Betrachtung der abgeleiteten und wirkenden Kräfte EMG-Sensoren an der hauptsächlich beteiligten Muskulatur (unterer Rücken, Oberschenkel) platziert. Durch die gemessenen elektrischen Potentiale wird die

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

Aktivität der Umgebungsmuskulatur bei Kontraktionen ermittelt. Über diese Daten kann dann gegebenenfalls zusätzlich eine Entlastung bei robotischer Unterstützung ermittelt werden. Darüberhinaus besteht die Möglichkeit, dass sich durch die Unterstützung das Kontraktionsmuster der Muskeln verändert, da die Transfertätigkeit in abgewandelter Form durch die externe Hilfe eines Roboters durchgeführt wird. Weiterhin werden die mithilfe der Kraftmessplatte, des EMGs sowie der Tests zur Ermittlung der individuellen Kraft der unteren Extremität (Handkraftmessung, Chair Rise Test, Sit-to-Stand Test) generierten Daten analysiert, um die für die jeweiligen Szenarien relevanten Muskeln des Oberschenkels in den Kontext zu auftretenden Belastungen zu setzen.

Final wird die Körperhaltung der Probanden durch das aufgebaute 3D-Tiefenkamera-System erfasst und kann zusätzlich in die Analyse der Muskelaktivitäten und der Kräfte einfließen. Gerade bei Inkonsistenzen der Ergebnisse kann die Körperhaltung als zusätzliche Analysequelle genutzt werden, um mögliche Veränderungen in der Haltung zwischen den einzelnen Tätigkeiten ausfindig zu machen.

#### **Körperliche Beanspruchung**

Die auftretende Beanspruchung ist für den Probanden erheblich unter der alltäglichen Belastung im Beruf und daher angemessen. Der Transfer wird von jedem Probanden dreimal durchgeführt (Transfer mit Roboter auf einem vordefinierten Weg und Transfer mit ferngesteuertem Roboter) und dauert jeweils weniger als drei Minuten.

#### **Mentale Beanspruchung**

Es wird keine mentale Beanspruchung erwartet.

#### **Preisgabe persönlicher Informationen**

- > Geschlecht
- > Alter
- > Gewicht

#### **Täuschung und Aufklärung**

Es wird nicht mit Täuschung gearbeitet.

### **5. Angaben zu Aufzeichnung, Aufbereitung, Speicherung und Löschung der Daten**

#### **Personenbezogene Daten**

Über Interviews werden das Alter in Jahren sowie das Geschlecht ermittelt. Das Körpergewicht der Probanden wird indirekt über die Verwendung der Kraftmessplatte ermittelt.

#### **Datenschutz**

Für jeden Probanden wird eine Datei mit einem Codenamen angelegt, welche Alter, Geschlecht und Gewicht beinhaltet.

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

Die Daten des EMGs und der Kraftmessplatte sowie der Handkraftmessung und des Chair Rise Tests und Sit-to-Stand Tests lassen keine Rückschlüsse auf die Identität der Person zu. Diese werden der Datei hinzugefügt.

Die 3D-Daten des Tiefenkamera-Systems können bei aktivierter Einfärbung der 3D-Daten Rückschlüsse auf die Identität der Person zulassen. Zur weiteren Verarbeitung nach Durchführung der Studie werden diese Farbinformationen gelöscht, womit die 3D-Daten sich auf eine aus grauen Punkten bestehende Punktwolke beschränken, die keine Rückschlüsse auf die Identität zulässt. Die Farbinformationen werden nur als Hilfestellung während der Auswertung vor Ort für die Probanden und die Pflegelehrer vorübergehend benutzt. Auch in der farbigen Punktwolke ist das Erkennen von Gesichtern nahezu unmöglich, da die Auflösung zu gering ist.

#### **Löschung der Daten**

Die Daten der Probanden werden im CloudStorage der Universität Oldenburg abgespeichert und sind dort nach guter wissenschaftlicher Praxis mindestens 10 Jahre zu verwahren.

### **6. Gewinnung der Personenstichprobe und Vergütung von Probanden**

#### **Rekrutierung**

Die Probanden werden durch aktives Ansprechen früherer Studienpartner rekrutiert. Dabei wird auf die evangelischen Altenpflegeschule Oldenburg, den christlichen Pflegedienst Bramsche und die Johanniter Unfallhilfe e.V. in Oldenburg zurückgegriffen. Die Verantwortlichen der jeweiligen Institutionen geben die Informationen zur Studie an ihre Schüler bzw. Mitarbeiter weiter. Zudem werden Kontakte zu möglichen Probanden über den Kinästhetik-Trainer geknüpft.

#### **Personenstichprobe aus Datenbank**

Entfällt.

#### **Merkmale der Personenstichprobe**

Die Probanden sind 18 bis 60 Jahre alt. Angestrebt wird eine Gruppe von maximal 30 Personen (die biometrische Beratung wurde beantragt), die den Transfer durchführen sollen, sowie mindestens ein Kinästhetik-Trainer oder Physiotherapeut.

#### **Einschluss- und Ausschlusskriterien**

Körperlich beeinträchtigte Personen, denen der Pflge-transfer nicht zuzumuten ist, werden nicht mit einbezogen. Zudem sind verminderte kognitive Fähigkeiten oder sprachliche Barrieren, die zu einer Unfähigkeit führen die Studieninhalte und den Studienablauf zu verstehen, weitere Ausschlusskriterien.

#### **Teilnahmevergütung**

Die Probanden nehmen freiwillig an der Studie teil und erhalten keine Vergütung.



EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

## 7. Freiwilligkeit der Teilnahme und Rücktritt

### Freiwilligkeit

Die Studienteilnahme ist freiwillig. Die potentiellen Teilnehmer werden mindestens eine Woche vor dem geplanten Termin über die Studie informiert. Eine Benachteiligung bei Nicht-Teilnahme findet nicht statt. Für die Pflegelehrer gelten die gleichen Konditionen. Auch ihnen entsteht kein Nachteil durch Verweigerung der Teilnahme.

### Rücktritt

Ein Rücktritt ist jederzeit für alle Beteiligten möglich. Der Wunsch auf Löschung der Daten kann jederzeit kommuniziert werden. Die Löschung findet innerhalb eines Tages statt.

## 8. Informiertheit und Einwilligung

### Informiertheit

Das Prinzip der vollständigen Informiertheit ist gewahrt. Der Proband wird über das Wesen und das Risiko der Studie im Informationsblatt aufgeklärt. Eine Täuschung findet nicht statt.

### Einwilligung

Nach Information der Probanden wird deren Einwilligung eingeholt. Die Einwilligungserklärung enthält alle notwendigen Bestandteile (Freiwilligkeit, Informiertheit, volles Verständnis, Rücktrittsmöglichkeit ohne Nachteile, Unterschriften).

### Bild- und Tonaufnahmen

Es finden keine Tonaufnahmen statt. Für die 3D-Aufnahmen wird eine gesonderte Einwilligungserklärung ausgehändigt.

Oldenburg, 08.10.2019

Ort, Datum

  
Unterschrift Antragsteller

## Literatur

**Akagi R, Yamashita Y, Ueyasu Y, 2015.** Age-Related Differences in Muscle Shear Moduli in the Lower Extremity. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2015.07.011

**Al-Abtah J, Ammann A, Bensch S (2015).** I care – Pflege. DOI: 10.1055/b-00000131

**AOK (2018).** Rückengerechtes Arbeiten: Alle Möglichkeiten nutzen. Online unter: [https://www.aok-gesundheitspartner.de/rh/vigo\\_pfleger/gesund\\_und\\_aktiv/ruecken/rueckengerecht/index.html](https://www.aok-gesundheitspartner.de/rh/vigo_pfleger/gesund_und_aktiv/ruecken/rueckengerecht/index.html). Zugriff: 04.12.2018

**BGW – Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege.** *Starker Rücken – Ganzheitlich vorbeugen, gesund bleiben in Pflegeberufen*, 2017. [https://www.bgw-online.de/SharedDocs/Downloads/DE/Medientypen/BGW%20Broschueren/BGW07-00-000\\_Starker%20Ruecken\\_bf\\_Download.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bgw-online.de/SharedDocs/Downloads/DE/Medientypen/BGW%20Broschueren/BGW07-00-000_Starker%20Ruecken_bf_Download.pdf?__blob=publicationFile), Zugriff: 27.07.2019

**DAK, 2018.** Pflege zu Hause. Praktische Hinweise und Anregungen. Online unter: [http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/15069/pdf/W406\\_5007\\_Pflege\\_zu\\_Hause.pdf](http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/15069/pdf/W406_5007_Pflege_zu_Hause.pdf). Zugriff: 04.12.2018

**DAK, 2015.** DAK-Pflege-Report 2015. So pflegt Deutschland. [https://www.dak.de/dak/download/Pflegereport\\_2015-1701160.pdf](https://www.dak.de/dak/download/Pflegereport_2015-1701160.pdf) (Zugriff: 03.05.2016).

**Erb H., 2018.** Dehnung M. quadriceps femoris. Online unter: <https://www.haralderb.de/dehnung-musculus-quadriceps-femoris/>. Zugriff: 06.12.2018

**Dantanarayana, L., Ranasinghe, R., Tran, A., Liu, D., & Dissanayake, G. (2014, October).** A Novel Collaboratively Designed Robot to Assist Carers. In *International Conference on Social Robotics* (pp. 105-114). Springer, Cham.

**Enke, A.** "Kinaesthetics: Die Verbindung von Bewegung und Beziehung," *KONTEXT*, no. 4, pp. 402–415, 2014.

**Glaser, J., & Höge, T. (2005).** Probleme und Lösungen in der Pflege aus Sicht der Arbeits- und Gesundheitswissenschaften. Baur.

**Hammer N, Möbius R, Schleifenbaum S, Hammer KH, Klima S, Lange JS, Soisson O, Winkler D, Milani TL, 2015.** Pelvic Belt Effects on Health Outcomes and Functional Parameters of Patients with Sacroiliac Joint Pain. DOI: 10.1371/journal.pone.0136375

**Hermens, H. J., Freriks, B., Merletti, R., Stegeman, D., Blok, J., Rau, G., . . . Haegg, G. (1999).** European recommendations for surface electromyography – results of the seniam project. Roessingh Research Development.

**Hielscher V, Kirchen-Peters S, Nock L, 2017.** Pflege in den eigenen vier Wänden: Zeitaufwand und Kosten. Pflegebedürftige und ihre Angehörigen geben Auskunft. Hans-Böckler-Stiftung. ISBN 978-3-86593-272-3

**Jäger M, Jordan C, Theilmeier A, Wortmann N, Kuhn S, Nienhaus A, Luttmann A, 2014.** Analyse der Lumbalbelastung beim manuellen Bewegen von Patienten zur Prävention biomechanischer Überbelastung von Beschäftigten im Gesundheitswesen. DOI: 10.1007/s40664-013-0010-4

**Kassner, S.** "Haptische Mensch-Maschine-Schnittstelle für ein laparoskopisches Chirurgie-System," 2013.

**Kawamoto, H., Lee, S., Kanbe, S., & Sankai, Y. (2003, October).** Power assist method for HAL-3 using EMG-based feedback controller. In *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE*

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483) (Vol. 2, pp. 1648-1653). IEEE.

**Lee SJ, Janssen I, Heymsfield SB, Ross R.** 2004. Relation between whole- body and regional measure of human skeletal muscle. *Am J Clin Nutr* 2004;80:1215–21

**Lutze, M.** "Digitalisierung: Wo steht die Pflege?," *Heilberufe / Das Pflegemagazin*, no. 7–8, pp. 45–47, 2017.

**Mansfield PJ, Neumann DA.** 2009. *Essentials of Kinesiology for the Physical Therapist Assistant.* MOSBY Elsevier, St Louis.

**Nowossadeck S, Engstler H, Klaus D,** 2016. *Pflege und Unterstützung durch Angehörige.* Deutsches Zentrum für Altersfragen. Report Altersdaten. Heft 1/2016

**Marty-Teuber, S.;** Knobel, S.; EKA (Hrsg.) (2018): *Kybernetik und Kinästhetik.* Lehrmittel-Verlag European Kinaesthetics Association (EKA), Linz / verlag lebensqualität, Siebnen. ISBN: 978-3-903180-22-2 (Lehrmittel-Verlag EKA), ISBN: 978-3-906888-02-6 (verlag lebensqualität).

**Ranasinghe, R., Dantanarayana, L., Tran, A., Lie, S., Behrens, M., & Liu, L.** (2014, December). Smart hoist: An assistive robot to aid carers. In *2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)* (pp. 1285-1291). IEEE.

**Schweitzer L, Geisler C, Pourhassan M, Braun W, Gluer CC, Bony-Westphal A, Muller MJ.** What is the best reference site for a single MRI slice to assess whole-body skeletal muscle and adipose tissue volumes in healthy adults? *Am J Clin Nutr* 2015;102:58–65.

**Sowinski, C., Kirchen-Peters, S. and Hielscher, V.** "Praxiserfahrungen zum Technikeinsatz in der Altenpflege," Kuratorium Deutsche Altershilfe - Wilhelmine-Lübke Stiftung e.V., Berlin, Deutschland, 2013.

**Steinhäuser, R. R. T., Wigge, R., & an der Hochschule Fresenius, H. L.** (2014, April). Aktuelle Fragen der Rechnungs- und Wirtschaftlichkeitsprüfung durch die Kassenärztlichen Vereinigungen. In *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren* (Vol. 186, No. S 01, p. MA\_WS301\_3)

**Strassmann, A., Steurer-Stey, C., Lana, K. D., Zoller, M., Turk, Al. J., Suter, P., Puhan, M. A.** (2013). Population-based reference values for the 1-min sit-to-stand test. *Int J Public Health*. DOI: 10.1007/s00038-013-0504-z.

**Zervos-Kopp J,** 2009. *Anatomie, Biologie und Physiologie.* ISBN 978 313 141 3529. Online unter: [https://bilder.buecher.de/zusatz/26/26556/26556869\\_lese\\_1.pdf](https://bilder.buecher.de/zusatz/26/26556/26556869_lese_1.pdf). Zugriff: 24.01.2017

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019  
Allgemeine Teilnehmerinformation über die Untersuchung



Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Department für Versorgungsforschung  
Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein  
0441 798 4450

Ansprechpartner für eventuelle Rückfragen:

Anna Brinkmann, Conrad Fífelski  
0441 798 4630

Christian Kowalski  
0441 9722 706

## **Allgemeine Teilnehmerinformation über die Untersuchung**

### ***Department für Versorgungsforschung***

#### **Titel der Studie:**

***Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung***

Herzlich willkommen bei unserer Studie "Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung"! Wir danken Ihnen für Ihr Interesse an dieser Studie.

Mit dieser Studie untersuchen wir zum einen die wirkenden Kräfte bei dem Transfer eines Patienten von Fuß- zu Kopfende des Bettes. Zum anderen wird analysiert, in welchem Maße ein am Bett angebrachter kooperierender Leichtbauroboter bei den anstrengenden Tätigkeiten physisch entlasten kann. Dabei wird das Entlastungspotenzial des Roboters bei zwei unterschiedlichen Steuerungsarten untersucht. In der ersten Steuerungsart unterstützt der Roboter durch vordefinierte Regeln auf eigenem Wege, in der zweiten Steuerungsart wird der Roboter durch eine geübte Person ferngesteuert.

Ein weiterer Schwerpunkt der Studie stellt die Eruierung der während des Patiententransfers beanspruchten Muskeln des Oberschenkels und des unteren Rückens durch ein kommerzielles Oberflächen-Elektromyografie (EMG) dar. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen auftretenden Belastungen und beanspruchter Muskeln analysiert.

### EMG

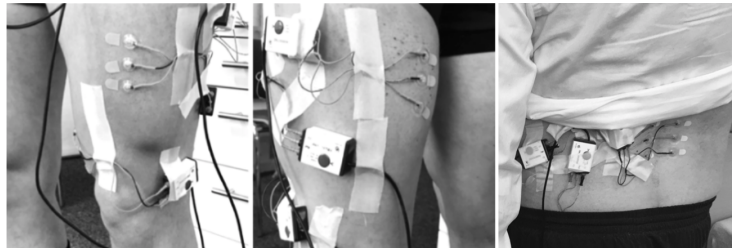
Im Rahmen der Studie werden wir bei Ihnen ein Elektromyogramm (EMG) aufzeichnen. Hierbei handelt es sich um die elektrische Aktivität von Muskeln, die an der Hautoberfläche gemessen werden kann. Das EMG wird mit Hilfe von Elektroden, die direkt auf der Hautoberfläche befestigt werden, aufgezeichnet.

Die Aufzeichnung des EMGs ist beim Menschen mit keinen Risiken verknüpft. Da die Potentialfelder der Muskeln an der Hautoberfläche schwach sind, ist es erforderlich, dass jede Stelle, an der eine Elektrode angebracht wird, mit Hilfe einer speziellen Paste und Alkohol gereinigt sowie gegebenenfalls rasiert wird. Der Kontakt zwischen Elektrode und Hautoberfläche wird über eine Elektrodencreme hergestellt. Die verwendeten Chemikalien sind klinisch getestet und lassen sich nach Abschluss des Experiments leicht entfernen. In seltenen Fällen können dennoch Hautirritationen auftreten, die noch für ein paar Tage sichtbar sein können (z.B. Rötungen). Bitte teilen Sie uns mit, falls Sie an bestimmten Hautallergien oder Überempfindlichkeiten der Haut leiden.

### Ablauf der Studie

Die Studie wird im Pflegeheimlabor der Universität Oldenburg durchgeführt. Bei der Aufnahme eines Probanden sind sowohl die Mitarbeiter der Universität Oldenburg und mindestens ein Kinästhetik-Trainer anwesend.

Zu Beginn der Studie werden die EMG-Elektroden auf der Haut des jeweiligen Probanden geklebt (Oberschenkel, Gesäßmuskulatur, Lendenwirbelsäule), um die Aktionspotentiale aktivierter Muskeln während des auszuführenden Pflegeszenarios zu erfassen:



Anbringung der EMG-Elektroden auf der Hautoberfläche.

Dadurch kann präzise bestimmt werden wann und wie stark welche Muskeln beansprucht werden. Es besteht die Möglichkeit die Gerätschaften räumlich getrennt von allen anderen Personen anzulegen. Zudem wird beim Anbringen der Elektroden auf der Haut auf das Geschlecht der auftragenden Person geachtet. Vor der Ausführung wird das Einverständnis des Probanden abgefragt, ob die auftragende Person ein Mann oder eine Frau sein soll. Vor Ausführung des Pflegeszenarios werden zudem Ihre Daten zu Geschlecht, Alter und Gewicht ermittelt. Daraufhin werden drei Tests zur Muskelkraft der unteren Extremität durchgeführt.

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

Allgemeine Teilnehmerinformation über die Untersuchung

Zunächst wird bei Ihnen die Handkraft der dominanten Hand mit Hilfe eines Handdynamometers erfasst und notiert. Das Handdynamometer erfasst qualitativ die Maximalkraft Ihres Faustschlusses und dementsprechend Ihrer Unterarmmuskulatur. Die Handkraft korreliert mit der Muskelkraft Ihrer unteren Extremität. Die Messung erfolgt im Stehen während Sie Ihren Arm seitlich am Körper halten und das Ellbogengelenk um 90 Grad beugen. Zudem erfolgt die Durchführung des sogenannten Chair Rise Tests. Hierfür sitzen Sie auf einem Stuhl ohne Armlehnen und halten Ihre Arme verschränkt vor dem Oberkörper. Es wird die Zeit gestoppt, die Sie benötigen, um fünfmal aus der sitzenden Position aufzustehen ohne die Arme zu verwenden. Die Geschwindigkeit, mit der Sie von dem Stuhl aufstehen, darf selbst bestimmt werden. In der Sitzposition sollen die Knie etwa in einem Winkel von 90° sein. Beim Aufstehvorgang sollten die Knie vollständig gestreckt werden. Nach Abschluss des Chair Rise Tests absolvieren Sie den Sit-to-Stand Test. Auch hierfür sitzen Sie auf einem Stuhl ohne Armlehnen. Innerhalb von 60 Sekunden stehen Sie so häufig wie möglich aus dem Sitzen auf und setzen sich wieder. Die Arme werden dabei vor der Brust gekreuzt und dürfen nicht zur Unterstützung eingesetzt werden. Die Geschwindigkeit, mit der Sie von dem Stuhl aufstehen, darf selbst bestimmt werden. In der Sitzposition sollen die Knie etwa in einem Winkel von 90° sein. Beim Aufstehvorgang sollten die Knie vollständig gestreckt werden. Nach Abschluss der Tests zur Muskelkraft der unteren Extremität erfolgt die Ausführung des Pflegeszenarios. Ihre Aufgabe besteht darin, eine Puppe (80 kg) vom Fußende eines Pflegebettes zum Kopfende zu transferieren. Während des Transfers befindet Sie sich die ganze Zeit über auf einer Kraftmessplatte, welche vor dem Pflegebett platziert wird. Vier Tiefenkameras erstellen während der Handlung eine 3D-Aufnahme von Ihnen. Sobald der Transfer beendet ist, wird die Handlung noch zweimal mithilfe des Roboters als Unterstützer durchgeführt. Im ersten Szenario handelt der Roboter nach vordefinierten Regeln und mobilisiert zusammen mit Ihnen den Patienten, im zweiten Szenario wird der Roboter durch eine eingetübte Person ferngesteuert. Während der drei unterschiedlichen Durchführungen werden kontinuierlich die Reaktionskräfte am Boden und über den Roboter gemessen.



*Pflegeszenario mit Leichtbauroboter, Pflegebett und Probandin.*

Sollten Sie noch Fragen haben, wenden Sie sich damit bitte an den Versuchsleiter.

### Freiwilligkeit und Anonymität

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit und ohne Angabe von Gründen die Teilnahme an dieser Studie beenden, ohne dass Ihnen daraus Nachteile entstehen.

Die im Rahmen dieser Studie erhobenen, oben beschriebenen Daten und persönlichen Mitteilungen werden vertraulich behandelt. So unterliegen diejenigen Projektmitarbeiter, die durch direkten Kontakt mit Ihnen über personenbezogene Daten verfügen, der Schweigepflicht. Des Weiteren wird die Veröffentlichung der Ergebnisse der Studie in anonymisierter Form erfolgen, d. h. ohne dass Ihre Daten Ihrer Person zugeordnet werden können.

### Datenschutz

Die Erhebung und Verarbeitung Ihrer oben beschriebenen persönlichen Daten erfolgt pseudonymisiert am Versuchsort, dem Pflegeheimlabor der Universität Oldenburg, unter Verwendung einer Nummer und ohne Angabe Ihres Namens. Es existiert eine Kodierliste auf Papier, die Ihren Namen mit der Nummer verbindet. Die Kodierliste ist nur den Versuchsleitern und dem Projektleiter zugänglich; das heißt, nur diese Personen können die erhobenen Daten mit meinem Namen in Verbindung bringen. Die Kodierliste wird in einem abschließbaren Schrank aufbewahrt und nach Abschluss der Datenauswertung, spätestens aber am 01.06.2020, vernichtet. Ihre Daten sind dann anonymisiert. Damit ist es niemandem mehr möglich, die erhobenen Daten mit Ihrem Namen in Verbindung zu bringen. Die anonymisierten Daten werden mindestens 10 Jahre gespeichert. Solange die Kodierliste existiert, können Sie die Löschung aller von Ihnen erhobenen Daten verlangen. Ist die Kodierliste aber erst einmal gelöscht, können wir Ihren Datensatz nicht mehr identifizieren. Deshalb können wir Ihrem Verlangen nach Löschung Ihrer Daten nur solange nachkommen, wie die Kodierliste existiert.

Als von der Datenverarbeitung Betroffene/r haben Sie die folgenden Rechte:

1. Sie können jederzeit unentgeltlich **Auskunft** über die zu Ihrer Person gespeicherten personenbezogenen Daten verlangen.
2. Liegen über Sie unrichtige personenbezogene Daten vor, können Sie jederzeit deren **Berichtigung** verlangen.
3. Sie können jederzeit die **Löschung** Ihrer personenbezogenen Daten verlangen.
4. Sie können jederzeit die **Einschränkung der Verarbeitung** Ihrer personenbezogenen Daten verlangen.
5. Sie können jederzeit der Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten **widersprechen**.
6. Sie haben das Recht, die Sie betreffenden personenbezogenen Daten, die Sie zur Verfügung gestellt haben, in einem strukturierten, gängigen und maschinenlesbaren Format zu erhalten, und Sie haben das Recht, diese Daten einem anderen Verantwortlichen ohne Behinderung durch den Verantwortlichen zu übermitteln, sofern die Verarbeitung auf einer Einwilligung oder auf einem Vertrag beruht und die Verarbeitung mithilfe automatisierter Verfahren erfolgt (**Recht auf Datenübertragbarkeit**).
7. Sie können eine ggf. Erteilte Einwilligung jederzeit mit Wirkung für die Zukunft **widerrufen**, ohne dass die Rechtmäßigkeit der aufgrund der Einwilligung bis zum Widerruf erfolgten Verarbeitung berührt wird.
8. Falls Sie der Ansicht sind, dass die Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten gegen Datenschutzvorschriften verstößt, wenden Sie sich bitte an die/den

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

Allgemeine Teilnehmerinformation über die Untersuchung

Datenschutzbeauftragte/n. Unabhängig hiervon haben Sie ein Recht auf **Beschwerde** bei der zuständigen Aufsichtsbehörde. Die zuständige Aufsichtsbehörde ist:

**Die Landesbeauftragte für den Datenschutz Niedersachsen**

Prinzenstraße 5  
30159 Hannover  
Telefon: 0511 120-4500  
Telefax: 0511 120-4599  
Email: [poststelle@fd.niedersachsen.de](mailto:poststelle@fd.niedersachsen.de)

Bei Fragen zu dem Schutz meiner Daten, kann ich mich an folgende Personen wenden:

**Projektleiter**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein  
Department für Versorgungsforschung  
Ammerländer Heerstraße 140, Oldenburg  
0441 798 4450  
[andreas.hein@uni-oldenburg.de](mailto:andreas.hein@uni-oldenburg.de)

**Datenschutzbeauftragter der Universität Oldenburg**

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Der Datenschutzbeauftragte  
Ammerländer Heerstr. 114-118  
26129 Oldenburg  
Tel.: 0441-798-4196  
E-Mail: [dsuni@uol.de](mailto:dsuni@uol.de) <https://www.uni-oldenburg.de/datenschutz/>

**Vergütung**

Für Ihre Teilnahme an der Studie gibt es keinen finanziellen Ausgleich. Es werden für Sie keine Kosten für die Teilnahme an der Studie entstehen.



EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019  
Einwilligungserklärung



Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Department für Versorgungsforschung  
Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein  
0441 798 4450

Ansprechpartner für eventuelle Rückfragen:

Anna Brinkmann, Conrad Fífelski  
0441 798 4630

Christian Kowalski  
0441 9722 706

## Einwilligungserklärung

*Department für Versorgungsforschung*

**Titel der Studie:**

***Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung***

Ich (Name des Teilnehmers /der Teilnehmerin in Blockschrift)

---

bin mündlich und schriftlich über die Studie und den Versuchsablauf aufgeklärt worden. Ich willige ein, an der Studie "Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung robotischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung" teilzunehmen. Sofern ich Fragen zu dieser vorgesehenen Studie hatte, wurden sie von Frau Brinkmann, Herrn Fífelski oder Herrn Kowalski vollständig und zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

Mit der beschriebenen Erhebung und Verarbeitung der Daten: Kraft auf Boden, 3D-Aufnahme und EMG-Daten eines kommerziellen Oberflächen EMGs bin ich einverstanden.

Die EMG-Elektroden sollen von

einer Frau  einem Mann

angebracht werden.

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019

Einwilligungserklärung

Die Aufzeichnung und Auswertung dieser Daten erfolgt pseudonymisiert im Pflegeheimlabor des Departments für Versorgungsforschung der Universität Oldenburg, unter Verwendung einer Nummer und ohne Angabe meines Namens. Es existiert eine Kodierliste auf Papier, die meinen Namen mit dieser Nummer verbindet. Diese Kodierliste ist nur den Versuchsleitern und dem Projektleiter zugänglich, das heißt, nur diese Personen können die erhobenen Daten mit meinem Namen in Verbindung bringen. Nach Abschluss der Datenauswertung, spätestens am 01.06.2020, wird die Kodierliste gelöscht. Meine Daten sind dann anonymisiert. Damit ist es niemandem mehr möglich, die erhobenen Daten mit meinem Namen in Verbindung zu bringen. Mir ist bekannt, dass ich mein Einverständnis zur Aufbewahrung bzw. Speicherung dieser Daten widerrufen kann, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen. Ich bin darüber informiert worden, dass ich jederzeit eine Löschung all meiner Daten verlangen kann. Wenn allerdings die Kodierliste bereits gelöscht ist, kann mein Datensatz nicht mehr identifiziert und also auch nicht mehr gelöscht werden. Meine Daten sind dann anonymisiert. Ich bin einverstanden, dass meine anonymisierten Daten zu Forschungszwecken weiterverwendet werden können und mindestens 10 Jahre gespeichert bleiben.

Als von der Datenverarbeitung Betroffene/r haben Sie die folgenden Rechte:

1. Sie können jederzeit unentgeltlich **Auskunft** über die zu Ihrer Person gespeicherten personenbezogenen Daten verlangen.
2. Liegen über Sie unrichtige personenbezogene Daten vor, können Sie jederzeit deren **Berichtigung** verlangen.
3. Sie können jederzeit die **Löschung** Ihrer personenbezogenen Daten verlangen.
4. Sie können jederzeit die **Einschränkung der Verarbeitung** Ihrer personenbezogenen Daten verlangen.
5. Sie können jederzeit der Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten **widersprechen**.
6. Sie haben das Recht, die Sie betreffenden personenbezogenen Daten, die Sie zur Verfügung gestellt haben, in einem strukturierten, gängigen und maschinenlesbaren Format zu erhalten, und Sie haben das Recht, diese Daten einem anderen Verantwortlichen ohne Behinderung durch den Verantwortlichen zu übermitteln, sofern die Verarbeitung auf einer Einwilligung oder auf einem Vertrag beruht und die Verarbeitung mithilfe automatisierter Verfahren erfolgt (**Recht auf Datenübertragbarkeit**).
7. Sie können eine ggf. Erteilte Einwilligung jederzeit mit Wirkung für die Zukunft **widerrufen**, ohne dass die Rechtmäßigkeit der aufgrund der Einwilligung bis zum Widerruf erfolgten Verarbeitung berührt wird.
8. Falls Sie der Ansicht sind, dass die Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten gegen Datenschutzvorschriften verstößt, wenden Sie sich bitte an die/den Datenschutzbeauftragte/n. Unabhängig hiervon haben Sie ein Recht auf **Beschwerde** bei der zuständigen Aufsichtsbehörde. Die zuständige Aufsichtsbehörde ist:

**Die Landesbeauftragte für den Datenschutz Niedersachsen**

Prinzenstraße 5  
30159 Hannover  
Telefon: 0511 120-4500  
Telefax: 0511 120-4599  
Email: [poststelle@lfd.niedersachsen.de](mailto:poststelle@lfd.niedersachsen.de)

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019  
Einwilligungserklärung

Bei Fragen zu dem Schutz meiner Daten, kann ich mich an folgende Personen wenden:

**Projektleiter**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein  
Department für Versorgungsforschung  
Ammerländer Heerstraße 140, Oldenburg  
0441 798 4450  
andreas.hein@uni-oldenburg.de

**Datenschutzbeauftragter der Universität Oldenburg**

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Der Datenschutzbeauftragte  
Ammerländer Heerstr. 114-118  
26129 Oldenburg  
Tel.: 0441-798-4196  
E-Mail: dsuni@uol.de <https://www.uni-oldenburg.de/datenschutz/>

**Zusatzvereinbarung für Bildaufnahmen**

Ich bin darüber informiert, dass Video- und Bildaufnahmen gemacht werden. Die Aufzeichnung und Auswertung der Video- und Bildaufnahmen erfolgt pseudonymisiert, d. h. unter Verwendung einer Nummer und ohne Angabe meines Namens und dass eine Kodierliste auf Papier existiert, die meinen Namen mit der Nummer verbindet. Die Kodierliste ist nur dem Versuchsleiter zugänglich und wird nach Abschluss der Datenerhebung gelöscht. Es besteht die sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass eine an der Datenauswertung beteiligte Person mich erkennt. Aus diesem Grund unterliegen alle an der Auswertung beteiligten Personen einer absoluten Schweigepflicht und dürfen unter keinen Umständen vertrauliche Informationen an Dritte weitergeben.

Mir ist bekannt, dass ich mein Einverständnis zur Aufbewahrung bzw. Speicherung dieser Daten widerrufen kann, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen. Die Video- und Bildaufnahmen werden in einem verschlossenen Schrank aufbewahrt. Ich bin darüber informiert worden, dass ich jederzeit eine Löschung meiner Aufnahmen verlangen kann, solange die Kodierliste existiert. Die Aufnahmen werden aber in jedem Fall nach Abschluss der Auswertung vernichtet.

Mit der beschriebenen Handhabung der erhobenen Aufnahmen bin ich einverstanden.

Ich gebe mein Einverständnis, dass meine Video- und Bildaufnahmen zu Demonstrationszwecken in teilnehmerbegrenzten Veranstaltungen (z. B. Lehrveranstaltungen) abgespielt werden. Zutreffendes bitte ankreuzen:

JA       NEIN.

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019  
Einwilligungserklärung

Die Einverständniserklärung für die Video- und Bildaufnahmen ist freiwillig. Ich kann diese Erklärung jederzeit widerrufen. Im Falle einer Ablehnung oder eines Rücktritts entstehen für mich keinerlei Kosten oder anderweitige Nachteile; eine Teilnahme an der Studie ist dennoch möglich.

Ich hatte genügend Zeit für eine Entscheidung und bin bereit, an der o.g. Studie teilzunehmen. Ich weiß, dass die Teilnahme an der Studie freiwillig ist und ich die Teilnahme jederzeit ohne Angaben von Gründen beenden kann.

Eine Ausfertigung der Teilnehmerinformation über die Untersuchung und eine Ausfertigung der Einwilligungserklärung habe ich erhalten. Die Teilnehmerinformation ist Teil dieser Einwilligungserklärung.

Ort, Datum & Unterschrift des Teilnehmers:

Name des Teilnehmers in Druckschrift:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ort, Datum & Unterschrift des Versuchsleiters:

Name des Versuchsleiters in Druckschrift:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Zusatzvereinbarung für künftige Kontaktaufnahmen im Rahmen dieser Studie**

Ich gebe mein Einverständnis, dass im Falle einer Fortführung dieser Studie oder von Anschlussstudien die Kodierliste weiterhin für die Dauer von fünf Jahren aufbewahrt wird und ich für Anschlussstudien kontaktiert werden darf. Mir ist bekannt, dass ich mein Einverständnis zur Aufbewahrung bzw. Speicherung dieser Daten widerrufen kann, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen. Ich bin darüber informiert worden, dass ich jederzeit eine Löschung all meiner Daten verlangen kann. Wenn allerdings die Kodierliste bereits gelöscht ist, kann mein Datensatz nicht mehr identifiziert und also auch nicht mehr gelöscht werden.

JA       NEIN.

EK-Antrag Prof. Hein, 10.09.2019  
Einwilligungserklärung

**Rückmeldung von Ergebnissen**

Ich bin daran interessiert, etwas über die grundsätzlichen Ergebnisse der Studie zu erfahren, und bitte hierzu um Übersendung entsprechender Informationen.

JA       NEIN.

Ort, Datum & Unterschrift des Teilnehmers:

Name des Teilnehmers in Druckschrift:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Bei Fragen oder anderen Anliegen kann ich mich an folgende Personen wenden:

<p><b>Versuchsleiter</b></p> <p>Anna Brinkmann, Conrad Fifelksi Ammerländer Heerstraße 140, Oldenburg 0441 798 4630 anna.brinkmann1@uol.de, conrad.fifelksi@uol.de</p> <p>Christian Kowalski Escherweg 2, Oldenburg 0441 9722 706 christian.kowalski@offis.de</p>	<p><b>Projektleiter</b></p> <p>Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein Ammerländer Heerstraße 140, Oldenburg 0441 798 4450 andreas.hein@uni-oldenburg.de</p>
---	--

Herr Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein  
Frau Anna Brinkmann  
Herr Conrad Fifelski  
Department für Versorgungsforschung  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Herr Christian Kowalski  
OFFIS e.V. - Institut für Informatik  
Escherweg 2  
26121 Oldenburg

**Kommission für Forschungs-  
folgenabschätzung und Ethik**

VORSITZ  
Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein

SACHBEARBEITUNG  
Katrin Müller  
Zentrales Gremienbüro

TELEFONDURCHWAHL  
+49 (0)441 798 4942

E-MAIL  
gremien-ek@uol.de

OLDENBURG, 05.11.2019

**Stellungnahme der Kommission für Forschungsfolgenabschätzung und Ethik  
zum Antrag Analyse manueller Patiententransfers unter Verwendung ro-  
botischer Assistenz zur Prävention biomechanischer Überbelastung**

**AN: Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften, Department für Versorgungsforschung, Abteilung für Assistenzsysteme und Medizintechnik, Ammerländer Heerstr. 140, 26129 Oldenburg; Weitere Beteiligte: Anna Brinkmann, Conrad Fifelski, ebd.; Christian Kowalski, OFFIS e.V. - Institut für Informatik, FuE Bereich Gesundheit | R&D Division Health, Escherweg 2, 26121 Oldenburg (Drs.EK/2019/078)**

ZENTRALES GREMIENBÜRO

POSTANSCHRIFT  
D-26111 Oldenburg  
PAKETANSCHRIFT  
Ammerländer Heerstraße 114 - 118  
D-26129 Oldenburg  
FAX  
0441 798-2399  
INTERNET  
[www.uni-oldenburg.de](http://www.uni-oldenburg.de)

Sehr geehrter Herr Professor Hein,  
sehr geehrte Frau Brinkmann,  
sehr geehrter Herr Fifelski,  
sehr geehrter Herr Kowalski,

die Kommission für Forschungsfolgenabschätzung und Ethik der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg hat in ihrer Sitzung vom 25.09.2019 obiges Forschungsvorhaben eingehend geprüft. Die Kommission hat keine Bedenken gegen die Durchführung des Vorhabens.  
An der Beratung und Beschlussfassung haben keine Kommissionsmitglieder teilgenommen, die selbst am Forschungsvorhaben mitwirken oder deren Interessen davon berührt werden.  
Die zustimmende Bewertung ergeht unter der Annahme gleichbleibender Gegebenheiten.

Bitte beachten Sie noch folgende Punkte:

- Die Ethikkommission ist über alle Änderungen am Studienprotokoll sowie den in diesem Antrag vorgelegten Dokumenten unaufgefordert und unverzüglich zu unterrichten. Ihr sind unaufgefordert alle schweren unerwünschten Ereignisse mitzuteilen, soweit sie im Zuständigkeitsbereich der Ethikkommission aufgetreten sind.
- Die Verantwortlichkeit des/der jeweiligen Wissenschaftlers/-in bleibt im vollen Umfang erhalten.
- Die Ethikkommission kann dieses Votum jederzeit zurückziehen oder ändern. Dies wird dem/der Antragsteller/-in mitgeteilt.
- Bitte machen Sie dieses Votum und die der Begutachtung zugrunde liegenden Dokumente allen beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zugänglich.

Bitte beachten Sie, dass die Datenschutzgrundverordnung der EU (DSGVO) auf das Projekt anzuwenden ist. In Bezug auf die datenschutzrechtliche Information und Einwilligungserklärung sind daher zusätzlich zu den bislang üblicherweise dargestellten Datenschutzaspekten insbesondere folgende Punkte zu beachten:

- a) Die in dem Projekt für die Datenverarbeitung verantwortliche Person ist zu benennen. Auch wenn diese Person gleichzeitig die Projektleitung übernehmen sollte, ist sie ggf. zusätzlich als für die Datenverarbeitung verantwortliche Person ausdrücklich zu nennen.
- b) Der Name und die Kontaktdaten der zuständigen Datenschutzbeauftragten (lokal und Sponsor/Studienleitung) sind anzugeben.
- c) Auf das Bestehen eines Beschwerderechts bei einer Datenschutz-Aufsichtsbehörde (Landesdatenschutzbeauftragte oder Bundesdatenschutzbeauftragte des Prüfzentrums, Landesdatenschutzbeauftragte oder Bundesdatenschutzbeauftragte des Sponsors/Studienleitung) ist hinzuweisen. Die zuständigen Datenschutzaufsichtsbehörden sind zu nennen. Die Information sollte für jedes Prüf-/Studienzentrum angepasst sein.
- d) Die Betroffenen sind auf ihr Recht hinzuweisen, Auskunft (einschließlich unentgeltlicher Überlassung einer Kopie) über die betreffenden personenbezogenen Daten zu erhalten sowie ggf. deren Berichtigung oder Löschung zu verlangen.

Details zu Ihren Informationspflichten gegenüber den Studienteilnehmern entnehmen Sie bitte insbesondere den Artikeln 13 ff. DSGVO. Die Ethikkommission prüft die Angaben zu den zuständigen DSB und Aufsichtsbehörden nicht auf Richtigkeit. Für die Angaben zu den lokalen Datenschutzbeauftragten und Aufsichtsbehörden reicht gegenüber der Ethikkommission die Angabe eines Platzhalters. Für Ihr Vorhaben wünsche ich Ihnen viel Erfolg.

Mit freundlichen Grüßen

gez.  
Prof. Dr. Jörg Schorer

## **D.2 Studie: Studie zur Transferanalyse rückenschonender Pflegekonzepte**



## Kommission für Forschungsfolgenabschätzung und Ethik

### Begleitendes Übersichtsformular für Anträge

1. Name und Anschrift

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein

Ist eine/r der Antragsteller/-innen Arzt/Ärztin: ja  nein

2. Titel der Studie

**STARK - Studie zur Transferanalyse rückenschonender Pflegekonzepte**

3. Es handelt sich um einen

Erstantrag  Folgeantrag

Drs. Nr. des Erstantrags: ---

4. Zusammenfassung (max 250 Wörter)

Aufgrund der soziodemografischen Entwicklung Deutschlands wird sich in Anbetracht der Alterssicherungssysteme das zahlenmäßige Verhältnis von potenziellen Empfängern von Leistungen zu den potenziellen Erbringern dieser Leistungen verschlechtern. Um dieser zukünftig zu erwartenden Diskrepanz zwischen Pflegenden und Pflegebedürftigen entgegenzuwirken und das deutsche Pflegesystem dahingehend zu stützen, werden salutogene Arbeitsbedingungen angestrebt. Hierbei ist auf die Muskel-Skelett-Belastungen hinzuweisen, die während der Pflegetätigkeit auf den Körper der Pflegenden wirken und als einer der Hauptgründe für hohe Fehltage sowie den Austritt aus dem Beruf vor dem Renteneintrittsalter zu bezeichnen sind. Manuelles Bewegen der Gepflegten führt zu hohen mechanischen Belastungen im unteren Rückenbereich und ist somit als Risikofaktor zu charakterisieren. Besonders falsch ausgeführte Bewegungsabläufe führen zu gesundheitlichen Problemen. Schulungen sind ein geeignetes Mittel, um Pflegekräften in der Ausbildung oder während ihres Berufslebens ergonomisch korrekte Arbeitsweise näher zu bringen. In der Abteilung Assistenzsysteme und Medizintechnik der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg wurde ein Mess- und Analysesystem entwickelt, welches die Patiententransfers mit Tiefenkameras, Sensoranzug und Kraftmessplatte aufnehmen kann, um auf diese Weise Daten für eine differenzierte Analyse liefern zu können. Der Nutzen dieses Systems soll durch eine Studie belegt werden. Das Ziel der Studie ist der Vergleich zwischen herkömmlicher Beobachtung und Bewertung von Patiententransfers und der Aufnahme durch das Mess- und Analysesystem im experimentellen Umfeld im pflegerischen Kontext. Dabei sollen die erweiterten Möglichkeiten der Pflegelehrer beleuchtet werden, Bewertungen abzugeben, welche durch das System gewonnen werden. Es wird erwartet, dass die anschließende 3D- sowie Sensordatenauswertung einen belegbaren Mehrwert für die Pflegelehrer und damit indirekt auch für die Pflegeschüler bringt. Des Weiteren steht das Eruiere der während des Patiententransfers beanspruchten Muskeln des M. quadriceps femoris im Vordergrund. Hierbei ist der Zusammenhang zwischen auftretenden Belastungen und beanspruchter Muskeln zu analysieren. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Belastung der unteren Extremität im Rahmen manuell ausgeführter Patiententransfers trotz der bedeutenden Relevanz dessen für Tätigkeiten, die ein seitliches Drehen „aus den Beinen heraus“ erfordern wie beispielsweise der Patiententransfer vom Bett zum Stuhl, um rückenfreundliche Pflege zu leisten, unerforscht ist.

5. Fragen zum Forschungsvorhaben

Werden Patienten untersucht, die im Rahmen der Studie ambulant oder stationär behandelt werden? ja  nein

Werden den Patienten/Probanden Medikamente verabreicht oder werden sie invasiven Prozeduren unterzogen? ja  nein

Fällt die Studie unter gesetzliche Regelungen (AMG, MPG, Strahlenschutzgesetz etc.)? ja  nein

Aus welchem Wissenschaftsgebiet entstammt die Fragestellung?  
Informatik, Biomechanik

Handelt es sich um eine Studie an Minderjährigen? ja  nein

Handelt es sich um eine Studie an nicht-einwilligungsfähigen Erwachsenen? ja  nein

6. Eingereichte Dokumente (die Punkte unten zum Ankreuzen)

Antrag

Probandeninformation

Einverständniserklärung

In ihrer jeweils aktuellen Form in einer pdf-Datei (mit durchnummerierten Seiten)

## Antrag auf Stellungnahme der Kommission für Forschungs- folgenabschätzung und Ethik

### 1. Bezeichnung des Forschungsvorhabens

**STARK – Studie zur Transferanalyse rückenschonender Pflegekonzepte**

### 2. Name und Kontaktdaten des Antragstellers (Dienstanschrift):

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften  
Department für Versorgungsforschung  
Abteilung für Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Ammerländer Heerstr. 140  
26129 Oldenburg  
Telefon 0441-7984450  
Email: [andreas.hein@uni-oldenburg.de](mailto:andreas.hein@uni-oldenburg.de)

Weitere Beteiligte:

Anna Brinkmann  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften  
Department für Versorgungsforschung  
Abteilung für Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Ammerländer Heerstr. 140  
26129 Oldenburg  
Telefon 0441-7984630  
Email: [anna.brinkmann1@uni-oldenburg.de](mailto:anna.brinkmann1@uni-oldenburg.de)

Conrad Fifelski  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften  
Department für Versorgungsforschung  
Abteilung für Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Ammerländer Heerstr. 140  
26129 Oldenburg  
Telefon 0441-7984630  
Email: [conrad.fifelski@uni-oldenburg.de](mailto:conrad.fifelski@uni-oldenburg.de)

### 3. Angaben zu den Rahmenbedingungen des Vorhabens

In der Abteilung Assistenzsysteme und Medizintechnik des Departments für Versorgungsforschung der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg wurde ein Mess- und Analysesystem entwickelt, welches die Möglichkeit bietet Daten für eine differenzierte Analyse von Pfl egetätigkeiten zu liefern. Hierbei wird auf Tiefenkameras, einen Sensoranzug sowie eine Kraftmessplatte zurückgegriffen. Der Nutzen dieses Systems soll im Rahmen des dargelegten Forschungsvorhabens analysiert werden. Zudem steht die Erueirung der Relevanz spezifischer Muskeln der unteren Extremität bei der Ausführung spezifischer Pflegeszenarien via Elektromyografie (EMG) im Vordergrund. Die für die jeweiligen Szenarien relevanten Muskeln des Oberschenkels sind in den Kontext zu auftretenden Belastungen zu setzen.

Die Datenerhebung soll am 26.02.2019 in der Ev. Altenpflegeschule e.V. Oldenburg stattfinden. **Vor Ausführung der geplanten Studie werden sowohl die Mitarbeitervertretung (MAV) der Ev. Altenpflegeschule über das Vorhaben informiert als auch die Ausbildungsleiter/-in darüber in Kenntnis gesetzt die Jugend- und Ausbildungsvertreter/-innen zu informieren.**

### 4. Gegenstand und Verfahren des Vorhabens

#### Gegenstand

Angesichts der soziodemografischen Entwicklung Deutschlands ist auch die deutsche Bevölkerung im Erwerbsalter (20 – 64 Jahre) stark von Alterung betroffen, sodass künftig zunehmend mehr Seniorinnen und Senioren den Erwerbstätigen gegenüberstehen werden. Folglich wird sich in Anbetracht der Alterssicherungssysteme das zahlenmäßige Verhältnis von potenziellen Empfängern von Leistungen zu den potenziellen Erbringern dieser Leistungen verschlechtern [Statistisches Bundesamt, 2015; Hornung et al., 2013]. Um dieser zukünftig zu erwartenden Diskrepanz zwischen Pflegenden und Pflegebedürftigen entgegenzuwirken und das deutsche Pflegesystem dahingehend zu stützen, werden salutogene Arbeitsbedingungen, die eine Verlängerung der Lebenszeit in Gesundheit sowohl für Gepflegte als auch für Pflegende unterstützt, angestrebt [Hornung et al., 2013]. Hierbei ist auf die Muskel-Skelett-Belastungen hinzuweisen, die während der Pfl egetätigkeit auf den Körper der Pflegenden wirken und als einer der Hauptgründe für hohe Fehltag e sowie den Austritt aus dem Beruf vor dem Renteneintrittsalter zu bezeichnen sind [DAK, 2015; Weißert-Horn et al., 2014]. Manuelles Bewegen der Gepflegten führt zu hohen mechanischen Belastungen im unteren Rückenbereich und ist somit als Risikofaktor zu charakterisieren [DAK, 2015; Weißert-Horn et al., 2014]. Besonders falsch ausgeführte Bewegungsabläufe führen zu gesundheitlichen Problemen [DAK, 2015].

Schulungen sind ein geeignetes Mittel, um Pflegekräften in der Ausbildung oder während ihres Berufslebens ergonomisch korrekte Arbeitsweise näher zu bringen. Im Rahmen dieser Schulungen zu Ergonomie und gesundheitsförderlichem Arbeiten stehen manuell ausgeführte Patiententransfers im Vordergrund, da hier sehr hohe Belastungen stattfinden [Jäger et al., 2014]. Bislang werden bei Schulungen die Pflegenden durch die Pflegelehrer beobachtet und dabei selten auf Video aufgezeichnet. Dies schränkt die Möglichkeiten für eine differenzierte Bewertung ein. Aus diesem Grund wurde in der

Abteilung Assistenzsysteme und Medizintechnik des Departments für Versorgungsforschung der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg ein Mess- und Analysesystem entwickelt, welches die Patiententransfers mit Tiefenkameras, Sensoranzug und Kraftmessplatte aufnehmen kann, um auf diese Weise Daten für eine differenzierte Analyse liefern zu können. Der Nutzen dieses Systems soll durch eine Studie belegt werden.

Die Belastung der Lendenwirbelsäule während des manuellen Bewegens von Pflegebedürftigen wurde bereits bei Beschäftigten des Gesundheitswesens hinsichtlich der biomechanischen Überbelastung analysiert [Jäger et al., 2014]. Die Belastung der unteren Extremität im Rahmen des genannten Szenarios ist trotz der Tatsache, dass diese für die Tätigkeiten, die ein seitliches Drehen „aus den Beinen heraus“ erfordern wie beispielsweise der Patiententransfer vom Bett zum Stuhl, entscheidend ist, um rückenfreundliche Pflege zu leisten, unerforscht [AOK, 2018; Caritas 2018; DAK, 2018].

Die Relevanz spezifischer Muskeln der unteren Extremität für den Patiententransfer soll im Rahmen einer Studie eruiert und in den Kontext zu auftretenden Belastungen gesetzt werden. Der Fokus wird hierbei auf die Oberschenkelregion gesetzt, da die untere Extremität zu einem Anteil von mehr als 50% der Skelettmuskulatur besteht, wovon der überwiegende Teil in der genannten Region angelagert ist [Schweitzer et al., 2015; Lee et al., 2004]. Der Musculus quadriceps femoris setzt sich aus den folgenden vier Muskelköpfen zusammen und befindet sich an der Vorderseite des Oberschenkels:

Musculus rectus femoris, Musculus vastus medialis, Musculus vastus intermedius, Musculus vastus lateralis.

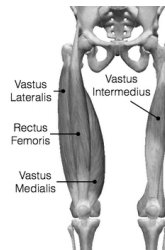


Abbildung 1 Die vier Muskelköpfe des M. quadriceps femoris.

Jeder Muskel übernimmt verschiedene Aufgaben, erfüllt jedoch hauptsächlich im Verbund Bewegungs- und Haltefunktionen [Zervos-Kopp, 2009]. Die Hauptaufgaben des M. quadriceps femoris bestehen in der Streckung des Kniegelenks sowie der Hüftbeugung, die beispielsweise entscheidend für alltägliche Prozesse wie das Aufstehen von einem Stuhl sind [Mansfield et al., 2009]. Die Tatsache, dass der M. quadriceps femoris direkt mit dem Becken über den M. rectus femoris verbunden ist, verdeutlicht den Einfluss dieser Muskelgruppe auf die Lendenwirbelsäule und damit die Relevanz dessen für rückschonende Pflegeleistungen. Die Sehne des M. rectus femoris hat dabei ihren proximalen Ursprung am Becken und endet distal am Tuberositas Tibiae (rauer Knochenfortsatz am proximalen Ende der vorderen Schienbeinkante). Die direkte Verbindung von Becken und Kreuzbein ist das Iliosacralgelenk. Das Becken ist zudem über das Kreuzbein mit der Lendenwirbelsäule verbunden.

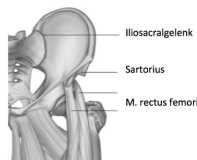


Abbildung 2 Iliosacralgelenk.

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass sich der M. quadriceps femoris häufig aufgrund der stetig zunehmenden sitzenden Lebensweise der deutschen Bevölkerung verkürzt [Erb, 2018]. Dadurch steigt die Spannung dieser Muskelgruppe in aufrechter Position. Blockaden im Iliosacralgelenk sowie Schmerzen in der Lendenwirbelsäule sind die Folge, da sowohl die Beweglichkeit des Beckens als auch des Hüftgelenkes durch eine Verkürzung der genannten Muskelgruppe eingeschränkt sind [Erb, 2018]. Durch die

Verbindung des M. rectus femoris mit dem Becken werden bei Hüftbeugung Torsionskräfte auf das Iliosacralgelenk übertragen [Hammer et al., 2015]. Es ist anzunehmen, dass eine erhöhte Aktivität dieses Muskels zu Schmerzen im Iliosacralgelenk führen kann [Hammer et al., 2015]. Hierbei ist auf den Schubmodul zu verweisen, der als eine Materialkonstante die mechanischen Eigenschaften des Muskels gegenüber einer Torsion (Verdrehung) beschreibt. Je höher der Schubmodul, desto größer die Steifigkeit des Muskels und desto mehr Widerstand gegenüber einer auftretenden Torsion. Der Schubmodul des M. rectus femoris sinkt mit steigendem Alter, sodass dieser Muskel weniger Widerstand gegenüber auftretenden Torsionskräften entgegenbringen kann [Akagi et al., 2015].

Das Ziel der Studie ist der Vergleich zwischen herkömmlicher Beobachtung und Bewertung von Patiententransfers und der Aufnahme durch ein komplexes Mess- und Analysesystem im experimentellen Umfeld im pflegerischen Kontext. Zum einen sollen dabei die erweiterten Möglichkeiten der Pflegelehrer beleuchtet werden, Bewertungen abzugeben, welche durch das Mess- und Analysesystem gewonnen werden. Es wird erwartet, dass die anschließende 3D- sowie Sensordatenauswertung einen belegbaren Mehrwert für die Pflegelehrer und damit indirekt auch für die Pflegeschüler bringt. Zum anderen steht die Eruiierung der während des Patiententransfers beanspruchten Muskeln des M. quadriceps femoris im Vordergrund. Hierbei ist der Zusammenhang zwischen auftretenden Belastungen und beanspruchter Muskeln zu analysieren.

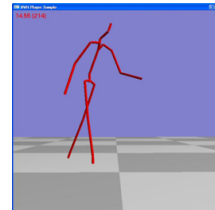
#### Methoden

Während des geplanten Forschungsvorhabens ist eine zu pflegende Person durch einen Pflegeschüler der Ev. Altenpflegeschule Oldenburg von einem Pflegebett auf einen Stuhl nach den Grundsätzen der Kinästhetik zu transferieren. Die Pflegelehrer sind im Zuge dessen sowie weitere Methoden und Instrumente bedeutend und werden im Weiteren detailliert beschrieben.

##### ➤ ShadowMotion Sensoranzug

Die Probanden, also die angehenden Altenpfleger, tragen den ShadowMotion Sensoranzug über ihrer Kleidung. Dieser ermöglicht während des ausgeführten Transfers die Aufzeichnung eines Skelettmodells. Das Skelettmodell schafft eine Grundlage zur anschließenden genauen Beobachtung der durchgeführten Bewegungen und Körperhaltungen.

Abbildung 3 Skelettmodell des ShadowMotion Sensoranzugs.  
Quelle: <http://www.cs.man.ac.uk/~toby/bvh/>



##### ➤ Kraftmessplatte

Der Patiententransfer wird von den Probanden auf einer Kraftmessplatte durchgeführt, welche die auf die Fußsohlen wirkende Kraft der Probanden präzise aufzeichnet. Mit diesen Daten und den Gewichtsdaten des Probanden sowie des Gepflegten ist ableitbar, welche Handlung zur Reduktion oder Erhöhung der wirkenden Kräfte führen. Des Weiteren kann anhand der generierten Daten eruiert werden, wann welcher Muskel unter welche Belastung beansprucht wird.

➤ EMG

Die Probanden werden für das Ausführen des Patiententransfers mit einem kommerziellen Oberflächen-Elektromyogramm (EMG) verkabelt, um die elektrische Aktivität beanspruchter Muskeln der unteren Extremität während des Pflegeprozesses aufzuzeichnen. Dadurch kann präzise bestimmt werden wann und wie stark welche Muskeln beansprucht werden.

➤ Kinect-System

Die Probanden werden während der Ausführung des Patiententransfers von 4 Tiefenkameras aufgezeichnet, welche es in den 3D-Aufnahmen ermöglichen den Blickpunkt jederzeit frei zu wählen. Dabei kann die 3D-Aufnahmen pausiert und vor- und zurückgespult werden. Diese Aufnahmen erlauben dem Probanden sowie den Pflegelehrern eine umfassende Analyse des Transfers.



Abbildung 4 Punktwolke in Farbe.

➤ Pflegelehrer

Während des Transfers ist der Pflegelehrer anwesend und gibt sofort nach der Beendigung der Tätigkeit ein Feedback ab ohne die Messdaten gesehen zu haben. Danach werden die Daten für die Probanden und den Pflegelehrer aufgearbeitet zur Verfügung gestellt und die Bewertung findet erneut statt. Die zusätzlichen Informationen während der Bewertung aufgrund der Daten werden dokumentiert.

➤ Semi-strukturiertes Interview

Zur Erfassung der Vorteile welche sich mit den Messsystemen Kinect-System, Kraftmessplatte, Shadow-Motion-Anzug und EMG gegenüber bisheriger Beobachtung des Transfers ergeben, wird ein semi-strukturiertes Interview sowohl mit den Pflegelehrern als auch mit den -schülern geführt. Dieses ist in erster Linie als Werkzeug zur Vergleichbarkeit beider Methoden zu verstehen.

➤ Handkraft

Ein Handdynamometer erfasst quantitativ die isometrische Maximalkraft des Faustschlusses der Pflegeschüler und dementsprechend der Unterarmmuskulatur. Die Handkraft korreliert mit der Muskelkraft der unteren Extremität [Mijnarends et al., 2013]. Es wird auf das Jamar Dynamometer zurückgegriffen, das sowohl validiert als auch weit verbreitet ist [Cruz-Jentoft et al., 2018].

➤ Chair Rise Test

Der Chair Rise Test dient als Indikator der Kraft der unteren Extremität (M quadriceps femoris) [Cruz-Jentoft et al., 2018]. Es wird die Zeit gemessen, die ein Pflegeschüler benötigt, um fünfmal aus einer sitzenden Position aufzustehen ohne die Verwendung der Arme. Dieser Test wird ebenfalls unter der Nutzung des Kinect-Systems, der Kraftmessplatte, des ShadowMotion Anzuges sowie des EMGs durchgeführt.

Dementsprechend wird der Stuhl auf der Kraftmessplatte und im Sichtfeld der 4 Tiefenkameras positioniert.

### **Experimentelle Aufgaben**

Zunächst erfolgt die Messung der Handkraft sowie des Chair Rise Tests [Cruz-Jentoft et al., 2018]. Daraufhin transferiert der jeweilige Pflegeschüler eine eingewiesene Person mit Pflegehintergrund vom Pflegebett auf einen Stuhl nach den Grundsätzen der Kinästhetik. Der Transfer beansprucht weniger als 3 Minuten und wird von jedem Pflegeschüler einmal durchgeführt.

### **Durchführung**

Die Studie wird in einem von der Ev. Altenpflegeschule zur Verfügung gestellten Raum mit einem Pflegebett durchgeführt. Bei der Aufnahme eines Probanden sind sowohl die Mitarbeiter der Universität Oldenburg, mindestens ein Pflegelehrer, als auch bis zu zehn weitere potentielle Probanden aus einer Pflegeschulenklasse anwesend. Zu Beginn der Studie legt der jeweilige Proband den Shadow-Motion-Anzug über die Kleidung und das EMG auf der Haut des Oberschenkels an. Es besteht die Möglichkeit die Gerätschaften räumlich getrennt von allen anderen Personen anzulegen. Vor Ausführung des Pflegeszenarios wird bei jedem Probanden die Handkraft der dominanten Hand mit Hilfe des oben beschriebenen Handdynamometers erfasst und notiert. Die Messung erfolgt im Stehen während der Arm seitlich am Körper gehalten und das Ellbogengelenk um 90 Grad gebeugt wird. Zudem erfolgt die Durchführung des Chair Rise Tests. Der jeweilige Proband befindet sich sitzend auf einem Stuhl und hält die Arme verschränkt vor dem Oberkörper. Es wird die Zeit gestoppt, die der Proband benötigt, um fünfmal aus der sitzenden Position aufzustehen ohne die Arme zu verwenden.

Nach Abschluss der Tests zur Muskelkraft der unteren Extremität erfolgt die Ausführung des Pflegeszenarios. Die Aufgabe des Probanden besteht darin die zu pflegende Person, die von einem Mitarbeiter der Universität Oldenburg gespielt wird, vom Pflegebett auf einen Stuhl zu transferieren. Der Transfer wird nur einmal ausgeführt. Während des Transfers befindet sich der jeweilige Proband die ganze Zeit über auf einer Kraftmessplatte. Diese befindet sich vor dem Pflegebett. Vier Tiefenkameras erstellen während der Handlung eine 3D Aufnahme des Transfers. Sobald der Transfer beendet ist, gibt der Pflegelehrer sein Feedback zur Ausführung der Tätigkeit unter Berücksichtigung gesunder, ergonomisch vorteilhafter Arbeit. Diese erste Bewertung findet ohne Einbezug der Mess- und Analysedaten statt. Danach werden dem Pflegelehrer die Daten der Aufzeichnungen des Tiefenkamerasystems, des Sensoranzugs, der Kraftmessplatte und des EMGs zur Verfügung gestellt. Er kann daraufhin gemeinsam mit dem Probanden eine weitere Bewertung erarbeiten. Zusätzlich wird im Anschluss ein semi-strukturiertes Interview sowohl mit den Pflegeschülern als auch mit den Pflegelehrern geführt, um die Bewertung der Pflgetätigkeit mit und ohne Mess- und Analysesystem vergleichen zu können.

### **Auswertung**

Zunächst erfolgt die Auswertung des Interviews, welches mit den Pflegelehrern geführt wurde. Dies soll verdeutlichen inwiefern sich die Qualität der Bewertung eines Transfers, welcher in der Pflege üblich ist, mit und ohne Mess- und Analysesystem verändert. Darüber hinaus soll der Aufwand beider Bewertungsansätze verglichen werden. Demnach erfolgt zudem die Auswertung des Interviews, welches mit den Pflegeschülern



geführt wurde. Dies dient der Erfassung inwiefern sich das Feedback der Pflegelehrer für die Pflegeschüler verändert hat.

Des Weiteren werden die mit Hilfe der Kraftmessplatte, des EMGs sowie der Tests zur Ermittlung der Kraft der unteren Extremität (Handkraftmessung, Chair Rise Test) generierten Daten analysiert, um die für die jeweiligen Szenarien relevanten Muskeln des Oberschenkels in den Kontext zu auftretenden Belastungen zu setzen.

#### **Körperliche Beanspruchung**

Die auftretende Beanspruchung ist für den Probanden, also den angehenden Altenpfleger, erheblich unter der alltäglichen Belastung im Beruf und daher angemessen. Der Transfer wird von jedem Probanden nur einmal ausgeführt und dauert weniger als 3 Minuten.

#### **Mentale Beanspruchung**

Es wird keine mentale Beanspruchung erwartet.

#### **Preisgabe persönlicher Informationen**

- > Geschlecht
- > Alter
- > Gewicht

#### **Täuschung und Aufklärung**

Es wird nicht mit Täuschung gearbeitet.

### **5. Angaben zu Aufzeichnung, Aufbereitung, Speicherung und Löschung der Daten**

#### **Personenbezogene Daten**

Über Interviews werden das Alter in Jahren sowie das Geschlecht ermittelt. Das Körpergewicht der Probanden wird indirekt über die Verwendung der Kraftmessplatte ermittelt.

#### **Datenschutz**

Für jeden Probanden wird eine Datei mit einem Codenamen angelegt welche Alter, Geschlecht und Gewicht beinhaltet.

Die Daten des EMGs, des Sensoranzugs und der Kraftmessplatte sowie der Handkraftmessung und des Chair Rise Tests lassen keine Rückschlüsse auf die Identität der Person zu. Diese werden der Datei hinzugefügt.

Die 3D-Daten des Tiefenkamerasystems können bei aktivierter Einfärbung der 3D-Daten Rückschlüsse auf die Identität der Person zulassen. Zur weiteren Verarbeitung nach Durchführung der Studie werden diese Farbinformationen deaktiviert, womit die 3D-Daten sich auf eine aus grauen Punkten bestehende Punktwolke beschränken, die keine Rückschlüsse auf die Identität zulässt. Die Farbinformationen werden nur als Hilfestellung während der Auswertung vor Ort für die Probanden und die Pflegelehrer vorübergehend aktiviert. Auch in der farbigen Punktwolke ist das Erkennen von Gesichtern nahezu

unmöglich, da die Auflösung zu gering ist. Die farblosen Daten werden der Datei hinzugefügt.

#### **Löschung der Daten**

Die Dateien der Probanden werden im CloudStorage der Universität Oldenburg abgespeichert und sind dort nach guter wissenschaftlicher Praxis mindestens 10 Jahre zu verwahren.

### **6. Gewinnung der Personenstichprobe und Vergütung von Probanden**

#### **Rekrutierung**

Die Probanden werden im Rahmen der Veranstaltung "Tag der Bewegung" der Ev. Altenpflegeschule Oldenburg gewonnen und erklären sich im Vorfeld bereit an der Studie teilzunehmen. Bei den Probanden handelt es sich um die Pflegeschülerinnen und -schüler, also angehende Altenpfleger der Ev. Altenpflegeschule Oldenburg.

#### **Personenstichprobe aus Datenbank**

Entfällt.

#### **Merkmale der Personenstichprobe**

Die Probanden sind 18 bis 53 Jahre alt. Angestrebt wird eine Gruppe von mindestens 10 und maximal 20 Personen, die den Transfer durchführen sollen, sowie 2 Pflegelehrer, welche die Bewertung vornehmen, angesetzt.

#### **Einschluss- und Ausschlusskriterien**

Körperlich beeinträchtigte Schüler, denen der Transfer nicht zuzumuten ist, werden nicht mit einbezogen. Eine Vergütung ist nicht vorgesehen.

#### **Teilnahmevergütung**

Die Probanden nehmen freiwillig an der Studie teil und erhalten keine Vergütung.

### **7. Freiwilligkeit der Teilnahme und Rücktritt**

#### **Freiwilligkeit**

Die Studienteilnahme ist freiwillig. Die potentiellen Teilnehmer werden mindestens eine Woche vor dem geplanten Termin über die Studie informiert. Eine Benachteiligung bei Nicht-Teilnahme findet nicht statt. Für die Pflegelehrer gelten die gleichen Konditionen. Auch ihnen entsteht kein Nachteil durch Verweigerung der Teilnahme.

#### **Rücktritt**

Ein Rücktritt ist jederzeit für alle Beteiligten möglich. Der Wunsch auf Löschung der Daten kann jederzeit kommuniziert werden. Die Löschung findet innerhalb eines Tages statt.

## 8. Informiertheit und Einwilligung

### **Informiertheit**

Das Prinzip der vollständigen Informiertheit ist gewahrt. Der Proband wird über das Wesen und das Risiko der Studie im Informationsblatt aufgeklärt. Eine Täuschung findet nicht statt.

### **Einwilligung**

Nach Information der Probanden wird deren Einwilligung eingeholt. Die Einwilligungserklärung enthält alle notwendigen Bestandteile (Freiwilligkeit, Informiertheit, volles Verständnis, Rücktrittsmöglichkeit ohne Nachteile, Unterschriften).

### **Bild- und Tonaufnahmen**

Es finden keine Tonaufnahmen statt. Für die 3D-Aufnahmen wird eine gesonderte Einwilligungserklärung ausgehändigt.

08.01.2019

**Ort, Datum**

**Unterschrift Antragsteller**

---

**Literatur**

Akagi R, Yamashita Y, Ueyasu Y, 2015. Age-Related Differences in Muscle Shear Moduli in the Lower Extremity. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2015.07.011  
Al-Abtah J, Ammann A, Bensch S (2015). I care – Pflege. DOI: 10.1055/b-00000131

AOK (2018). Rückengerechtes Arbeiten: Alle Möglichkeiten nutzen. Online unter: [https://www.aok-gesundheitspartner.de/rh/vigo\\_pfleger/gesund\\_und\\_aktiv/ruecken/rueckengerecht/index.html](https://www.aok-gesundheitspartner.de/rh/vigo_pfleger/gesund_und_aktiv/ruecken/rueckengerecht/index.html). Zugriff: 04.12.2018

DAK, 2018. Pflege zu Hause. Praktische Hinweise und Anregungen. Online unter: [http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/15069/pdf/W406\\_5007\\_Pflege\\_zu\\_Hause.pdf](http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/15069/pdf/W406_5007_Pflege_zu_Hause.pdf). Zugriff: 04.12.2018

DAK, 2015. DAK-Pflege-Report 2015. So pflegt Deutschland. [https://www.dak.de/dak/download/Pflegereport\\_2015-1701160.pdf](https://www.dak.de/dak/download/Pflegereport_2015-1701160.pdf) (Zugriff: 03.05.2016).

Erb H., 2018. Dehnung M. quadriceps femoris. Online unter: <https://www.harald-erb.de/dehnung-musculus-quadriceps-femoris/>. Zugriff: 06.12.2018

Hammer N, Möbius R, Schleifenbaum S, Hammer KH, Klima S, Lange JS, Soisson O, Winkler D, Milani TL, 2015. Pelvic Belt Effects on Health Outcomes and Functional Parameters of Patients with Sacroiliac Joint Pain. DOI: 10.1371/journal.pone.0136375

Hielscher V, Kirchen-Peters S, Nock L, 2017. Pflege in den eigenen vier Wänden: Zeitaufwand und Kosten. Pflegebedürftige und ihre Angehörigen geben Auskunft. Hans-Böckler-Stiftung. ISBN 978-3-86593-272-3

Jäger M, Jordan C, Theilmeier A, Wortmann N, Kuhn S, Nienhaus A, Luttmann A, 2014. Analyse der Lumbalbelastung beim manuellen Bewegen von Patienten zur Prävention biomechanischer Überbelastung von Beschäftigten im Gesundheitswesen. DOI: 10.1007/s40664-013-0010-4

Lee SJ, Janssen I, Heymsfield SB, Ross R, 2004. Relation between whole-body and regional measure of human skeletal muscle. *Am J Clin Nutr* 2004;80:1215–21  
Mansfield PJ, Neumann DA, 2009. *Essentials of Kinesiology for the Physical Therapist Assistant*. MOSBY Elsevier, St Louis.

Nowossadeck S, Engstler H, Klaus D, 2016. Pflege und Unterstützung durch Angehörige. Deutsches Zentrum für Altersfragen. Report Altersdaten. Heft 1/2016

Schweitzer L, Geisler C, Pourhassan M, Braun W, Gluer CC, Bony-Westphal A, Müller MJ. What is the best reference site for a single MRI slice to assess whole-body skeletal muscle and adipose tissue volumes in healthy adults? *Am J Clin Nutr* 2015;102:58–65.

Zervos-Kopp J, 2009. *Anatomie, Biologie und Physiologie*. ISBN 978 313 141 3529. Online unter: [https://bilder.buecher.de/zusatz/26/26556/26556869\\_lese\\_1.pdf](https://bilder.buecher.de/zusatz/26/26556/26556869_lese_1.pdf)  
Zugriff: 24.01.2017



Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Department für Versorgungsforschung  
Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein

0441 798 4450

Ansprechpartner für eventuelle Rückfragen:

Anna Brinkmann, Conrad Fifelski

0441 798 4630

## Allgemeine Teilnehmerinformation über die Untersuchung

### Department für Versorgungsforschung

#### Titel der Studie:

#### STARK – Studie zur Transferanalyse rüchenschonender Pflegekonzepte

Herzlich willkommen bei unserer Studie "STARK – Studie zur Transferanalyse rüchenschonender Pflegekonzepte"! Wir danken Ihnen für Ihr Interesse an dieser Studie.

Mit dieser Studie untersuchen wir zum einen inwiefern ein komplexes Mess- und Analysesystem die Möglichkeiten der Beobachtung und Bewertung von Patiententransfers durch Pflegelehrer erweitert. Zum anderen wird analysiert, ob die anschließende 3D- sowie Sensordatenauswertung einen belegbaren Mehrwert für die beteiligten Personen (Pflegeschüler und -lehrer) birgt.

Ein weiterer Schwerpunkt der Studie stellt die Eruierung der während des Patiententransfers beanspruchten Muskeln des Oberschenkels durch ein kommerzielles Oberflächen-Elektromyografie (EMG) dar. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen auftretenden Belastungen und beanspruchter Muskeln analysiert.



Ein kommerzielles Oberflächen EMG  
([http://www.paradisi.de/images\\_news/5/53630\\_0.jpg](http://www.paradisi.de/images_news/5/53630_0.jpg))



Der Shadow-Motion Anzug  
([https://www.motionshadow.com/img/shadow\\_wearable\\_kit-480.jpg](https://www.motionshadow.com/img/shadow_wearable_kit-480.jpg))

### **Ablauf der Studie**

Die Studie wird in einem von der Ev. Altenpflegeschule zur Verfügung gestellten Raum mit einem Pflegebett durchgeführt. Bei der Aufnahme des Patiententransfers sind sowohl die Mitarbeiter der Universität Oldenburg, mindestens ein Pflegelehrer, als auch bis zu zehn weitere potentielle Probanden aus einer Pflegeschulenkasse anwesend.

Zu Beginn der Studie legen Sie einen Shadow-Motion-Anzug über die Kleidung an. Dieser Anzug ermöglicht die Aufzeichnung eines Skelettmodells während der Ausführung eines Pflegeszenarios. Das aufgezeichnete Skelettmodell ermöglicht eine genaue Beobachtung der durchgeführten Bewegungen und Körperhaltungen. Des Weiteren werden EMG-Elektroden auf Ihrer Haut des Oberschenkels fixiert, um die Aktionspotentiale aktivierter Muskeln der unteren Extremität während des Pflegeszenarios aufzuzeichnen. Dadurch kann präzise bestimmt werden wann und wie stark welche Muskeln beansprucht werden. Es besteht die Möglichkeit die Gerätschaften räumlich getrennt von allen anderen Personen anzulegen.

**Vor Ausführung des Pflegeszenarios werden Ihre Daten zu Geschlecht, Alter und Gewicht ermittelt.**

Daraufhin werden zwei der Tests zur Muskelkraft der unteren Extremität durchgeführt. Zunächst wird bei Ihnen die Handkraft der dominanten Hand mit Hilfe eines Handdynamometers erfasst und notiert. Das Handdynamometer erfasst quantitativ die Maximalkraft Ihres Faustschlusses und dementsprechend Ihrer Unterarmmuskulatur. Die Handkraft korreliert mit der Muskelkraft Ihrer unteren Extremität. Die Messung erfolgt im Stehen während Ihr Arm seitlich am Körper gehalten und das Ellbogengelenk um 90 Grad gebeugt wird.

Zudem erfolgt die Durchführung des sogenannten Chair Rise Tests. Hierfür sitzen Sie auf einem Stuhl und halten die Arme verschränkt vor dem Oberkörper. Es wird die Zeit gestoppt, die Sie benötigen, um fünfmal aus der sitzenden Position aufzustehen ohne die Arme zu verwenden.

Nach Abschluss der Tests zur Muskelkraft der unteren Extremität erfolgt die Ausführung des Patiententransfers. Ihre Aufgabe ist es, den Gepflegten vom Pflegebett auf einen Stuhl zu transferieren. Ein Mitarbeiter der Universität Oldenburg spielt die zu pflegende Person in dem Pflegeszenario. Der Transfer wird von Ihnen nur einmal ausgeführt.

Sie befinden sich während des Transfers die gesamte Zeit über auf einer Kraftmessplatte. Diese befindet sich vor dem Pflegebett und erfasst präzise die auf Ihre Fußsohlen wirkende Kraft während des Patiententransfers.

Vier Tiefenkameras erstellen während der Ausführung des Patiententransfers eine 3D Aufnahme von Ihnen. Sobald der Transfer beendet ist, gibt der Pflegelehrer sein Feedback zur Ausführung Ihrer Tätigkeit unter Berücksichtigung gesunder, ergonomisch vorteilhafter Arbeit. Diese erste Bewertung findet ohne Einbezug der Mess- und Analysedaten statt. Danach werden dem Pflegelehrer die Daten der Aufzeichnungen des Tiefenkamerasystems, des Sensoranzugs, der Kraftmessplatte und des EMGs zur Verfügung gestellt. Daraufhin wird gemeinsam mit Ihnen eine weitere Bewertung erarbeitet. Anschließend wird mit dem Pflegelehrer ein semi-strukturiertes Interview durchgeführt, welches die Bewertung mit und ohne aufgezeichnete Daten erfasst.

Sollten Sie noch Fragen haben, wenden Sie sich damit bitte an den Versuchsleiter.

#### **EMG**

Im Rahmen der Studie werden wir bei Ihnen ein Elektromyogramm (EMG) aufzeichnen. Hierbei handelt es sich um die elektrische Aktivität von Muskeln, die an der Hautoberfläche gemessen werden kann. Das EMG wird mit Hilfe von Elektroden, die direkt auf der Hautoberfläche befestigt werden, aufgezeichnet.

Die Aufzeichnung des EMGs ist beim Menschen mit keinen Risiken verknüpft. Da die Potentialfelder der Muskeln an der Hautoberfläche schwach sind, ist es erforderlich, dass jede Stelle, an der eine Elektrode angebracht wird, mit Hilfe einer speziellen Paste und Alkohol gereinigt wird. Der Kontakt zwischen Elektrode und Hautoberfläche wird über eine Elektrodencreme hergestellt. Die verwendeten Chemikalien sind klinisch getestet und lassen sich nach Abschluss des Experiments leicht entfernen. In seltenen Fällen können dennoch Hautirritationen auftreten, die noch für ein paar Tage sichtbar sein können (z.B. Rötungen). Bitte teilen Sie uns mit, falls Sie an bestimmten Hautallergien oder Überempfindlichkeiten der Haut leiden.

#### **Freiwilligkeit und Anonymität**

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit und ohne Angabe von Gründen die Teilnahme an dieser Studie beenden, ohne dass Ihnen daraus Nachteile entstehen.

Die im Rahmen dieser Studie erhobenen, oben beschriebenen Daten und persönlichen Mitteilungen werden vertraulich behandelt. So unterliegen diejenigen Projektmitarbeiter, die durch direkten Kontakt mit Ihnen über personenbezogene Daten verfügen, der Schweigepflicht. Des Weiteren wird die Veröffentlichung der Ergebnisse der Studie in anonymisierter Form erfolgen, d. h. ohne dass Ihre Daten Ihrer Person zugeordnet werden können.

#### **Datenschutz**

Die Erhebung und Verarbeitung Ihrer oben beschriebenen persönlichen Daten erfolgt pseudonymisiert am Versuchsort, der evg. Altenpflegeschule, unter Verwendung einer Nummer und ohne Angabe Ihres Namens. Es existiert eine Kodierliste auf Papier, die Ihren Namen mit der Nummer verbindet. Die Kodierliste ist nur den Versuchsleitern und dem Projektleiter zugänglich; das heißt, nur diese Personen können die erhobenen Daten mit meinem Namen in Verbindung bringen. Die Kodierliste wird in einem abschließbaren Schrank aufbewahrt und nach Abschluss der Datenauswertung, spätestens aber am 01.01.2020, vernichtet. Ihre Daten sind dann anonymisiert. Damit ist es niemandem mehr möglich, die erhobenen Daten mit Ihrem Namen in Verbindung zu bringen. Die anonymisierten Daten werden mindestens 10 Jahre gespeichert. Solange die Kodierliste existiert, können Sie die Löschung aller von Ihnen erhobenen Daten verlangen. Ist die Kodierliste aber erst einmal gelöscht, können wir Ihren Datensatz nicht mehr identifizieren. Deshalb können wir Ihrem Verlangen nach Löschung Ihrer Daten nur solange nachkommen, wie die Kodierliste existiert.

#### **Vergütung**

Für Ihre Teilnahme an der Studie gibt es keinen finanziellen Ausgleich. Es werden für Sie keine Kosten für die Teilnahme an der Studie entstehen.

Herr Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein  
Frau Anna Brinkmann  
Herr Conrad Fifelski  
Department für Versorgungsforschung  
Abt. für Assistenzsysteme und Medizintechnik  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

**Kommission für Forschungs-  
folgenabschätzung und Ethik**

VORSITZ  
Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein

SACHBEARBEITUNG  
Katrin Müller  
Zentrales Gremienbüro

TELEFONDURCHWAHL  
+49 (0)441 798 4942

E-MAIL  
gremien-ek@uol.de

OLDENBURG, 26.06.2019

**Stellungnahme der Kommission für Forschungsfolgenabschätzung und Ethik zum Antrag STARK – Studie zur Transferanalyse rückenschonender Pflegekonzepte**

**AN: Prof. Dr.-Ing. Andreas Hein, Department für Versorgungsforschung, Abt. für Assistenzsysteme und Medizintechnik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg; weitere Beteiligte: Anna Brinkmann, Conrad Fifelski, ebd. (Drs.EK/2019/004)**

ZENTRALES GRMEINBÜRO

POSTANSCHRIFT  
D-26111 Oldenburg  
PAKETANSCHRIFT  
Ammerländer Heerstraße 114 - 118  
D-26129 Oldenburg  
FAX  
0441 798-2399  
INTERNET  
[www.uni-oldenburg.de](http://www.uni-oldenburg.de)

Sehr geehrter Herr Professor Hein,  
sehr geehrte Frau Brinkmann,  
sehr geehrter Herr Fifelski,

die Kommission für Forschungsfolgenabschätzung und Ethik der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg hat in ihrer Sitzung vom 23.01.2019 obiges Forschungsvorhaben eingehend geprüft. Die Kommission hat keine Bedenken gegen die Durchführung des Vorhabens.

An der Beratung und Beschlussfassung haben keine Kommissionsmitglieder teilgenommen, die selbst am Forschungsvorhaben mitwirken oder deren Interessen davon berührt werden.

Die zustimmende Bewertung ergeht unter der Annahme gleichbleibender Gegebenheiten.

Bitte beachten Sie noch folgende Punkte:

- Die Ethikkommission ist über alle Änderungen am Studienprotokoll sowie den in diesem Antrag vorgelegten Dokumenten unaufgefordert und unverzüglich zu unterrichten. Ihr sind unaufgefordert alle schweren unerwünschten Ereignisse mitzuteilen, soweit sie im Zuständigkeitsbereich der Ethikkommission aufgetreten sind.
- Die Verantwortlichkeit des/der jeweiligen Wissenschaftlers/-in bleibt im vollen Umfang erhalten.



- Die Ethikkommission kann dieses Votum jederzeit zurückziehen oder ändern. Dies wird dem/der Antragsteller/-in mitgeteilt.
- Bitte machen Sie dieses Votum und die der Begutachtung zugrunde liegenden Dokumente allen beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zugänglich.

Bitte beachten Sie, dass die Datenschutzgrundverordnung der EU (DSGVO) auf das Projekt anzuwenden ist. In Bezug auf die datenschutzrechtliche Information und Einwilligungserklärung sind daher zusätzlich zu den bislang üblicherweise dargestellten Datenschutzaspekten insbesondere folgende Punkte zu beachten:

- a) Die in dem Projekt für die Datenverarbeitung verantwortliche Person ist zu benennen. Auch wenn diese Person gleichzeitig die Projektleitung übernehmen sollte, ist sie ggf. zusätzlich als für die Datenverarbeitung verantwortliche Person ausdrücklich zu nennen.
- b) Der Name und die Kontaktdaten der zuständigen Datenschutzbeauftragten (lokal und Sponsor/Studienleitung) sind anzugeben.
- c) Auf das Bestehen eines Beschwerderechts bei einer Datenschutz-Aufsichtsbehörde (Landesdatenschutzbeauftragte oder Bundesdatenschutzbeauftragte des Prüfzentrums, Landesdatenschutzbeauftragte oder Bundesdatenschutzbeauftragte des Sponsors/Studienleitung) ist hinzuweisen. Die zuständigen Datenschutzaufsichtsbehörden sind zu nennen. Die Information sollte für jedes Prüf-/Studienzentrum angepasst sein.
- d) Die Betroffenen sind auf ihr Recht hinzuweisen, Auskunft (einschließlich unentgeltlicher Überlassung einer Kopie) über die betreffenden personenbezogenen Daten zu erhalten sowie ggf. deren Berichtigung oder Löschung zu verlangen.

Details zu Ihren Informationspflichten gegenüber den Studienteilnehmern entnehmen Sie bitte insbesondere den Artikeln 13 ff. DSGVO. Die Ethikkommission prüft die Angaben zu den zuständigen DSB und Aufsichtsbehörden nicht auf Richtigkeit. Für die Angaben zu den lokalen Datenschutzbeauftragten und Aufsichtsbehörden reicht gegenüber der Ethikkommission die Angabe eines Platzhalters. Für Ihr Vorhaben wünsche ich Ihnen viel Erfolg.

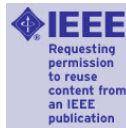
Mit freundlichen Grüßen

gez.  
Prof. Dr. Jörg Schorer



## **Anhang E**

# **Copyrighterkklärungen**



### HTC Vive: Analysis and Accuracy Improvement

Conference Proceedings:  
2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)  
Author: Miguel Borges  
Publisher: IEEE  
Date: Oct. 2018

*Copyright © 2018, IEEE*

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



### EDAN: An EMG-controlled Daily Assistant to Help People With Physical Disabilities

**Conference Proceedings:**

2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)

**Author:** Jörn Vogel**Publisher:** IEEE**Date:** 24 Oct. 2020*Copyright © 2020, IEEE*

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



### Control Architecture for Human-Robot Integration: Application to a Robotic Wheelchair

Author: C. Galindo

Publication: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)

Publisher: IEEE

Date: Oct. 2006

Copyright © 2006, IEEE

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



### Evaluation of the JACO robotic arm: Clinico-economic study for powered wheelchair users with upper-extremity disabilities

Conference Proceedings: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics

Author: Veronique Maheu

Publisher: IEEE

Date: June 2011

Copyright © 2011, IEEE

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



### Livescan3D: A Fast and Inexpensive 3D Data Acquisition System for Multiple Kinect v2 Sensors

Conference Proceedings: 2015 International Conference on 3D Vision

Author: Marek Kowalski

Publisher: IEEE

Date: Oct. 2015

Copyright © 2015, IEEE

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



AW: Website request

**Betreff:** AW: Website request  
**Von:** "Rakisits, Tim" <Tim.Rakisits@kuka.com>  
**Datum:** 01.03.2021, 10:37  
**An:** Conrad Fifelski-von Böhlen <c.fifelski-von.boehlen@uni-oldenburg.de>

Hallo Herr Fifelski-von Böhlen,

Hiermit gestatten wir Ihnen die Nutzung der angehängten Grafik bei gleichbleibenden Nutzungsbedingungen.  
KUKA wünscht Ihnen viel Erfolg bei der Ausarbeitung Ihres Projektes.

Mit freundlichen Grüßen / Kind regards

**i. A. Tim Rakisits**  
Global PR & Content  
Marketing Robotics

**KUKA Deutschland GmbH**  
Zugspitzstraße 140, 86165 Augsburg / Germany [www.kuka.com](http://www.kuka.com)  
[Tim.Rakisits@kuka.com](mailto:Tim.Rakisits@kuka.com) +49 821 797-2328

**Geschäftsführung / Board of Directors:** Klaus König (Vorsitzender), Michael Albert, Wolfgang Mayer, Michael Otto  
**Sitz und Registergericht / Registered Office:** Augsburg HRB 14914

Diese E-Mail kann vertrauliche und/oder rechtlich geschützte Informationen enthalten. Wenn Sie nicht der richtige Adressat sind oder diese E-Mail irrtümlich erhalten haben, informieren Sie bitte sofort den Absender und vernichten Sie diese Mail. Das unerlaubte Kopieren sowie die unbefugte Weitergabe dieser Mail ist nicht gestattet.

This e-mail may contain confidential and/or privileged information. If you are not the intended recipient (or have received this e-mail in error) please notify the sender immediately and destroy this e-mail. Any unauthorized copying, disclosure or distribution of contents of this e-mail is strictly forbidden.

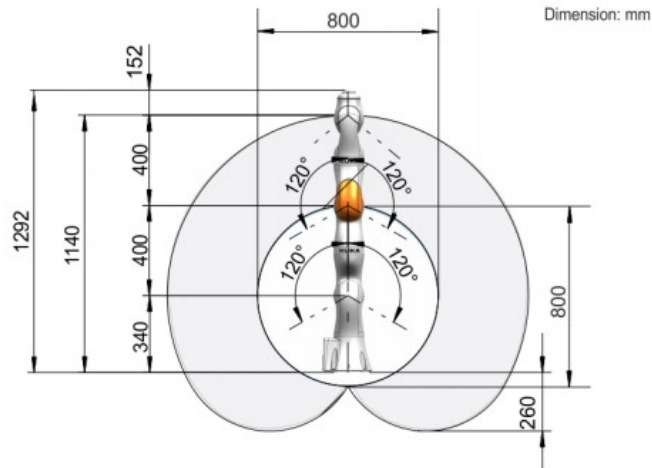
Please consider the environment before printing this e-mail.

---

**Von:** Conrad Fifelski-von Böhlen <c.fifelski-von.boehlen@uni-oldenburg.de>  
**Gesendet:** Montag, 1. März 2021 10:30  
**An:** Rakisits, Tim <Tim.Rakisits@kuka.com>  
**Betreff:** Re: Website request

Sehr geehrter Herr Rakisits,  
vielen Dank, die Bilder helfen mir sehr weiter. Ihre angehängte Reichweitenskizze (Seitenansicht) beschreibt nicht die Ausführung touch electrical. Die Ausführung touch electrical weist eine Gesamtlänge von 1292mm auf. Die Ausführung auf Ihrer Skizze 1266 mm. Ich habe die passende Reichweitenskizze vom touch electrical angehängt. Darf ich statt Ihrer angehängten Skizze die Skizze aus dem Anhang verwenden?  
viele Grüße  
Conrad Fifelski-von Böhlen

AW: Website request



Am 26.02.2021 um 10:43 schrieb Rakisits, Tim:

Hallo Herr Fifelski-von Böhlen,

Anbei habe ich Ihnen Bilder unseres LBR iiwa angehängt.  
Ist die angehängte Reichweitendarstellung die Richtige?  
Die Bilder sind frei zur Verwendung im genannten Zusammenhang.  
Bitte geben Sie bei einer Veröffentlichung der Bilder ©KUKA an.

Mit freundlichen Grüßen/ Kind regards

**i. A. Tim Rakisits**

Global PR & Content  
Marketing Robotics

**KUKA Deutschland GmbH**

Zugspitzstraße 140, 86165 Augsburg / Germany [www.kuka.com](http://www.kuka.com)  
[Tim.Rakisits@kuka.com](mailto:Tim.Rakisits@kuka.com) +49 821 797-2328

**Geschäftsführung / Board of Directors:** Klaus König (Vorsitzender), Michael Albert, Wolfgang Mayer, Michael Otto  
**Sitz und Registergericht / Registered Office:** Augsburg HRB 14914

Diese E-Mail kann vertrauliche und/oder rechtlich geschützte Informationen enthalten. Wenn Sie nicht der richtige Adressat sind oder diese E-Mail irrtümlich erhalten haben, informieren Sie bitte sofort den Absender und vernichten Sie diese Mail. Das unerlaubte Kopieren sowie die unbefugte Weitergabe dieser Mail ist nicht gestattet.

This e-mail may contain confidential and/or privileged information. If you are not the intended recipient (or have received this e-mail in error) please notify the sender immediately and destroy this e-mail. Any unauthorized copying, disclosure or distribution of contents of this e-mail is strictly forbidden.

Please consider the environment before printing this e-mail.

Website request

**Betreff:** Website request

**Von:** "Rakisits, Tim" <Tim.Rakisits@kuka.com>

**Datum:** 26.02.2021, 10:43

**An:** "c.fifelski-von.boehlen@uni-oldenburg.de" <c.fifelski-von.boehlen@uni-oldenburg.de>

Hallo Herr Fifelski-von Böhlen,

Anbei habe ich Ihnen Bilder unseres LBR iiwa angehängt.  
Ist die angehängte Reichweitendarstellung die Richtige?  
Die Bilder sind frei zur Verwendung im genannten Zusammenhang.  
Bitte geben Sie bei einer Veröffentlichung der Bilder ©KUKA an.

Mit freundlichen Grüßen / Kind regards

**i. A. Tim Rakisits**

Global PR & Content

Marketing Robotics

**KUKA Deutschland GmbH**

Zugspitzstraße 140, 86165 Augsburg / Germany [www.kuka.com](http://www.kuka.com)

[Tim.Rakisits@kuka.com](mailto:Tim.Rakisits@kuka.com) +49 821 797-2328

**Geschäftsführung / Board of Directors:** Klaus König (Vorsitzender), Michael Albert, Wolfgang Mayer, Michael Otto  
**Sitz und Registergericht / Registered Office:** Augsburg HRB 14914

Diese E-Mail kann vertrauliche und/oder rechtlich geschützte Informationen enthalten. Wenn Sie nicht der richtige Adressat sind oder diese E-Mail irrtümlich erhalten haben, informieren Sie bitte sofort den Absender und vernichten Sie diese Mail. Das unerlaubte Kopieren sowie die unbefugte Weitergabe dieser Mail ist nicht gestattet.

This e-mail may contain confidential and/or privileged information. If you are not the intended recipient (or have received this e-mail in error) please notify the sender immediately and destroy this e-mail. Any unauthorized copying, disclosure or distribution of contents of this e-mail is strictly forbidden.

Please consider the environment before printing this e-mail.

\_\_\_ FireShot Capture 1029 - Medien-Flansch. Robot Option. Für Produktfamilie LBR iiwa Montage- u\_ - \_\_\_  
docplayer.org.png

■ LBR iiwa 7 R800

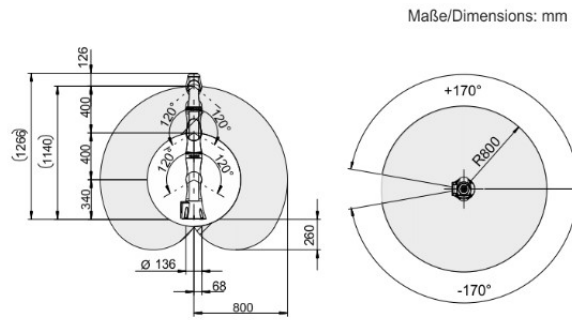
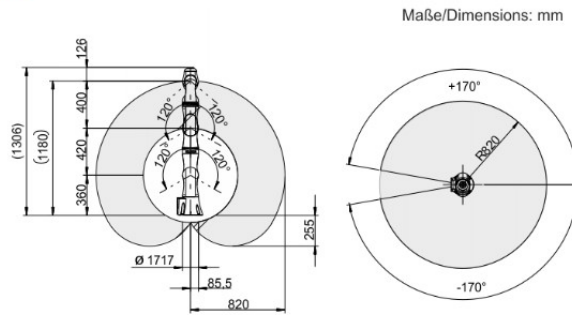


Abb. 4-14: Arbeitsbereich LBR iiwa 7 R800 mit Medien-Flansch

■ LBR iiwa 14 R820



Website request



—Web\_Image-lbr-iiwa-bewegung (1).jpg



—Anhänge:

FireShot Capture 1029 - Medien-Flansch. Robot Option. Für Produktfamilie LBR iiwa  
Montage- u\_ - docplayer.org.png

130 KB

Website request

---

Web_Image-KUKA_Rob_LBR_iiwa (2).jpg	286 KB
Web_Image-lbr-iiwa-bewegung (1).jpg	195 KB



### A teleoperated control approach for anthropomorphic manipulator using magneto-inertial sensors

Conference Proceedings:  
2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)

Author: A. Nocco

Publisher: IEEE

Date: Aug. 2017

Copyright © 2017, IEEE

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



### Ocean One: A Robotic Avatar for Oceanic Discovery

Author: Oussama Khatib  
Publication: IEEE Robotics & Automation Magazine  
Publisher: IEEE  
Date: Dec. 2016

Copyright © 2016, IEEE

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW





### A Social Robot for Autonomous Health Data Acquisition Among Hospitalized Patients: An Exploratory Field Study

Conference Proceedings:

2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)

Author: Daisy van der Putte

Publisher: IEEE

Date: March 2019

Copyright © 2019, IEEE

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



### Development of a nursing-care assistant robot RIBA that can lift a human in its arms

Conference Proceedings:  
2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems  
Author: Toshiharu Mukai  
Publisher: IEEE  
Date: Oct. 2010

Copyright © 2010, IEEE

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

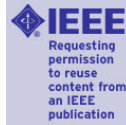
*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



### Intuitive bimanual telemanipulation under communication restrictions by immersive 3D visualization and motion tracking

Conference Proceedings:

2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)

Author: Tobias Rodehuts Kors

Publisher: IEEE

Date: Nov. 2015

Copyright © 2015, IEEE

#### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



Search



Cart

Search: keyword, ti

Search

0

Your cart is empty.

---

separate copyright holder.

When re-using content under these terms, you must provide a full citation to the original source of the SAGE material wherever such material appears in your publication.

If you determine that your re-use does require permission, please see [Process for Requesting Permission](#) for further instruction.

## Journals Exceptions

Information on this page does not apply to content sourced from the following journals:

- *Bulletin of the Atomic Scientists*
- *Contexts*
- *Diogenes*
- *Environment and Urbanization*
- *European Journal of Archaeology*
- *Journal of Asian and African Studies*
- *Journal of Fire Protection Engineering*
- *Journal of Perioperative Practice*
- *Language and Linguistics*
- *Index on Censorship*
- *International Journal of Comparative Sociology*
- *International Review of Administrative Sciences*
- *Medical Decision Making*
- *Race and Class*
- *Society and Mental Health*
- *Transcultural Psychiatry*

## Gold Open Access and SAGE Choice

If you wish to reuse an Open Access article under a Creative Commons License (as indicated on the article), visit our page on [Reusing Open Access and SAGE Choice Content](#) for more information.

To enhance your experience on our site, SAGE stores cookies on your computer. By continuing you consent to receive cookies. [Learn more.](#)

0  
Your cart is empty.

### Short Excerpts

You may republish no more than a total of 200 words or 10% of the article, whichever is less, from a single journal article within your new publication.

### Journal Abstracts

SAGE permits the non-commercial reuse of our Journal article abstracts in their entirety, without permission. A SAGE journal abstract is the preview summary of the article freely viewable on the [SAGE Journals website](#).

The screenshot shows an article page with a sidebar menu on the left and the main article content on the right. The sidebar menu includes options like 'Download PDF', 'Open EPUB', 'Full Article', 'Content List', 'Figures & Tables', 'Article Metrics', 'Cite', 'Share', 'Request Permissions', and 'Related Articles'. The main content area displays the article title, authors (Areefeh Mohammadi, PhD, Kevin Grosskopf, PhD, John Killingsworth, PhD), publication date (June 25, 2019), and a red-bordered box containing the abstract text.

**Workforce Development Through Online Experiential Learning for STEM Education**  
Areefeh Mohammadi, PhD, Kevin Grosskopf, PhD, John Killingsworth, PhD  
First Published June 25, 2019 | Research Article | [Check for updates](#)  
<https://doi.org/10.1177/1045159519854547>  
Article information

**Abstract**  
The U.S. workforce is increasingly comprised of older adults, women, and minorities who lack basic skills and are unable to acquire these skills through traditional educational and training programs. New approaches are needed to provide effective training to the adult learner and flexible support for nontraditional students who must balance work-life demands with limited educational opportunities. Contextualized teaching and learning (CTL) is a form of experiential learning that blends both basic skills and occupational training together in environments that allow students to relate subject matter to real-world situations. Virtual CTL environments can be created to better engage students, provide immediate performance feedback, reduce training time, and improve accessibility. To determine the effectiveness of CTL, the Society of Manufacturing Engineers Tooling U curriculum and learning management system (LMS) was studied. This intervention consisted of online modules with basic skills remediation blended with interactive labs and virtual reality exercises. A nonrandom population of 342 participants was chosen for study, including 75 exposed to the CTL intervention (experimental group) and 267 not exposed to the CTL intervention (control group). Learning outcomes such as test scores, completed credit hours, course completions, and earned credentials, were compared between CTL and non-CTL groups and between demographic subsets within the CTL group. Underrepresented groups, including older adults, women, and minorities, were 2 to 3 times greater in the CTL group compared with the non-CTL group. Overall, students exposed to CTL achieved higher rates of credentialing (55%) when compared with students not exposed to contextualized instruction (20%).

For clarity, the reuse of a poster or presentation abstract that appear in some journals is not included in this policy and [requires permission](#).

In addition to a full citation, you must also include a link to the article on the SAGE website. Abstracts may not be edited.

### STM

SAGE is a signatory member of the [STM Guidelines](#), which allows small amounts of material to be re-used by participating publishers under pre-agreed terms. If your publisher is also a signatory and the content you

To enhance your experience on our site, SAGE stores cookies on your computer. By continuing you consent to receive cookies. [Learn more.](#) Close



Search



Cart

Search: keyword, ti

Search

0

Your cart is empty.

---

### Author Reuse

SAGE authors wishing to reuse their own work may be able to do so within limitations. Please see [Guidelines for SAGE Authors](#).

[Rights and Permissions](#)

[Books Permissions](#)

[Journals Permissions](#)

[Process for Requesting Permission](#)

[Pre-Approved Permission Requests](#)

[Guidelines for SAGE Authors](#)

[Reusing Open Access and SAGE Choice Content](#)

[Posting to an Institutional Repository \(Gold OA\)](#)

[Posting to an Institutional Repository \(Green OA\)](#)

[License Information for CHORUS](#)

[Journal Article Reprints](#)

[Accessibility](#)

[Contact Us](#)

---

### Browse

Books

Journals

Digital Products

Reference Books

Catalogues

Open Access

### Resources for

Instructors

Deals, Authors/Editors

To enhance your experience on our site, SAGE stores cookies on your computer. By continuing you consent to receive cookies. [Learn more.](#)



Search



Cart

Search: keyword, ti

Search

0

Your cart is empty.

---

Contact

News

Careers

Accessibility

Modern Slavery Statement

Policies and Statements

Brexit Planning

Social

[Instagram](#)[Facebook](#)[Twitter](#)[LinkedIn](#)[Social Science Space](#)

---

You are in: **Europe**

[Change location](#)



© 2021 SAGE Publications

[Privacy Policy](#) | [Cookies](#) | [Accessibility](#) | [European Online Dispute Resolution](#) | [Legal Notices](#)

To enhance your experience on our site, SAGE stores cookies on your computer. By continuing you consent to receive cookies. [Learn more.](#) [Close](#)

AW: Foto von Yuanda Yu +5/100

**Betreff:** AW: Foto von Yuanda Yu +5/100

**Von:** Andre Klinger <andre.klinger@yuanda-robotics.de>

**Datum:** 09.03.2021, 18:10

**An:** "c.fifelski-von.boehlen@uni-oldenburg.de" <c.fifelski-von.boehlen@uni-oldenburg.de>

**Kopie (CC):** Christoph Kreamsler <christoph.kreamsler@yuanda-robotics.de>

Sehr geehrter Herr Fifelski-von Böhlen,

herzlichen Dank für Ihre Nachricht. Ich freue mich über Ihr Interesse an unserem kollaborativen Roboter Yu.

Im Anhang sende ich Ihnen Produktbilder des Roboters. Diese können Sie im Rahmen Ihrer Dissertation verwenden.

Bitte lassen Sie mir den Titel Ihrer Dissertation sowie eine kurze Erläuterung über den inhaltlichen Rahmen der Verwendung der Bilder zukommen.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine weiterhin erfolgreiche Ausarbeitung.

Mit freundlichen Grüßen  
André Klinger

--

André Klinger  
Junior Marketingmanager

015777926324 | [andre.klinger@yuanda-robotics.de](mailto:andre.klinger@yuanda-robotics.de)

Yuanda Robotics GmbH  
Carl-Buderus-Straße 7 | 30455 Hannover | D

Executive Board: Dr. Jens Kotlarski  
Registered Office: HRB 215101 | Hannover | USt-IdNr. DE311195074

[www.yuanda-robotics.de](http://www.yuanda-robotics.de)

-----Ursprüngliche Nachricht-----

Von: Info <[info@yuanda-robotics.de](mailto:info@yuanda-robotics.de)>

Gesendet: Dienstag, 9. März 2021 16:58

An: Andre Klinger <[andre.klinger@yuanda-robotics.de](mailto:andre.klinger@yuanda-robotics.de)>

Cc: Christoph Kreamsler <[christoph.kreamsler@yuanda-robotics.de](mailto:christoph.kreamsler@yuanda-robotics.de)>

Betreff: WG: Foto von Yuanda Yu +5/100

fyi

--

Claudia Schmidtman  
Office Assistant

+49 511 89810600 | [claudia.schmidtman@yuanda-robotics.de](mailto:claudia.schmidtman@yuanda-robotics.de)

Yuanda Robotics GmbH  
Carl-Buderus-Straße 7 | 30455 Hannover | D



AW: Foto von Yuanda Yu +5/100

Executive Board: Dr. Jens Kotlarski  
Registered Office: HRB 215101 | Hannover | USt-IdNr. DE311195074

[www.yuanda-robotics.de](http://www.yuanda-robotics.de)

-----Ursprüngliche Nachricht-----  
Von: Conrad Fifelski-von Böhlen <[c.fifelski-von.boehlen@uni-oldenburg.de](mailto:c.fifelski-von.boehlen@uni-oldenburg.de)>  
Gesendet: Dienstag, 9. März 2021 16:37  
An: Info <[info@yuanda-robotics.de](mailto:info@yuanda-robotics.de)>  
Betreff: Foto von Yuanda Yu +5/100

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Rahmen meiner Dissertation zum Thema einer immersiven Roboterfernsteuerung würde ich in der schriftlichen Ausarbeitung gerne den Roboter Yuanda Yu +5/100 als Bild zeigen. Wäre es möglich dass Sie mir ein per Mail ein Bild zukommen lassen und eine freundliche Genehmigung aussprechen, dass ich dieses Bild in der Dissertation verwenden darf? Der Bildquelle würde ich bei positiver Rückmeldung die Zeile "Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Yuanda Robotics. © Yuanda Robotics" hinzufügen und einen Link zu Ihrer Internetpräsenz hinzufügen.

Über eine positive Rückmeldung würde ich mich sehr freuen.

Viele Grüße

Conrad Fifelski-von Böhlen

— Robot04.png —

---

AW: Foto von Yuanda Yu +5/100



—Robot00.png

AW: Foto von Yuanda Yu +5/100



—Yu+ 5 100 (4).jpg

---

AW: Foto von Yuanda Yu +5/100



—Yu+ 5 100 (1).jpg



—Anhänge:

Robot04.png	3,3 MB
Robot00.png	3,0 MB

AW: Foto von Yuanda Yu +5/100

---

Yu+ 5 100 (4).jpg	1,0 MB
Yu+ 5 100 (1).jpg	851 KB



### Smart hoist: An assistive robot to aid carers

Conference Proceedings:

2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)

Author: Ravindra Ranasinghe

Publisher: IEEE

Date: Dec. 2014

Copyright © 2014, IEEE

### Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW

# **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel „Ein immersiv ferngesteuertes Robotersystem zur Unterstützung von Patiententransfers in der Pflege“ selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Oldenburg, den 11.06.2021

Conrad Fifelski-von Böhlen