

MARCO KÄPPLER

Bewertung der Interaktionsleistung von Roboter-Mensch Objektübergaben

Kinematische Untersuchungen zur Analyse des Einflusses
verschiedener Faktoren auf die Interaktionsleistung von
Mensch-Mensch und Roboter-Mensch Objektübergaben

Marco Kappler

Bewertung der Interaktionsleistung von Roboter-Mensch Objektübergaben

Kinematische Untersuchungen zur Analyse des Einflusses
verschiedener Faktoren auf die Interaktionsleistung von
Mensch-Mensch und Roboter-Mensch Objektübergaben

Bewertung der Interaktionsleistung von Roboter-Mensch Objektübergaben

Kinematische Untersuchungen zur Analyse
des Einflusses verschiedener Faktoren auf die
Interaktionsleistung von Mensch-Mensch und
Roboter-Mensch Objektübergaben

von
Marco Käppler

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation

Bewertung der Interaktionsleistung von Roboter-Mensch
Objektübergaben - Kinematische Untersuchungen zur Analyse
des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Interaktionsleistung
von Mensch-Mensch und Roboter-Mensch Objektübergaben

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Philosophie
(Dr. phil.) von der KIT-Fakultät für Geistes- und Sozialwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Marco Käppler

Tag der mündlichen Prüfung: 26. April 2024

KIT-Dekan: Prof. Dr. Michael Mäs

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Thorsten Stein

2. Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe

Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation
www.ifab.kit.edu



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs –
is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

2024

ISSN 2363-7315

DOI 10.5445/1R/1000173976

Danksagung

Diesen ersten Abschnitt meiner Arbeit möchte ich nutzen, um mich bei allen wunderbaren Menschen für ihre unermesslich wertvolle Unterstützung auf dem Weg zur Fertigstellung dieser Dissertation zu bedanken.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinen beiden Gutachtern Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml und Prof. Dr. rer. nat. Thorsten Stein bedanken. Barbara Deml möchte ich herzlich dafür danken, mir als Quereinsteiger die Chance gegeben zu haben, an ihrem Institut zu arbeiten und zu promovieren. Sie haben mir immer das Gefühl gegeben, voll und ganz hinter mir und meinen Ideen zu stehen. Durch Ihre menschliche und fachliche Unterstützung haben Sie maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Thorsten Stein möchte ich dafür danken, dass er mir bereits während meines Studiums ein wertvolles Vorbild für eine wissenschaftliche Karriere war und mich während meines Promotionsvorhabens in allen Belangen stets bestens beraten hat.

Für die Unterstützung bei der Durchführung meiner Experimente danke ich Dr. Ilshat Mamaev, Hosam Alagi und Yucheng Tang vom Institut für Anthropomatik und Robotik - Intelligente Prozessautomation und Robotik (IAR-IPR) für ihre fachliche Expertise im Bereich der Robotik und ihre Bereitschaft, mich bei meinen Untersuchungen zu unterstützen. Der fachliche Austausch hat wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Des Weiteren möchte ich mich bei Gotami Heller für ihre unermüdliche Geduld bei der Durchführung von 1680 Objektübergaben im Rahmen meines ersten Experiments bedanken.

Weiterhin danke ich meinen lieben Kolleginnen und Kollegen am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation, die mir die Zeit meiner Promotion unvergesslich gemacht haben. Manuel Zaremski, ohne deine Geduld und deinen Einfallsreichtum sowie deine herausragenden Programmierkenntnisse wäre ich wohl längst verzweifelt. Sabrina Bringeland und Tobias

Kunkel möchte ich für ihre enorme fachliche Unterstützung in meiner Anfangszeit am ifab danken. Ihr habt entscheidend dazu beigetragen, mich für die Arbeitswissenschaft zu begeistern. Nadine-Rebecca Strelau, danke ich für die ausgedehnten Kaffeepausen, die Gespräche mit dir waren eine wertvolle Unterstützung meiner emotionalen Gesundheit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Mutter Siglinde, die mich während meines Studiums und meiner Promotion immer unterstützt und an mich geglaubt hat. Ohne deine unendliche Zuversicht und deinen positiven Blick in die Zukunft wäre ich wahrscheinlich nicht so weit gekommen. Ganz besonders möchte ich mich auch bei Rahel bedanken, die immer an meiner Seite war und mich immer wieder ermutigt hat, diese Arbeit zu schreiben. Dein ruhender Pol und unsere unzähligen gemeinsamen Radtouren, Radurlaube und Radrennen haben enorm dazu beigetragen, mein Gleichgewicht und meine Ausdauer für diese Arbeit aufrecht zu erhalten.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei Dominik Herz, Dr.-Ing. Constantin Krauss und Anton Meyer-Erlach für die unzähligen Kaffee- und Mensapausen während des Schreibprozesses bedanken. Die Zeit mit euch hat definitiv dazu beigetragen, dass ich den Schreibprozess und das Promotionsverfahren als sehr positiv in Erinnerung behalten werde.

Karlsruhe, Mai 2024

Marco Käßler

Kurzfassung

Roboter, die in der Lage sind direkte Objektübergaben, schnell, sicher, zuverlässig und flüssig mit Menschen auszuführen, haben das Potenzial einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Entwicklung in den Bereichen Industrie und Gesundheitswesen zu leisten. Roboter, die Menschen sowohl zu Hause als auch im Arbeitsumfeld sicher und reibungslos unterstützen, müssen in der Lage sein, gängige Alltagsgegenstände wie Werkzeuge oder Geschirr zu greifen, zu transportieren und zu übergeben. Aktuelle Fortschritte in der Robotik ermöglichen zunehmend sichere und zuverlässigere physische Interaktionen zwischen Robotern und Menschen. Dennoch gelten direkte Objektübergaben zwischen Roboter und Mensch nach wie vor als offene Herausforderung in der Robotik-Community. Objektübergaben zwischen Menschen stellen in der Robotik eine Benchmark dar, die es in Bezug auf Geschwindigkeit, Flüssigkeit und Akzeptanz zu erreichen gilt. Bislang existieren keine einheitlichen Metriken zur objektiven Bewertung der Leistung von Objektübergaben, weder zwischen Menschen noch zwischen Mensch und Roboter. Um geeignete Leistungsparameter zur Bewertung der Mensch-Roboter-Interaktion zu identifizieren, ist ein detailliertes Verständnis der funktionalen Phasen von Objektübergaben sowie der zugrundeliegenden motorischen und kognitiven Prozesse erforderlich. Ein tieferes Verständnis der ablaufenden Prozesse und die Möglichkeit, Objektübergaben anhand geeigneter Leistungsparameter zu bewerten, führen zu fundierteren Entscheidungen bei der Entwicklung und Gestaltung von Hard- und Softwarekomponenten, was wiederum zu sichereren und zuverlässigeren Mensch-Roboter-Interaktionen führt und damit die Zukunftsfähigkeit einer effektiven Mensch-Roboter-Koexistenz sichert.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch gezielte Experimente sowohl Objektübergaben von Mensch zu Mensch als auch Objektübergaben von Roboter zu Mensch mit Alltagsgegenständen in alltagsnahen Übergabesituationen hinsichtlich ihrer Übergabeleistung zu bewerten. Die durchgeführten Experimente dienen

dazu, eine Bewertungsgrundlage für Roboter zu schaffen und Herausforderungen für die Robotik im Bereich der physischen Objektübergabe aufzuzeigen und damit Impulse für die weitere Entwicklung zu geben. Die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit tragen dazu bei, den Ablauf und die zugrundeliegenden Prozesse von Objektübergaben im Detail zu verstehen und damit eine breite Diskussionsbasis für die durchgeführten Übergabeexperimente zu schaffen.

Ein wichtiges technisches Ziel der Robotik ist es, Objektübergaben so schnell, reibungslos, sicher und robust zu realisieren wie von Mensch zu Mensch. Aus industrieller Sicht ist es für die Planung von Arbeitsschritten von großer Bedeutung, über eindeutige Kennzahlen für die Leistungsfähigkeit von Robotersystemen zu verfügen, die bei kollaborativen Aufgaben eingesetzt werden. Die quantitative Bewertung von Mensch-Mensch, Mensch-Roboter und Roboter-Mensch Übergaben ist sowohl für die wissenschaftliche Weiterentwicklung im Bereich der Mensch-Mensch Objektübergabe als auch für die technische Entwicklung neuer Hardware- und Softwarelösungen für Objektübergaben in der Robotik von großer Bedeutung. Die physische Übergabezeit ist eine wichtige Metrik, die es ermöglicht, sowohl Mensch-Mensch als auch Roboter-Mensch Übergaben hinsichtlich ihrer Leistung zu bewerten. Die physische Übergabezeit kann mit einer Vielzahl von Messsystemen und unterschiedlicher Sensorik erfasst werden und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen unterschiedlicher Forschungsdisziplinen. Derzeit existieren einige Untersuchungen zur Objektübergabe, die die physische Übergabezeit analysieren. Der Schwerpunkt dieser Untersuchungen liegt jedoch auf der Analyse der Greifkraftmodulation. Da für diese Untersuchungen speziell angefertigte Objekte mit integrierter Sensorik verwendet wurden, ist unklar, ob die Messwerte der physischen Übergabezeit aus diesen Untersuchungen mit der Übergabe von Alltagsgegenständen vergleichbar sind. Dementsprechend ist unklar, ob diese Werte als Referenzdaten für die Bewertung von Roboter-Mensch Übergaben herangezogen werden können. Um geeignete Benchmarkdaten zu generieren, werden in Experiment I Objektübergaben von Mensch zu Mensch analysiert, die eine Bewertung und Einordnung der Übergabeleistung von bestehenden und in Entwicklung befindlichen Robo-

tersystemen ermöglichen. In diesem Experiment werden der Einfluss verschiedener Objekteigenschaften sowie der Einfluss visueller und auditiver Einschränkungen des Nehmers auf die physische Übergabezeit und die gemeinsame Objektführung untersucht. Die Daten aus Experiment I sowie die Ergebnisse aus der diskutierten Literatur zeigen, dass sowohl die Objekteigenschaften als auch die Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers einen großen Einfluss auf die Übergabezeit und auch auf die Objektführung haben. Je höher der Füllungsgrad eines Bechers, desto länger die physische Übergabezeit und desto länger die Objektführung. Visuelle und auditive Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers führen zu signifikant längeren Übergabezeiten bei gleichzeitig signifikant geringerer Objektführung während der physischen Übergabe. Bei der Bewertung von Mensch-Mensch bzw. Roboter-Mensch Übergaben müssen daher Leistungsparameter wie Übergabezeiten, Übergabegeschwindigkeit und die Objektführung immer in Abhängigkeit von den Eigenschaften des zu übergebenden Objekts und der daraus resultierenden Handhabung sowie den Einschränkungen des Nehmers betrachtet werden.

In Experiment II werden Objektübergaben vom Roboter an den Menschen analysiert. Ein technisches Ziel in der Robotik ist es, Objektübergaben so gut angepasst an den Menschen wie möglich zu realisieren. Dabei ist unklar, welche Auswirkungen es hat, wenn der Roboter versucht, sich an den Menschen anzupassen, während der Mensch versucht, sich an den Roboter anzupassen. Die Anpassungsfähigkeit von Robotersystemen an den Menschen mit der Anpassungsfähigkeit des Menschen an den Roboter in Einklang zu bringen, stellt eine große Herausforderung in der Robotik dar. Um diese Fragestellung zu untersuchen, werden in Experiment II Objektübergaben vom Roboter an den Menschen analysiert. Der Fokus dieses Experiments liegt auf der Untersuchung des Einflusses einer hoch-adaptiven, an die Hand des Menschen angepassten Transportbewegung des Roboters im Vergleich zu einer festen Bewegungsbahn mit vorab festgelegter Zielposition sowie des Einflusses mehrerer Übergabedurchgänge auf die Übergabeleistung im zeitlichen Verlauf. Als abhängige Variablen werden die physische Übergabezeit, die vorzeitige Übergabe-Intervention und die subjektive Wahrnehmung der Versuchspersonen untersucht. Bei den Roboter-Mensch Übergaben in

Experiment II nimmt die physische Übergabezeit in beiden Versuchsgruppen innerhalb der ersten beiden Durchgänge signifikant ab. Die vorzeitige Übergabe-Intervention nimmt in der adaptiven Transportgruppe im Verlauf der Durchgänge signifikant zu, während die Bewertung des Sicherheitsempfindens signifikant abnimmt. Im direkten Vergleich führt die adaptive Transportmethode nicht zu signifikant höheren physischen Übergabezeiten als die nicht-adaptive Transportmethode. Die nicht-adaptive Transportmethode führt nicht zu signifikant vorzeitigeren Übergabe-Interventionen als die adaptive Transportmethode. Dagegen führt die adaptive Transportmethode zu signifikant niedrigeren Bewertungen des Vertrauens und der wahrgenommenen Sicherheit als die nicht-adaptive Transportmethode.

Im abschließenden Experiment III werden die Daten der physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben aus Experiment I herangezogen, um die Ergebnisse der physischen Übergabezeiten der Roboter-Mensch-Übergaben aus Experiment II zu bewerten und im Kontext bestehender Literatur zu diskutieren. Durch den Vergleich der Daten der physischen Übergabezeiten aus Experiment I und Experiment II kann gezeigt werden, dass sich die Versuchspersonen in Experiment II sowohl bei der adaptiven als auch bei der nicht-adaptiven Transportmethode über mehrere Übergabedurchgänge gut an den Roboter gewöhnen konnten und der Roboter gleichzeitig in der Lage war, physische Übergabezeiten auf dem Leistungsniveau von Mensch-Mensch Übergaben zu erreichen.

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit ist es entscheidend, bei der Bewertung von Roboters setups das erarbeitete Wissen über Objekteigenschaften, Wahrnehmungseinschränkungen sowie Anpassungsmechanismen des Menschen in die Interpretation der Leistungsdaten einfließen zu lassen, um die Übergabeleistung weder zu früh zu gut, noch zu früh zu schlecht zu bewerten.

Abstract

Robots that can perform direct object manipulation quickly, safely, reliably, and fluidly with humans have the potential to make a significant contribution to the future development of industry and healthcare. Robots that can safely and smoothly assist humans at home and at work must be able to grasp, transport, and hand over common everyday objects such as tools or dishes. Recent advances in robotics are increasingly enabling safer and more reliable physical interactions between robots and humans. However, direct object handover between robots and humans is still considered an open challenge in the robotics community. Human-to-human object handovers represent a benchmark in robotics to achieve in terms of speed, fluidity, and acceptance. To date, no consistent metrics exist to objectively evaluate the performance of both human-to-human and human-to-robot object handovers. To identify appropriate performance metrics for evaluating human-robot interaction, a deeper understanding of the functional phases of object handovers and the underlying motor and cognitive processes involved in object handovers is required. A deeper understanding of the processes involved and the ability to evaluate object handovers using appropriate performance parameters will lead to more informed decisions in the development and design of hardware and software components, which in turn will lead to safer and more reliable human-robot interactions, ensuring the future viability of effective human-robot coexistence.

The goal of this work is to evaluate both human-to-human and robot-to-human object handovers with everyday objects in everyday handover situations with respect to their handover performance by means of targeted experiments. The experiments conducted serve to provide an evaluation basis for robots and to highlight challenges for robotics in the area of physical object handover and thus provide impetus for further development. The theoretical foundations of this work contribute to a detailed understanding of the sequence and underlying processes of object handovers and thus provide a broad basis for discussion of the handover experiments conducted.

An important technical goal of robotics is to realize object handovers as fast, smooth, safe and robust as from human to human. From an industrial perspective, having clear metrics for the performance of robotic systems used in collaborative tasks is essential for planning work steps. The quantitative evaluation of human-human, human-robot and robot-human handovers is of great importance for the scientific development in the field of human-human object handovers as well as for the technical development of new hardware and software solutions for object handovers in robotics. Physical handover time is an important metric for evaluating the performance of both human-human and robot-human handovers. Physical handover time can be measured using a variety of measurement systems and different sensor technologies, thus contributing to the comparability of study results from different research disciplines. Currently, there are several studies on object handover that analyze physical handover time. However, the focus of these studies is on the analysis of grip force modulation. Because these studies used custom-made objects with integrated sensors, it is unclear whether the physical handover time measures from these studies are comparable to the handover of everyday objects. Accordingly, it is unclear whether these values can be used as reference data for the evaluation of robot-human handovers. In order to generate appropriate benchmark data, Experiment I analyzes human-to-human object handovers that allow for the evaluation and ranking of the handover performance of existing robot systems and those under development. In this experiment, the influence of different object properties as well as the influence of visual and auditory impairments of the taker on the physical handover time and the joint object guidance are investigated. The data from Experiment I, as well as the results from the discussed literature, show that both the object properties and the perceptual impairments of the taker have a strong influence on the handover time as well as on the object guidance. The higher the fill level of a cup, the longer the physical handover time and the longer the object guidance. Visual and auditory perceptual limitations of the taker lead to significantly longer handover times with significantly less object guidance during physical handover. Therefore, when evaluating human-human or robot-human handovers, performance parameters such as handover time, handover speed, and object guidance must always be considered in relation to

the characteristics of the object to be handed and the resulting handling, as well as the impairments of the taker.

Experiment II analyzes the object handovers from robot to human. A technical goal in robotics is to implement object handovers that are as well adapted to humans as possible. It is unclear what the effects are when the robot tries to adapt to the human while the human tries to adapt to the robot. Reconciling the adaptability of robot systems to humans with the adaptability of humans to robots is a major challenge in robotics. To investigate this issue, Experiment II analyzes object handovers from robot to human. The focus of this experiment is to investigate the influence of a highly adaptive robot transport motion, adapted to the human hand, compared to a fixed motion path with a predefined target position, as well as the influence of multiple handover runs on the handover performance over time. Physical handover time, premature handover intervention, and subjective perception of the subjects are investigated as dependent variables. For robot-human handovers in Experiment II, physical handover time significantly decreases in both experimental groups within the first two runs. The premature handover intervention significantly increases in the adaptive transport group over the course of the runs, while the safety perception rating significantly decreases. In a direct comparison, the adaptive transport method does not lead to significantly higher physical handover times than the non-adaptive transport method. The non-adaptive transport method does not lead to significantly more premature handover interventions than the adaptive transport method. In contrast, the adaptive transport method results in significantly lower ratings of trust and perceived safety than the non-adaptive transport method.

In the final Experiment III, the data of the physical handover times of the human-human handovers from Experiment I are used to evaluate the results of the physical handover times of the robot-human handovers from Experiment II and to discuss them in the context of the existing literature. By comparing the physical handover time data from Experiment I and Experiment II, it can be shown that the subjects in Experiment II were able to get used to the robot over several handover runs in both the adaptive and non-

adaptive transport method and that the robot was able to achieve physical handover times on the performance level of human-human handovers.

Based on the results of this work, it is crucial to incorporate the acquired knowledge about object properties, perceptual impairments, and human adaptation mechanisms into the interpretation of performance data when evaluating robot setups, in order to neither evaluate handover performance too good too early, nor too bad too early.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele der Arbeit.....	6
1.3	Aufbau der Arbeit	7
2	Mensch-Mensch Übergaben: Theoretischer Hintergrund	11
2.1	Abläufe und Prozesse bei Objektübergaben	11
2.2	Gemeinsames Handeln - Joint Action.....	16
2.3	Intentionales Handeln	18
2.4	Geteilte Intentionalität	23
2.5	Kommunikation	27
2.6	Motorische Kontrolle.....	31
2.7	Motorisches Lernen	36
2.8	Koordination gemeinsamen Handelns	39
2.8.1	Geteilte Aufgabenrepräsentationen	41
2.8.2	Überwachung der Zielerreichung	43
2.8.3	Prädiktion von Handlungseffekten	46
2.8.4	Entrainment	48
3	Roboter-Mensch Übergaben: Herausforderungen für die Robotik	51
3.1	Unterschiede zu Mensch-Mensch Übergaben.....	51
3.2	Bewertung von Objektübergaben	54
4	Experiment I: Generierung von Benchmarkdaten	59
4.1	Einleitung.....	59
4.2	Ziele Experiment I	63
4.3	Material und Methoden.....	63
4.3.1	Versuchsaufbau	63
4.3.2	Ablauf einer Objektübergabe.....	67
4.3.3	Stichprobe.....	68
4.3.4	Versuchsablauf	68
4.3.5	Datenverarbeitung und Statistik	70
4.4	Ergebnisse.....	76

4.4.1	Physische Übergabezeit.....	76
4.4.2	Objektführung	78
4.4.3	Übergabegeschwindigkeit	79
4.4.4	Subjektive Wahrnehmung der Versuchspersonen	81
4.5	Diskussion	83
4.5.1	Einfluss der Objekteigenschaften auf die Übergabeleistung	84
4.5.2	Einfluss der Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers	87
4.5.3	Limitationen	89
4.6	Implikationen.....	90
5	Experiment II: Optimierung von Roboter-Mensch-Übergaben	93
5.1	Einleitung	93
5.2	Ziele Experiment II.....	99
5.3	Material und Methoden.....	100
5.3.1	Versuchsaufbau	100
5.3.2	Ablauf einer Objektübergabe	102
5.3.3	Stichprobe.....	104
5.3.4	Versuchsablauf	104
5.3.5	Datenverarbeitung und Statistik	105
5.4	Ergebnisse.....	107
5.4.1	Einfluss der Transportmethode auf die physische Übergabezeit.....	108
5.4.2	Einfluss der Transportmethode auf die vorzeitige Übergabe-Intervention.....	111
5.4.3	Einfluss der Transportmethode auf die subjektive Bewertung	112
5.5	Diskussion	114
5.5.1	Einfluss der Transportmethode auf die Übergabe	115
5.5.2	Anpassung an den Roboter im Verlauf der Durchgänge	117
5.5.3	Limitationen	120
5.6	Implikationen.....	121

6 Experiment III: Bewertung der Roboter-Mensch	
Interaktionsleistung	125
6.1 Einleitung.....	125
6.2 Ziele Experiment III	128
6.3 Datenverarbeitung und Statistik.....	129
6.4 Ergebnisse.....	131
6.5 Diskussion	138
7 Zusammenfassung und Ausblick	143
8 Literaturverzeichnis	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Überblick Experiment I.....	9
Abbildung 2: Schematischer Überblick Experiment II.	10
Abbildung 3: Schematischer Überblick des Datenvergleichs.....	10
Abbildung 4: Kommunikation in der Vorübergabephase.....	14
Abbildung 5: Transport und Übergabe des Objekts	14
Abbildung 6: Physische Übergabe eines Objekts	15
Abbildung 7: Individuelles intentionales Handeln	19
Abbildung 8: Minimal-Architektur für gemeinsames Handeln.....	21
Abbildung 9: Kommunikation und geteilte Intention am Beispiel einer Objektübergabe.	26
Abbildung 10: Zusammenspiel von Vorwärtsmodell und inversem Modell	33
Abbildung 11: Schematischer Ablauf einer Roboter-Mensch Übergabe	51
Abbildung 12: Schematischer Überblick Experiment I.....	59
Abbildung 13: Kamerasetup mit 11 Infrarotkameras zur Aufnahme der Objektübergaben.	64
Abbildung 14: Versuchsaufbau der Übergabeuntersuchung	67
Abbildung 15: Studiendesign Experiment I.	70
Abbildung 16: Phaseneinteilung einer Objektübergabe	72
Abbildung 17: Messparameter und deren Verläufe zur Berechnung der Übergabephasen	73
Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der Distanz zwischen Marker der Geberhand und Marker des Objekts.....	74
Abbildung 19: Vergleich der physischen Übergabezeiten	77
Abbildung 20: Vergleich der Objektführung.....	78
Abbildung 21: Vergleich der Übergabegeschwindigkeiten.....	80

Abbildung 22: Schematischer Überblick Experiment II.	93
Abbildung 23: Ergänzung der Phaseneinteilung von Mensch-Mensch Objektübergaben.....	98
Abbildung 24: Technischer Aufbau von Experiment II	101
Abbildung 25: Ablauf einer Übergabe in Experiment II.....	102
Abbildung 26: Studiendesign Experiment II.	105
Abbildung 27: Vergleich der physischen Übergabezeiten der beiden Untersuchungsgruppen.....	108
Abbildung 28: Vergleich der Prozentsätze der Übergaben beider Versuchsgruppen.....	110
Abbildung 29: Vergleich der Mittelwerte der vorzeitigen Übergabe- Intervention	112
Abbildung 30: Vergleich der subjektiven Wahrnehmungen der beiden Versuchsgruppen.....	114
Abbildung 31: Schematischer Überblick des Datenvergleichs von Experiment I und Experiment II.....	125
Abbildung 32: Datenvergleich: Physische Übergabezeit Experiment I.	126
Abbildung 33: Datenvergleich: Physische Übergabezeit Experiment II.	127
Abbildung 34: Datenvergleich der physischen Übergabezeiten in Experiment I und Experiment II.....	129
Abbildung 35: Vergleich der physischen Übergabezeiten in Experiment II mit den physischen Übergabezeiten aus Experiment I.	131
Abbildung 36: Vergleich der physischen Übergabezeiten der Roboter- Mensch Übergaben im ersten Durchgang	132
Abbildung 37: Vergleich der physischen Übergabezeiten der Roboter- Mensch Übergaben im zweiten Durchgang	133
Abbildung 38: Vergleich der physischen Übergabezeiten der Roboter- Mensch Übergaben im dritten Durchgang	135
Abbildung 39: Vergleich der physischen Übergabezeiten der Roboter- Mensch Übergaben im vierten Durchgang.....	136

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die Varianten von Zielen und Intentionen	24
Tabelle 2: Merkmale der Übergabeobjekte der diskutierten Studien.	58
Tabelle 3: Liste der reflektierenden Marker	65
Tabelle 4: Tabellarische Beschreibung der eingeteilten Phasen, deren Start- und Endpunkte sowie deren Segmentierungsparameter.	71
Tabelle 5: Gegenüberstellung der Untersuchungsbedingungen in Experiment I und Experiment II.....	130
Tabelle 6: Mann-Whitney U Test Durchgang 1	133
Tabelle 7: Mann-Whitney U Test Durchgang 2	134
Tabelle 8: Mann-Whitney U Test Durchgang 3	136
Tabelle 9: Mann-Whitney U Test Durchgang 4	137

Anmerkungen

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird an Stellen, an denen eine geschlechtsneutrale Formulierung grammatikalisch oder stilistisch nicht möglich ist, auf die gleichzeitige Verwendung männlicher, weiblicher und diverser Sprachformen verzichtet. Alle Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für alle Geschlechter.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Mit der fortschreitenden Entwicklung von Robotern wächst das wissenschaftliche Interesse an der direkten physischen Interaktion von Robotern mit dem Menschen (Goodrich & Schultz, 2007). Roboter, die in der Lage sind direkte Objektübergaben, schnell, sicher, zuverlässig und flüssig mit Menschen auszuführen, haben das Potenzial einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Entwicklung in den Bereichen Industrie und Gesundheitswesen zu leisten. Im Zuge des Demographischen Wandels und einer damit einhergehenden Erhöhung der Lebensarbeitszeit müssen sich Unternehmen zunehmend auf die Bedürfnisse älterer Arbeitnehmer einstellen. Im Bereich der Produktion kann der Einsatz von Robotern dazu beitragen, Arbeitsprozesse stärker an die Bedürfnisse der Mitarbeiter anzupassen und dadurch die Effizienz der Produktion zu steigern (Barosz et al., 2020; Bonci et al., 2017). In der Montage können Werkzeuge oder Bauteile in einer ergonomisch günstigeren Ausrichtung an den Monteur übergeben werden, ohne dass dieser seine Aufmerksamkeit von der eigentlichen Montageaufgabe abwenden muss. Die höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig reduzierter Beanspruchung des Monteurs führt entsprechend zu einer Steigerung der Effizienz (Glaser, 2009). Im Gesundheitswesen führt der zunehmende Anteil der Menschen in höherem Alter, bei gleichzeitigem Fachkräftemangel zu großen Herausforderungen. In Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen können Roboter eingesetzt werden, um Getränke, Medikamente, Nahrungsergänzungsmittel und Verbrauchsmaterialien zu Patienten zu transportieren und diese direkt an die Adressaten zu übergeben. Serviceroboter in der Pflege können einen signifikanten Beitrag dazu leisten, Pflegekräfte zeitlich und körperlich zu entlasten und damit die Arbeitsbedingungen zu verbessern. Eine Forsa-Umfrage von 2016 mit 1003 Befragten bestätigt die Wahrnehmung der gesellschaftlichen Relevanz des Einsatzes von Robotern. 76 Prozent der Befragten glauben, dass Roboter in Zukunft auch im Alltag eine wichtige Rolle spielen werden.

83 Prozent der Befragten können sich vorstellen, einen Service-Roboter zu Hause zu nutzen, um im Alter länger in den eigenen vier Wänden bleiben zu können. Eine große Mehrheit hält die weitere Forschung und Entwicklung von Service-Robotern für den Einsatz in Haushalt, Pflege und Gesundheit für wichtig oder sogar sehr wichtig (Forsa. Politik- und Sozialforschung GmbH., 2016).

Service- und Assistenzroboter bieten für eine Vielzahl von Menschen sowohl im privaten als auch im beruflichen Kontext die Möglichkeit, ihre Lebensqualität deutlich zu verbessern. Roboter, die Menschen sowohl zu Hause als auch im Arbeitsumfeld sicher und reibungslos unterstützen, müssen in der Lage sein, gängige Alltagsgegenstände wie Werkzeuge oder Geschirr zu greifen, zu transportieren und zu übergeben (Glasauer et al., 2010; Moon et al., 2014). Aktuelle Fortschritte in der Robotik ermöglichen zunehmend sichere und zuverlässigere Interaktionen zwischen Robotern und Menschen (Glasauer et al., 2010; Huber et al., 2008). Die direkte Übergabe von Objekten zwischen Roboter und Mensch gilt in der Robotik-Community jedoch nach wie vor als offene Herausforderung. (Ortenzi et al., 2021). Nach gegenwärtigem Stand erfüllen aktuelle Robotersysteme sowie die benötigten Sicherheitsmodelle noch nicht alle notwendigen Anforderungen (z. B. Sicherheit, Verlässlichkeit, Verfügbarkeit, Bedienbarkeit durch Laien) für einen großflächigen Einsatz. Aus diesem Grund besteht eine große Notwendigkeit der Weiter- und Neuentwicklung von Hard- und Softwarekomponenten, um den Anforderungen an die physische Interaktion mit Menschen gerecht zu werden. Technologische Entwicklungen, wie z. B. die Erstellung von Bewegungs- und Geschwindigkeitsprofilen (Huber et al., 2008; Shibata et al., 1995), die Steuerung der Greifkraft (Chan et al., 2013), die kamerabasierte Handverfolgung (Zhang et al., 2020) und Sensorik (Mamaev et al., 2021) in Kombination mit maschinellem Lernen, beeinflussen neuartige Funktionsweisen von Robotern. Ziel all dieser Entwicklungen ist es, bestmögliche Objektübergaben zwischen Robotern und Menschen zu erreichen. Objektübergaben zwischen Menschen stellen in der Robotik eine Benchmark dar, die es in Bezug auf Geschwindigkeit, Flüssigkeit und Akzeptanz zu erreichen gilt (Glasauer et al., 2010; Ortenzi et al., 2021; Strabala et al., 2013). Zur Untersuchung wie nahe Benchmark und Realität beieinander liegen, verfolgt

die Arbeitswissenschaft im Rahmen der Mensch-Technik-Interaktion das Ziel, die Interaktion zwischen Mensch und Roboter zu bewerten. Um geeignete Leistungsparameter zur Bewertung der Mensch-Roboter-Interaktion zu identifizieren, ist ein tieferes Verständnis der funktionalen Phasen von Objektübergaben sowie der zugrundeliegenden motorischen und kognitiven Prozesse bei Mensch-Mensch Übergaben erforderlich. Um eine fundierte Bewertung der Roboter-Mensch-Interaktion bei Objektübergaben zu gewährleisten, sollte das Wissen aus den Fachbereichen der Arbeitswissenschaft, der Robotik, der Joint Action und der Motorik integriert werden. Ein tieferes Verständnis der ablaufenden Prozesse und die Möglichkeit, Objektübergaben anhand geeigneter Leistungsparameter zu bewerten, führen zu fundierteren Entscheidungen bei der Entwicklung und Gestaltung von Hard- und Softwarekomponenten, was wiederum zu sichereren und zuverlässigeren Mensch-Roboter-Interaktionen führt und damit die Zukunftsfähigkeit einer effektiven Mensch-Roboter-Koexistenz sichert (Grigore et al., 2013).

Nach aktuellem Forschungsstand kann eine Objektübergabe von Mensch zu Mensch formal als Joint Action (Sebanz et al., 2006) zwischen einem Geber und einem Nehmer betrachtet werden. Die Übergabe eines Objekts ist durch kognitive und motorische Prozesse gekennzeichnet, die es Menschen ermöglichen, Handlungen in Interaktion mit anderen Menschen zu koordinieren (Ortenzi et al., 2021). Die Objektübergabe zwischen Menschen erfordert ein komplexes Zusammenspiel von Vorhersage, Wahrnehmung, Handlung, Lernen und Anpassung durch beide Interaktionspartner. Zur Kommunikation der Absicht, einen Gegenstand zu übergeben, sowie des Zeitpunkts und des Orts der Übergabe, nutzen Menschen eine Vielzahl kommunikativer Signale wie Sprache, Blickverhalten, Körperbewegungen sowie Hand- und Armhaltungen (Basili et al., 2009; Chan et al., 2013; Huber et al., 2009; Lee et al., 2011; Ortenzi et al., 2021; Strabala et al., 2013). Kommunikative Signale und gesammelte Erfahrungen ermöglichen es Menschen, Vorhersagen über die Handlungen anderer Menschen zu treffen. Vorhersagen erleichtern die Koordination zwischen den Interaktionspartnern und sind von grundlegender Bedeutung für eine reibungslose Koordination und Ausführung von Übergaben (Belhassein et al., 2022; Strabala et al., 2012; Strabala et al., 2013). Aus motorischer Sicht wird davon ausgegangen, dass die ablaufenden Prozesse

komplexer sind, wenn zwei Individuen an einer gemeinsamen Handlung beteiligt sind und ihre Kontrollprozesse aufeinander abstimmen müssen. Während bei selbsterzeugten Bewegungen die notwendigen efferenten und afferenten Informationen für genaue Vorhersagen zur Verfügung stehen, ist dies bei der Vorhersage von Bewegungen anderer Personen nicht der Fall (Brand et al., 2022). Trotz dieser Komplexität sind Menschen in der Lage, Objektübergaben im Alltag mit einem hohen Maß an Zuverlässigkeit, Sicherheit, Flüssigkeit und Geschwindigkeit auszuführen (Endo et al., 2012). Die umfangreiche Erfahrung, die Menschen im Laufe ihres Lebens mit Objektübergaben gesammelt haben, ermöglicht es, das Verhalten eines Übergabepartners auf der Grundlage des Wissens über seine Situation vorherzusagen (Aglioti et al., 2008; Ikegami & Ganesh, 2017). Es ist nach wie vor unklar, wie beide Akteure ihre Handlungen unabhängig voneinander planen und ausführen und dabei das Verhalten des Partners berücksichtigen (Döhring et al., 2020). Durch die Vorhersage des Verhaltens eines Übergabepartners, das aus dem eigenen Wissen abgeleitet wird, entstehen Erwartungen, an das Verhalten dieses Partners. Wird davon ausgegangen, dass das Ziel der Robotik die Interaktionsleistung von Mensch-Mensch Übergaben ist, so ist es notwendig zu verstehen, welche Erwartungen Menschen implizit an ihre Übergabepartner haben. Es ist davon auszugehen, dass Menschen ähnliche implizite Erwartungen an einen Roboter haben. Eine entsprechend große Herausforderung für die Robotik besteht daher darin, die impliziten und expliziten Erwartungen des Menschen an die Interaktion bei Objektübergaben zu antizipieren und in die Entwicklung der Funktionsweise von Robotern einfließen zu lassen. Im Kontext der Objektübergabe müssen Service-Roboter, die in Pflegeeinrichtungen, wie Krankenhäusern, Altenheimen oder betreutem Wohnen eingesetzt werden, in der Lage sein, mehrere Herausforderungen gleichzeitig zu bewältigen. Zum einen müssen Service-Roboter in der Lage sein, Objekte mit unterschiedlichen Eigenschaften (Größe, Gewicht, Unsicherheit der Objekteigenschaften) zu übergeben. Zum anderen ist speziell in der Pflege damit zu rechnen, dass ein großer Teil der Empfänger Einschränkungen aufweist. Diese Einschränkungen können sensorischer, motorischer oder auch kognitiver Natur sein. Ein alltagstauglicher Roboter, der in einem solchen Setting direkte Objektübergaben an Menschen durchführt, muss mit diesen Einschränkungen umgehen können. Basierend auf den

theoretischen Grundlagen der Objektübergabe wird angenommen, dass Vorhersagen über das Verhalten des Interaktionspartners genutzt werden, um flüssige und sichere Objektübergaben zu ermöglichen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass auch Objekteigenschaften in die Vorhersage des Verhaltens des Interaktionspartners einfließen. So können auf Basis der Objekteigenschaften bereits Erwartungen entstehen, die der Nehmer implizit an die Objektübergabe und damit an den Interaktionspartner stellt. Eine weitere Annahme ist, dass Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers zu einem angepassten Verhalten des Gebers führen. Der Geber versucht, sich aufgrund seiner Erfahrungen in die Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers hineinzusetzen und seine eigenen Handlungen so anzupassen, dass trotz der Einschränkungen eine erfolgreiche und sichere Objektübergabe zustande kommt. Darauf aufbauend wird angenommen, dass auch ein Nehmer mit eingeschränkter Wahrnehmung aufgrund seiner Erfahrungen Vorhersagen und Erwartungen über das Verhalten seines Interaktionspartners hat und dementsprechend eine langsamere und vorsichtigeren Objektübergabe erwartet, um eine erfolgreiche Übergabe zu gewährleisten. Eine weitere Herausforderung in der Robotik besteht daher darin, die Anpassungsfähigkeit von Robotersystemen an den Menschen mit der Vorhersagbarkeit für den Menschen und der Anpassungsfähigkeit des Menschen an den Roboter in Einklang zu bringen. Ein technisches Ziel in der Robotik ist es, Objektübergaben so gut angepasst an den Menschen wie möglich zu realisieren. Robotersysteme auf aktuellem technischen Entwicklungsstand sind durch Motion-Tracking in der Lage, menschliche Bewegungen zu erkennen, diesen zu folgen und Objektübergaben an die menschlichen Bewegungen anzupassen. Gleichzeitig bieten motorische Lernprozesse dem Menschen die Fähigkeit sich an seine Umgebung anzupassen. Entsprechend ist der Mensch in der Lage sich an die Gegebenheiten eines technischen Geräts wie eines Roboters anzupassen. Weist ein Roboter ein konsistentes, gut vorhersagbares Verhalten auf, sollten Menschen in der Lage sein, sich dem Roboterverhalten anzupassen. Wenn der Roboter seine Bewegungen an den Menschen anpasst, kann dies dazu führen, dass der Mensch die Bewegungen des Roboters nicht mehr präzisieren kann, was wiederum die Anpassungsfähigkeit des Menschen an den Roboter einschränkt.

1.2 Ziele der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die identifizierten Herausforderungen für die Entwicklung der Robotik bei der direkten Objektübergabe zwischen Roboter und Mensch im Rahmen speziell entwickelter Experimente gezielt zu untersuchen und aus den Ergebnissen Gestaltungsempfehlungen für die Mensch-Roboter- bzw. Roboter-Mensch-Interaktion abzuleiten. Ziel der durchgeführten Experimente ist es, sowohl Objektübergaben von Mensch zu Mensch als auch Objektübergaben von Roboter zu Mensch mit Alltagsgegenständen in alltagsnahen Übergabesituationen hinsichtlich ihrer Übergabeleistung zu bewerten. Um der Interdisziplinarität des Forschungsfeldes der Objektübergabe Rechnung zu tragen, werden die Übergabeleistungen von Mensch-Mensch und Roboter-Mensch Übergaben anhand von objektiven und systemübergreifend übertragbaren Metriken untersucht, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit mit Untersuchungen aus anderen Fachgebieten zu ermöglichen. Die im Rahmen der durchgeführten Experimente generierten Daten sollen als Benchmarkdaten genutzt werden, die eine arbeitswissenschaftliche Bewertung der Roboter-Mensch-Interaktion ermöglichen. Die Erkenntnisse und Daten aus den durchgeführten Experimenten sollen genutzt werden, um bestehende und in der Entwicklung befindliche Robotersysteme hinsichtlich ihrer Interaktionsleistung mit dem Menschen bewerten zu können und um das bestehende Wissen über direkte Objektübergaben in den Forschungsbereichen der Robotik, der Arbeitswissenschaft, der Joint Action und der Motorik zu erweitern. Sowohl aus Sicht der Arbeitswissenschaft als auch aus Sicht der Robotik ist eine Bewertungsgrundlage zwingend erforderlich, um bestehende und zukünftige Robotersysteme hinsichtlich ihrer Interaktionsleistung bewerten zu können. Nur so ist es möglich, entwickelte Lösungen zu testen, zu vergleichen und iterativ weiterzuentwickeln.

Die Herausforderungen für die Robotik, die in dieser Arbeit behandelt werden, sind folgende:

1. Der Aufbau eines theoretischen Verständnisses der ablaufenden Prozesse bei Objektübergaben zwischen Menschen,

2. Der Einfluss verschiedener Objekteigenschaften auf die Übergabeleistung bei Mensch-Mensch Übergaben,
3. Der Einfluss von Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers auf die Übergabeleistung bei Mensch-Mensch Übergaben,
4. Generieren von Benchmarkdaten zur Bewertung von Objektübergaben zwischen Roboter und Mensch.
5. Der Einfluss eines adaptiven Roboterhaltens im Vergleich zu einem nicht-adaptiven Roboterhalten auf die Übergabeleistung und die subjektive Wahrnehmung bei Roboter-Mensch Übergaben,
6. Der Einfluss einer hohen Anzahl von Wiederholungen von Objektübergaben über mehrere Durchgänge auf die Übergabeleistung bei Roboter-Mensch Übergaben.
7. Die Bewertung des eingesetzten Robotersystems basierend auf den generierten Benchmarkdaten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die **theoretischen Grundlagen** der Objektübergabe zwischen Menschen werden in Kapitel 2 dargestellt. Ziel der theoretischen Grundlagen ist es, mit Hilfe bestehender Theorien den Ablauf und die zugrundeliegenden Prozesse von Objektübergaben im Detail zu verstehen und damit eine breite Diskussionsbasis für die durchgeführten Experimente zu schaffen. Hierfür wird zunächst die Phaseneinteilung einer Objektübergabe zwischen zwei Personen am Beispiel der Übergabe eines Glases Wasser erläutert. Dieses Beispiel wird im Verlauf der theoretischen Grundlagen immer wieder aufgegriffen, um die theoretischen Konzepte auf die Objektübergabe anzuwenden. Die Forschung zu Joint Actions (gemeinsamen Handlungen) bildet den übergeordneten Rahmen für Objektübergaben. Die Konzepte des intentionalen Handelns und der geteilten Intentionalität bilden wichtige Bausteine, um die Koordination der Interaktionspartner bei gemeinsamen Handlungen und damit auch Objektübergaben auf einer höheren Ebene zu begreifen. Um eine Objektübergabe mit anderen Menschen zu initiieren, ist Kommunikation eine wichtige Grundvoraussetzung. Um die für eine Objektübergabe notwendigen Bewegungen auszuführen und die eigenen Handlungen mit denen des Interaktions-

partners abzustimmen, sind motorische Kontrolle und motorisches Lernen erforderlich. Geteilte Aufgabenrepräsentation, Handlungsüberwachung, Vorhersage und Entrainment bilden die Grundlage für die Koordination von Gemeinsamen Handlungen. Das in Kapitel 2 erarbeitete theoretische Verständnis von Mensch-Mensch Objektübergaben wird in Kapitel 3 auf Roboter-Mensch bzw. Mensch-Roboter Übergaben übertragen. In diesem Kapitel werden die Unterschiede zwischen Mensch-Mensch und Roboter-Mensch Übergaben dargestellt und die sich daraus ergebenden Herausforderungen für die Entwicklung in der Robotik aufgezeigt. Darüber hinaus wird der Stand der Forschung zu Metriken zur Bewertung von Objektübergaben näher beleuchtet.

In **Experiment I** (Kapitel 4) werden Objektübergaben von Mensch zu Mensch analysiert, um Benchmarkdaten zu generieren, die eine Bewertung und Einordnung der Übergabeleistung bestehender und in Entwicklung befindlicher Robotersysteme ermöglichen. Im Rahmen von Experiment I (Abbildung 1) wird ein Versuchsaufbau beschrieben, der es ermöglicht, Objektübergaben mit einem Kunststoffbecher in einer alltagsnahen Übergabesituation durchzuführen und mit einem markerbasierten Motion-Tracking System aufzuzeichnen. Die Übergabeleistung der Mensch-Mensch Übergaben wird anhand der physischen Übergabezeit bewertet. In diesem Experiment wird der Einfluss verschiedener Objekteigenschaften, manipuliert durch unterschiedliche Wasserfüllmengen der Kunststoffbecher, der Einfluss visueller und auditiver Einschränkungen des Nehmers sowie der Einfluss verschiedener Raumrichtungen, aus denen die Übergaben durchgeführt werden, auf die physische Übergabezeit untersucht. Zusätzlich zur physischen Übergabezeit wird der Einfluss der genannten Manipulationen auf die gemeinsame Objektführung als abhängige Variable untersucht.

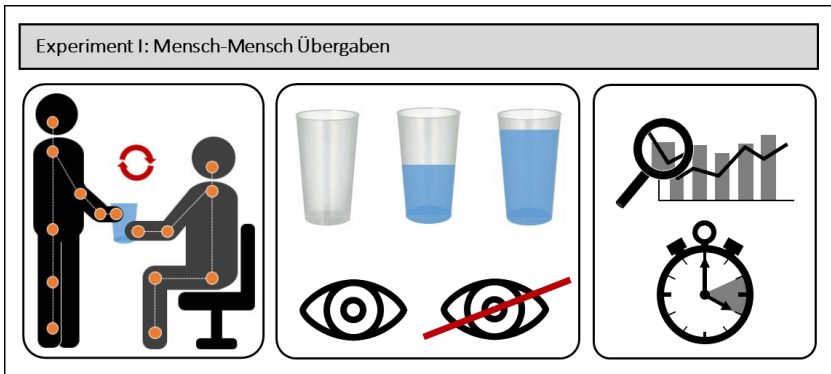


Abbildung 1: Schematischer Überblick Experiment I.

Um **Experiment II** (Kapitel 5) zu realisieren, bestand ein wichtiges Zwischenziel darin, ein Robotersystem zu identifizieren und weiterzuentwickeln, dass in der Lage ist, eine hohe Anzahl von Objektübergaben auf robuste Art und Weise durchzuführen. Zusätzlich bestand eine Herausforderung darin, dass Sensorik integriert sein muss, die eine präzise und zuverlässige Aufzeichnung der physischen Übergabezeit ermöglicht. Eine weitere Anforderung bestand darin, dass das Robotersystem in der Lage sein sollte, die Objektübergaben so schnell und flüssig durchzuführen, wie es nach aktuellem Stand der Technik möglich ist. Für die Umsetzung von Experiment II (Abbildung 2) wurde ein Panda Roboter von Franka Emika eingesetzt, der mit einer Intel RealSense Kamera und in den Greifer integrierten kapazitiven Näherungssensoren ausgestattet war. Aufbauend auf dem entwickelten Aufbau, werden der Einfluss einer hoch-adaptiven Transportbewegung des Roboters im Vergleich zu einer festen Bewegungsbahn, der Einfluss mehrerer Übergabedurchgänge im zeitlichen Verlauf sowie der Einfluss der hoch-adaptiven Transportbewegung des Roboters auf die subjektive Bewertung der Objektübergaben untersucht. Zusätzlich zur physischen Übergabezeit werden der Einfluss der hoch-adaptiven Transportbewegung und der Einfluss mehrerer Übergabedurchgänge im zeitlichen Verlauf auf die vorzeitige Übergabe-Intervention vor Erreichen der Zielposition und auf die subjektive Wahrnehmung der Versuchspersonen untersucht.

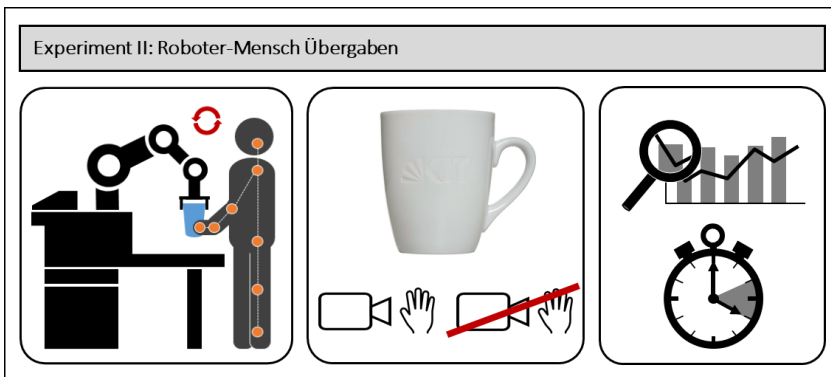


Abbildung 2: Schematischer Überblick Experiment II.

Im abschließenden **Experiment III** (Kapitel 6) werden die Ergebnisse der physischen Übergabezeiten aus **Experiment II** mit den Referenzdaten aus **Experiment I** verglichen und im Kontext der bestehenden Literatur eingeordnet und diskutiert (Abbildung 3).

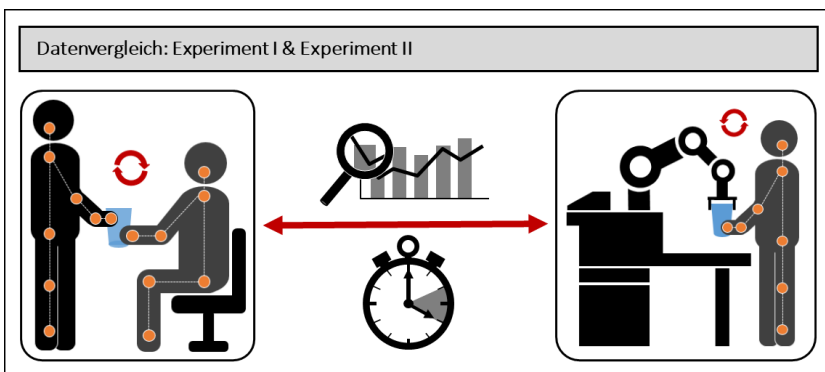


Abbildung 3: Schematischer Überblick des Datenvergleichs von Experiment I und Experiment II.

Basierend auf den Erkenntnissen aus Experiment I und Experiment II sowie dem Vergleich der Daten beider Experimente in Experiment III werden in Kapitel 7 Implikationen für die Entwicklung in der Robotik sowie für weitere zukünftige Experimente im Forschungsfeld der Objektübergabe abgeleitet.

2 Mensch-Mensch Übergaben: Theoretischer Hintergrund

Ziel der theoretischen Grundlagen ist es, einen möglichst umfassenden Einblick in die bei Objektübergaben ablaufenden kognitiven und motorischen Prozesse zu erhalten. Dazu werden zunächst der grundsätzliche Ablauf von Objektübergaben, ihre Phaseneinteilung sowie die dabei ablaufenden kognitiven und motorischen Prozesse beschrieben (Kapitel 2.1). In den folgenden drei Unterkapiteln werden die Konzepte des gemeinsamen Handelns (Kapitel 2.2), des intentionalen Handelns (Kapitel 2.3) und das Konzept der geteilten Intentionalität (Kapitel 2.4) beschrieben. Allen drei Konzepten ist gemeinsam, dass sie als übergeordnete Konzepte für das Verständnis von Objektübergaben angesehen werden können. Um die ablaufenden Prozesse bei der Objektübergabe besser verstehen zu können, werden in den anschließenden drei Unterkapiteln die Konzepte der Kommunikation (Kapitel 2.5), der motorischen Kontrolle (Kapitel 2.6) und des motorischen Lernens (Kapitel 2.7) näher erläutert. Daran schließt sich ein weiteres Unterkapitel an, das insbesondere die Prozesse der Koordination gemeinsamer Handlungen beleuchtet. Das in Kapitel 2 erarbeitete theoretische Verständnis der Objektübergabe von Mensch zu Mensch wird in Kapitel 3 auf die Roboter-Mensch- bzw. Mensch-Roboter-Übergabe übertragen. In diesem Kapitel werden die Unterschiede zwischen Mensch-Mensch- und Roboter-Mensch-Übergaben dargestellt und die sich daraus ergebenden Herausforderungen für die Entwicklung in der Robotik aufgezeigt (Kapitel 3.1). Darüber hinaus wird der Stand der Forschung zu Metriken zur Bewertung von Objektübergaben näher betrachtet (Kapitel 3.2).

2.1 Abläufe und Prozesse bei Objektübergaben

Eine Objektübergabe zwischen zwei Menschen kann definiert werden als eine kollaborative gemeinsame Handlung (Sebanz et al., 2006), bei der ein

Akteur, der *Geber*, einem anderen Akteur, dem *Nehmer*, ein Objekt übergibt (Ortenzi et al., 2021). Eine Objektübergabe kann in mehrere funktionale Phasen unterteilt werden (Mackenzie & Iberall, 1994), in denen auf verschiedenen Ebenen Interaktionen zwischen Geber und Nehmer stattfinden. Auf der einfachsten Ebene kann eine Objektübergabe in eine *Vorübergabephase* und eine *physische Übergabe* unterteilt werden (Mason & Mackenzie, 2005; Ortenzi et al., 2021). Die *Vorübergabephase* umfasst die explizite und implizite Kommunikation zwischen den beteiligten Partnern sowie das Ergreifen und Transportieren des Objekts durch den Geber. Die *physische Übergabe* umfasst den physischen Austausch des Objekts vom Geber zum Nehmer. Nach Kato et al. (2019) können Objektübergaben zwischen Menschen als natürliche und alltägliche Handlungen charakterisiert werden. Sie gelten als hochgradig automatisiert und weisen eine bemerkenswerte Erfolgsquote, unabhängig von den genauen Objekteigenschaften und der Erfahrung und Geschicklichkeit der Person, mit der interagiert wird, auf. Im Gegensatz zu einer selbsterzeugten Handlung stellt die Übergabe eines Objekts von Mensch zu Mensch eine nur teilweise präzifizierbare Aufgabe dar, da keine genauen Kenntnisse über das zukünftige Bewegungsverhalten des Interaktionspartners vorliegen (Brand et al., 2022). Dies führt bei Objektübergaben dazu, dass die aktuelle Situation und die Handlungen des Übergabepartners ständig beobachtet, interpretiert und vorhergesagt werden müssen, um flexibel agieren zu können (Vesper, 2020). *Geteilte Aufgabenrepräsentationen*, *gemeinsame Wahrnehmung*, *Handlungsüberwachung* und *Entrainment* helfen dabei, die Handlungen des anderen vorherzusagen und dadurch eine flüssige und zuverlässige interpersonale Koordination zu erreichen (Knoblich et al., 2011; Sebanz et al., 2006; Vesper, 2020; Vesper et al., 2010). Um überhaupt ein Objekt halten und übergeben zu können, benötigt der Mensch sowohl *motorische Kontrolle* (Franklin & Wolpert, 2011) als auch *motorisches Lernen* (Krakauer et al., 2019). Beim Menschen wird motorische Kontrolle durch die beiden Prozesse der Feedforward- und der Feedback-Kontrolle erreicht (Wolpert et al., 2013). Diese Prozesse, die auf individueller Ebene ablaufen, stehen in engem Zusammenhang mit der *Überwachung* und *Vorhersage* eigener Bewegungen und unterstützen damit das grundlegende Verständnis von Handlungsüberwachung und Vorhersage im Kontext von Objektübergaben zwischen zwei Menschen. Erst durch

motorisches Lernen sind Menschen in der Lage, im Verlauf ihrer Lebensspanne, ihr Verhalten an verschiedene Objekteigenschaften und die verschiedenen Eigenschaften des Bewegungsverhaltens unterschiedlicher Interaktionspartner anzupassen und dadurch das Verhalten ihrer Interaktionspartner auf der Grundlage des eigenen Wissens zuverlässig vorherzusagen (Aglioti et al., 2008; Ikegami & Ganesh, 2017).

Aus funktionaler Sicht beginnt eine Objektübergabe immer mit der *Intention*, ein Objekt zu übergeben oder zu empfangen (Aronson et al., 2018). Diese Intention kann dem Interaktionspartner über verschiedene Arten der *Kommunikation* vermittelt werden. Die Sprache, der Blick sowie Körperhaltungen, Bewegungen und bestimmte Objektkonfigurationen sind gängige Kommunikationsmittel zur Einleitung und Koordinierung von Objektübergaben (Strabala et al., 2013). Objektübergaben können auf verschiedene Weise eingeleitet werden. Zum einen können sie dadurch eingeleitet werden, dass Akteur A ein Objekt benötigt, um eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen. In diesem Fall kann von einer Übergabe durch Objektanforderung gesprochen werden, bei der Akteur A das Objekt von Akteur B anfordert. Typische Beispiele für diese Art der Initiierung sind ein Mechaniker unter einem Auto, der ein Werkzeug anfordert (Koene et al., 2014), oder ein Chirurg im Operationssaal, der ein Operationsbesteck anfordert. Andererseits kann eine Übergabe auch dadurch initiiert werden, dass ein Akteur A einen Akteur B bittet, eine bestimmte Aufgabe mit einem Objekt auszuführen. Ein Beispiel hierfür ist ein Koch, der den Sous-Chef bittet, eine Soße umzurühren, indem er das entsprechende Küchengerät anbietet (Ortenzi et al., 2021). In einem anderen Fall kann Akteur A auch Akteur B einen Gegenstand übergeben, um selbst eine Aufgabe ausführen zu können, für die der Gegenstand in seiner Hand hinderlich wäre. Ein Beispiel hierfür ist die Übergabe einer Tragetasche, um einen offenen Schnürsenkel zu binden. All diese Beispiele haben gemeinsam, dass die Intention, eine Übergabe durchzuführen, auf eine gewisse Art und Weise kommuniziert werden muss. Dies soll am Beispiel der Bitte um ein Glas in Abbildung 4 verdeutlicht werden. Sowohl in Abbildung 4A als auch in Abbildung 4B bittet die sitzende Person die stehende Person um ein Glas Wasser.

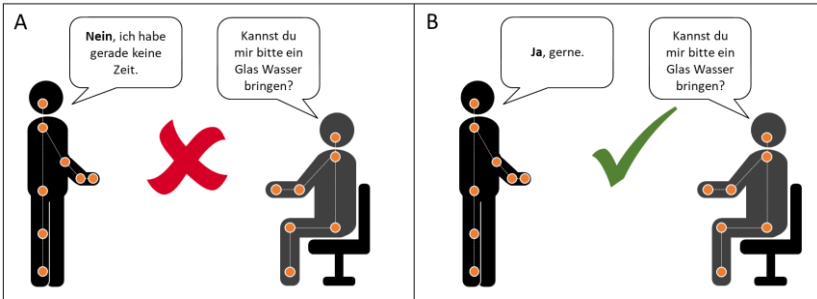


Abbildung 4: Kommunikation in der Vorübergabephase. Die sitzende Person bittet die stehende Person um ein Glas Wasser. (A) Der Übergabeintention wird nicht zugestimmt. (B) der Übergabeintention wird zugestimmt.

In Abbildung 4A stimmt der potenzielle Übergabepartner der Übergabeintention nicht zu. In diesem Fall fand zwar verbale Kommunikation statt, allerdings kam es zu keiner weiteren Interaktion. Stimmt der Übergabepartner der Übergabe zu, wie in Abbildung 4B, setzt er sich in Bewegung, holt das Objekt und transportiert es zum Nehmer, um es zu übergeben (Abbildung 5).

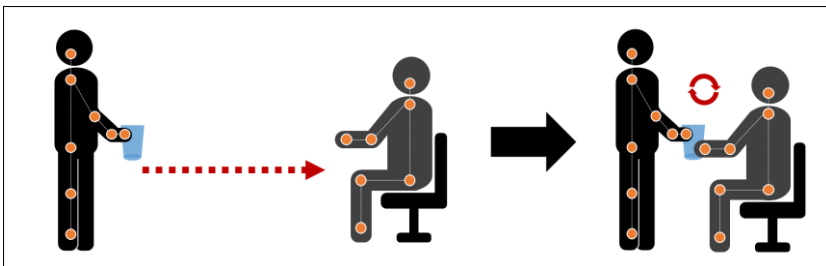


Abbildung 5: Transport und Übergabe des Objekts. Der Geber holt das gewünschte Glas Wasser und transportiert es zum Nehmer. Anschließend wird die Kontrolle über das Objekt in der physischen Übergabephase vom Geber auf den Nehmer übertragen.

Bei der Übergabe eines Objekts teilen sich sowohl der Geber als auch der Nehmer die Verantwortung und die Kontrolle über die Stabilität des Objekts. Das Endziel dieser gemeinsamen Verantwortung ist dabei für jeden Partner unterschiedlich. Das Ziel des Gebers ist es, das Objekt sicher loszulassen, während das Ziel des Nehmers darin besteht, das Objekt in einen stabilen Griff zu bekommen (Mason & Mackenzie, 2005). Chan et al. (2012) zufolge

besteht ein impliziter sozialer Vertrag, bei dem der Geber für die Sicherheit des Objekts bei der Übergabe und der Nehmer für die Aufrechterhaltung der Effizienz der Übergabe verantwortlich ist. Die physische Übergabephase beginnt sobald beide Akteure physischen Kontakt zum Übergabeobjekt haben (Abbildung 6B). Der Kontakt des Nehmers kann als eine leichte Kollision mit dem Übergabeobjekt betrachtet werden. (Controzzi et al., 2018; Mason & Mackenzie, 2005). Sobald der Nehmer den ersten Kontakt mit dem Objekt hergestellt hat, kann die Lastübertragung erfolgen. Um das Objekt sicher zu übertragen, muss der Geber die Greifkraft auf das Objekt verringern, während der Nehmer die Greifkraft erhöht. Während dieser Zeit müssen beide Partner gemeinsam ausreichende Greifkräfte auf das Objekt ausüben, um den Gravitations- und Trägheitskräften entgegenzuwirken und so ein Abrutschen des Objekts zu verhindern. Wenn der Nehmer schließlich eine ausreichende Greifkraft auf das Objekt ausübt, um eine stabile Kontrolle zu behalten, kann der Geber seinen Griff lösen (Mason & Mackenzie, 2005). Die physische Übergabe ist beendet, wenn der Nehmer die vollständige Kontrolle über das Objekt erlangt und der Geber keinen Kontakt mehr zum Objekt hat (Abbildung 6C). Nach der Phase der physischen Übergabe gehen der Nehmer oder der Geber, je nach Situation, dazu über, die Aufgabe auszuführen, die die Übergabe eingeleitet hat.

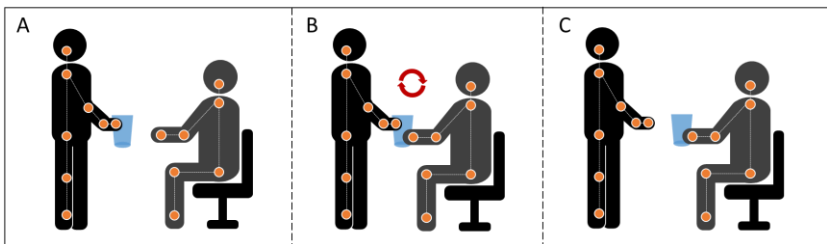


Abbildung 6: Physische Übergabe eines Objekts. (A) Transport des Objekts und vollständige Kontrolle des Objekts durch den Geber. (B) Kontakt des Nehmers mit dem Objekt, gemeinsame Kontrolle des Objekts durch Geber und Nehmer. (C) Lösen des Griffs durch den Geber vollständige Kontrolle des Objekts durch den Nehmer.

2.2 Gemeinsames Handeln - Joint Action

Eine Objektübergabe zwischen zwei Menschen lässt sich als *gemeinsame Handlung* (Joint Action) zwischen einem menschlichen Geber und einem menschlichen Nehmer beschreiben (Ortenzi et al., 2021). Einige Autoren aus den Forschungsfeldern der Joint Action (Fiebich & Gallagher, 2013; van der Wel et al., 2021) und der Robotik (Ortenzi et al., 2021) nutzen die Definition von Sebanz et al. (2006) nach der *Gemeinsames Handeln* definiert wird als...

...jede Form sozialer Interaktion, bei der zwei oder mehr Individuen ihre Handlungen räumlich und zeitlich koordinieren, um eine Veränderung in der Umwelt herbeizuführen ... erfolgreiches gemeinsames Handeln hängt von der Fähigkeit ab, 1) Repräsentationen zu teilen, 2) Handlungen vorherzusagen und 3) vorhergesagte Auswirkungen der eigenen und anderen Handlungen zu integrieren.

Nach Fiebich und Gallagher (2013) können gemeinsame Handlungen als Untergruppe von sozialen Interaktionen verstanden werden, die wiederum im Allgemeinen zu Interaktionen gezählt werden können. Unter *Interaktion* verstehen De Jaegher et al. (2010) eine wechselseitig engagierte, koregulierte Kopplung zwischen mindestens zwei autonomen Akteuren, bei der sich die Koregulierung und die Kopplung wechselseitig beeinflussen und eine selbst-erhaltende Organisation im Bereich der relationalen Dynamik einstellt. Nach dieser Definition ist die Beziehung eines Akteurs zu einem Objekt oder Werkzeug keine Interaktion, da keine Wechselseitigkeit besteht. Solange die Bedingungen dieser Definition jedoch erfüllt sind, kann sie auf artübergreifende Interaktionen oder sogar auf Interaktionen mit Robotern angewendet werden (Fiebich & Gallagher, 2013). Gemeinsame Handlungen gelten als komplexe Formen der sozialen Interaktion, die nicht auf die Funktionsweise individueller kognitiver Mechanismen reduziert werden können (De Jaegher et al., 2010). Gemeinsames Handeln unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht von individuellem Handeln. Die gemeinsame Ausführung von Handlungen erfordert häufig die Vorhersage der Handlungen des Interaktionspartners, die Anpassung des eigenen Verhaltens an die Aufgaben und Handlungen des

Interaktionspartners und eine präzise zeitliche Koordination (Vesper et al., 2010). In der Literatur bestehen unterschiedliche Ansichten darüber, was gemeinsames Handeln ausmacht. Sebanz et al. (2006) identifizieren *gemeinsame Aufmerksamkeit*, *Handlungsbeobachtung*, *Aufgabenteilung* und *Handlungskoordination* als kognitive Mechanismen, durch die eine erfolgreiche gemeinsame Handlung erreicht werden kann. Van der Wel et al. (2021) unterscheiden verschiedene Verarbeitungsebenen auf denen die Prozesse von Gemeinsamen Handlungen stattfinden. Dazu gehören die *sensorische Koordination*, die *Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung*, die *gemeinsame Aufmerksamkeit*, die *gemeinsame Handlungsplanung*, Sprache und nonverbale *Kommunikation*, die Erfahrung des gemeinsamen Handelns sowie die zugrundeliegenden Prozesse auf neuronaler Ebene (van der Wel et al., 2021).

Zur Vereinfachung und besseren Anwendbarkeit schlagen Vesper et al. (2010) eine *Minimal-Architektur* für gemeinsames Handeln vor, die die minimalen Anforderungen, die ein einzelner Akteur erfüllen muss, um sich an einer gemeinsamen Handlung zu beteiligen, beschreibt. Diese Minimal-Architektur konzentriert sich auf *geteilte Repräsentationen*, Prozesse wie *Überwachung* und *Vorhersage* sowie *Koordination*. Vertreter der Theorie dynamischer Systeme betonen, dass koordiniertes Handeln im Wesentlichen auf direkten Verbindungen zwischen Wahrnehmung und Handlung beruht, die keine Repräsentationen erfordern (Marsh et al., 2009; R. C. Schmidt & Richardson, 2008). Vesper et al. (2010) gehen hingegen davon aus, dass Menschen dazu neigen, Repräsentationen ihrer eigenen Ziele und Aufgaben und möglicherweise auch der Ziele und Aufgaben ihrer Partner zu bilden. Diese Repräsentationen werden dann für die beiden Prozesse der Überwachung und der Vorhersage genutzt. Überwachung ist ein Prozess zur Überprüfung des Fortschritts der Handlungen und Ziele. Solche Rückmeldungen können sich bei Objektübergaben auf die eigene Handlung, die Handlung des anderen Akteurs (Ray & Welsh, 2018) und das Gesamtziel beziehen. Die Vorhersage des Ergebnisses der eigenen Handlungen und möglicherweise der Handlungen des anderen Akteurs hilft bei der Koordination zwischen den Akteuren. Die Akteure sind daran interessiert, das Was, d. h. die Handlungen des anderen und dessen Ziel, das Wann, d. h. die zeitliche Koordination

(Capozzi et al., 2016), und das Wo, d. h. die räumliche Verteilung des gemeinsamen Handlungsraums (Sebanz & Knoblich, 2009), vorherzusagen.

In der Literatur werden verschiedene Ansichten vertreten, ob *geteilte Intentionen* eine notwendige Bedingung für gemeinsame Handlungen sind oder nicht. Während Sebanz et al. (2006) nicht davon ausgehen, dass geteilte Intentionen an gemeinsamen Handlungen beteiligt sind, sind Fiebich und Gallagher (2013) der Auffassung, dass koordinierte Verhaltensmuster spezifiziert sind, je nachdem, welche geteilte Intention die Akteure haben. Nach Carpenter (2009) sind gemeinsame Handlungen immer mit geteilten Intentionen verbunden. Um Objektübergaben im Sinne von geteilter Intention zu begreifen, ist es zunächst hilfreich individuelle intentionale Handlungen anhand eines Modells von Tomasello et al. (2005), das auf Kontrollsystemen basiert, zu beschreiben.

2.3 Intentionales Handeln

Das Verständnis des intentionalen Handelns ist von grundlegender Bedeutung, da es die Interpretationsmatrix für die Entscheidung, wie Menschen handeln, liefert. In einem Kontrollsystem werden Ziel, Handlung und Wahrnehmungskontrolle als Komponenten eines größeren adaptiven Systems betrachtet, das dazu dient, die Verhaltensinteraktionen des Organismus mit der Umwelt zu regulieren (Tomasello et al., 2005). Kybernetiker wie Wiener (1948) und Ashby (1956) argumentieren, dass Maschinen, die ‚intelligent‘ handeln, alle die gleiche Grundorganisation mit den gleichen drei Komponenten aufweisen: (1) einen Referenzwert oder ein Ziel, auf das das System hinarbeitet, (2) die Fähigkeit zu handeln, um die Umwelt zu verändern, und (3) die Fähigkeit, die Umwelt wahrzunehmen, um zu wissen, wann der Zustand der Umwelt dem Referenzwert entspricht (Tomasello et al., 2005).

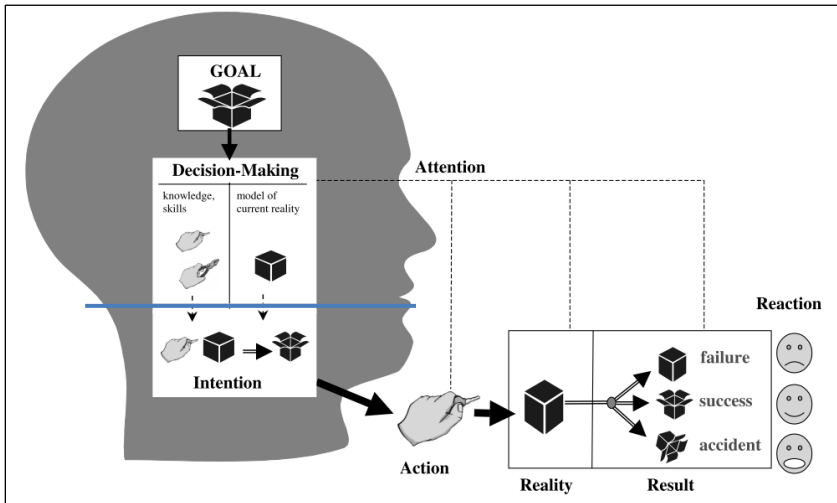


Abbildung 7: Individuelles intentionales Handeln. Das übergeordnete Ziel des Handelns ist eine geöffnete Kiste, die Realität ist eine geschlossene Kiste. Der Akteur wählt ein Mittel (einen Plan), dargestellt als Hände, um von der Realität zum Ziel zu gelangen, was eine Intention darstellt. Die sich daraus ergebende Handlung führt zu einem Ergebnis, das eine Reaktion des Akteurs nach sich zieht (Tomasello et al., 2005).

Die Anwendung dieser Erkenntnis auf menschliches intentionales Handeln ist in Abbildung 7 am Beispiel einer Person dargestellt, die vor einer verschlossenen Kiste steht und diese öffnen möchte. Tomasello et al. (2005) argumentieren in Anlehnung an Bratman (1989), dass eine Intention sowohl den Handlungsplan, den der Handelnde wählt, als auch das Ziel, das er erreichen will, umfasst. In Abbildung 7 umfasst die Intention sowohl das Ziel einer offenen Kiste als auch den Handlungsplan, um dieses Ziel zu erreichen. Von außen betrachtet führt die Intention des Handelnden typischerweise zu einer konkreten Handlung. Die Tatsache, dass die Intention das Ziel einschließt, erklärt, warum aus der Handlung einer Person nicht notwendigerweise auf ihre Intention geschlossen werden kann. Mit dem Aufschneiden der Kiste als beobachtbare Handlung können verschiedene Ziele verfolgt werden. Entweder wird die Kiste aufgeschnitten, um sie zu öffnen, oder sie wird aufgeschnitten, um sie zur Entsorgung zu zerkleinern (Tomasello et al., 2005). Nachdem die Handlung in der Realität stattgefunden hat, verändert sie den

Zustand der Umwelt. Dieser Zustand wird als Ergebnis der Handlung bezeichnet. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie das Ergebnis mit dem Ziel übereinstimmen kann: (1) ein Misserfolg, bei dem die Handlung den Zustand der Realität nicht so verändert, dass das Ziel erreicht wird; (2) ein Erfolg, bei dem die Handlung die Realität so verändert, dass sie mit dem Ziel übereinstimmt; und (3) ein Unfall, der ebenfalls nicht erfolgreich ist, die Handlung aber zu einem unbeabsichtigten Ergebnis führt. Jedes dieser Ergebnisse wird von einer emotionalen Reaktion begleitet: Enttäuschung über den Misserfolg, Freude über den Erfolg und Überraschung über den Unfall (siehe Abbildung 7). Auf die beiden Ergebnisse, die einen Misserfolg darstellen, folgt in der Regel eine anhaltende, oft variable Anstrengung, um das Ziel zu erreichen (Tomasello et al., 2005). Entscheidend für den gesamten Prozess ist die kontinuierliche Wahrnehmungsüberwachung durch den Akteur (gestrichelte Linien in Abbildung 7). Der Akteur beobachtet die Situation, um zu sehen, (1) was die aktuelle Realität ist, (2) ob er die beabsichtigte Handlung ausgeführt hat und (3) welches Ergebnis die Handlung hatte. Tomasello et al. (2005) verwenden den Begriff Aufmerksamkeit anstelle von Wahrnehmung. Nach Tomasello (1995) kann Aufmerksamkeit als intentionale Wahrnehmung aufgefasst werden. Der Handelnde nimmt nicht alles wahr, sondern achtet nur auf die Aspekte der Situation, die für das angestrebte Ziel relevant sind. Dieser Überwachungsprozess vervollständigt die zirkuläre Anordnung, die für intentionales Handeln charakteristisch ist: Der Handelnde handelt so, dass er seine wahrgenommene Realität mit seinen Zielen in Einklang bringt (Tomasello et al., 2005). Beim intentionalen Handeln folgen Handlungen und Ziele einer hierarchischen Struktur (Powers, 1973). Sobald der Handelnde sich für einen Handlungsplan entschieden hat, den er in einer intentionalen Handlung umsetzen will, muss er in der Regel auch Ziele und Handlungspläne auf einer niedrigeren Ebene erstellen. In Abbildung 7 könnte der gewählte Plan zur Erreichung des Ziels einer offenen Kiste beispielsweise darin bestehen, die Kiste mit einem Messer zu öffnen. Dies bedeutet, dass der Akteur einen Teilplan erstellen muss, um zur nahe gelegenen Schublade zu gehen, diese zu öffnen, das Messer zu holen, zur Kiste zurückzukehren und das Messer zu benutzen. Bei jedem Schritt der Auswahl eines Teilziels und eines Teilplans stehen potenziell mehrere Möglichkeiten zur Auswahl, die hinsichtlich ihrer voraussichtlichen Wirksamkeit bewertet werden, was als Entschwei-

dungsfindung bezeichnet wird. Dabei müssen auch die übergeordneten Ziele berücksichtigt werden. Der Akteur möchte das Paket öffnen, weil es ein Geschenk enthält, auf das er sich sehr freut. Aus dieser übergeordneten Perspektive ist das Öffnen der Schachtel nur ein Mittel. Im Allgemeinen kann das, was von unten betrachtet ein Ziel ist, von oben betrachtet als Mittel gesehen werden (Tomasello et al., 2005).

Im Vergleich zu individuellen Handlungen besteht der Unterschied zu gemeinsamen Handlungen darin, dass der Handelnde erkennt, dass seine Handlungen allein nicht ausreichen, um sein Ziel zu erreichen. So wie der Akteur seine Aufgabe darstellt, kann das Ziel nur mit Hilfe von X, entweder einem anderen Akteur oder einer anderen Kraft, erreicht werden. Dies wird von Vesper et al. (2010) durch die Formel $ME + X$ ausgedrückt (Abbildung 8). Im einfachsten Fall nehmen Vesper et al. (2010) an, dass der Akteur nur seine eigene Aufgabe repräsentiert. In vielen Fällen ist es jedoch notwendig, dass der Akteur eine andere Aufgabe (Aufgabe x) repräsentiert, die dem entspricht, was X tun soll.

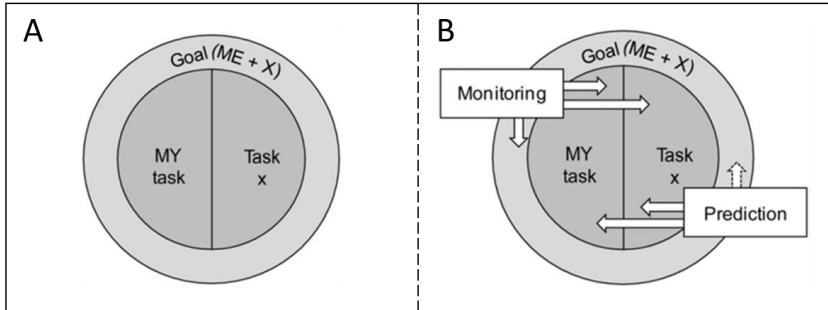


Abbildung 8: Minimal-Architektur für gemeinsames Handeln (Vesper et al., 2010). (A) Repräsentationen, die gemeinsames Handeln unterstützen, können sich entweder nur auf die eigene Aufgabe und ein Ziel beziehen, das allein nicht erreicht werden kann, oder auch die Aufgabe x einschließen. (B) Überwachungs- und Vorhersageprozesse können auf das Ziel, die eigene Aufgabe und die Aufgabe x wirken.

Gemäß der *Minimal-Architektur* für Joint Actions von Vesper et al. (2010) muss ein Akteur im Minimalfall seine *eigene Aufgabe und das Ziel repräsentieren*. Es ist nicht notwendig, die Aufgabe des anderen zu repräsentieren. Als Beispiel führen Vesper et al. (2010) zwei Personen an, die gemeinsam Tango

tanzen. Beim Tango müssen der Führende und der Folgende ihre Schritte aufeinander abstimmen. Prinzipiell könnte der Folgende die Aufgabe des Führenden auf eine ganz bestimmte Weise repräsentieren, z. B. dass der andere mit dem rechten Fuß eine Vorwärtsbewegung machen muss. Dies würde bedeuten, dass der Folgende im Prinzip seine Rolle mit dem Führenden tauschen könnte. Es ist jedoch wahrscheinlicher, dass der Folgende die Aufgabe des Führenden nicht so detailliert darstellt, oder sogar, dass er die Aufgabe des Führenden überhaupt nicht darstellt. Alles, was er braucht, ist eine Repräsentation seiner eigenen Aufgabe und das Ziel, sich entlang einer bestimmten Bahn zu bewegen, ohne den Kontakt zwischen sich und seinem Partner zu verlieren (Vesper et al., 2010). Obwohl ein Akteur, der an einer gemeinsamen Handlung beteiligt ist, wie im Beispiel des Tangos, nur seine eigene Aufgabe und das gemeinsame Ziel repräsentieren kann, ist es im Allgemeinen nützlich, die Aufgabe des anderen zu repräsentieren. Vesper et al. (2010) gehen im Rahmen ihrer Minimal-Architektur von geteilten Repräsentationen aus, die dabei helfen, die Handlungen des anderen vorherzusagen um eine bessere Koordination zu erreichen. Bei gemeinsamen Handlungen neigen Menschen dazu, ihre Bewegungen unter Berücksichtigung der Bedürfnisse des Partners zu planen um die Handlungen des Partners und deren Ergebnisse darzustellen und vorherzusagen (Sacheli et al., 2018; Wolpert et al., 2003). Aus diesem Grund wird argumentiert, dass Menschen *geteilte Repräsentationen* der Aufgabe bilden, um die Bewegungen des anderen besser vorhersagen und entsprechend handeln zu können (Ray & Welsh, 2011). Es hat sich gezeigt, dass Erwachsene dazu neigen, das Handeln eines anderen zu repräsentieren, selbst wenn sie individuell handeln und die Repräsentation des anderen ihre eigene Leistung verringert (Atmaca et al., 2008; Sebanz et al., 2003, 2005; Tsai et al., 2006). Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass es ähnliche augenmotorische Programme gibt, wenn die gleiche Szene entweder selbst ausgeführt oder nur beobachtet wird (Flanagan & Johansson, 2003; Rizzolatti & Craighero, 2004), wodurch die Vorstellung geteilter Repräsentationen verstärkt werden kann (Ortenzi et al., 2021). Geteilte Repräsentationen tragen dazu bei, die Koordination durch gemeinsame Aufmerksamkeit und damit durch die geteilte Nutzung von Wahrnehmungsinformationen zu verbessern (Sebanz et al., 2006).

In der Literatur gibt es unterschiedliche Auffassungen darüber, ob *geteilte Intentionen* eine notwendige Bedingung für gemeinsames Handeln sind oder nicht. Während Sebanz et al. (2006) nicht davon ausgehen, dass geteilte Intentionen an gemeinsamen Handlungen beteiligt sind, sind Fiebich und Gallagher (2013) sowie Carpenter (2009) der Ansicht, dass koordinierte Verhaltensmuster immer mit geteilten Intentionen verbunden sind. Um diesem Diskurs Rechnung zu tragen, wird im folgenden Abschnitt die geteilte Intentionalität in Bezug auf Objektübergaben näher betrachtet.

2.4 Geteilte Intentionalität

Um bei gemeinsamen Handlungen von einer *geteilten Intentionalität* zu sprechen, müssen nach Fiebich und Gallagher (2013) einige Bedingungen erfüllt sein. Das gemeinsame Wissen, dass man dasselbe Ziel anstrebt, gilt als eine entscheidende Voraussetzung für gemeinsame Handlungen (Sebanz et al., 2006; Tomasello et al., 2005). Zwei Individuen haben nicht nur das gleiche Ziel, sondern sind sich auch bewusst, dass sie das gleiche Ziel haben, was es zu einem gemeinsamen Ziel macht. Die Tatsache, dass zwei Individuen jeweils die persönliche Intention haben, ein bestimmtes Ziel anzustreben, und die Tatsache, dass sie beide wissen, dass sie dasselbe Ziel anstreben, reicht jedoch nicht aus, um die Art von Intention zu erfassen, die mit einer gemeinsamen Handlung verbunden ist. Die persönlichen Intentionen der beiden Akteure müssen über das Wissen des gemeinsamen Ziels hinaus, eine spezifische *Wir-Intention* (Searle, 1990) beinhalten, damit es sich um eine geteilte Intention beider Akteure handelt (für einen Überblick siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Überblick über die Varianten von Zielen und Intentionen nach (Fiebich & Gallagher, 2013).

Dasselbe Ziel	Zwei oder mehr Akteure haben dasselbe Ziel (ohne gemeinsames Wissen darüber, dass sie dasselbe Ziel haben)
Gemeinsames Ziel	Zwei oder mehr Akteure haben dasselbe Ziel und das gemeinsame Wissen, dass sie dasselbe Ziel haben.
Wir-Intention	Die besondere Absicht einer Person, zur Erreichung eines gemeinsamen Ziels zusammenzuarbeiten.
Geteilte Intention	Zwei oder mehr Akteure, die ein gemeinsames Ziel mit Wir-Absichten haben.

Searle (1990) führt zwei Beispiele an, um den Unterschied zwischen einem gemeinsamen Ziel und einer geteilter Intention zu verdeutlichen. Im ersten Beispiel befinden sich mehrere Menschen in einem Park, während es anfängt zu regnen. Viele der Menschen steuern auf einen Unterstand zu, um sich vor dem Regen zu schützen. Sie alle haben dasselbe Ziel und sind sich bewusst, dass auch die anderen Menschen um sie herum dieses Ziel haben, was es zu einem gemeinsamen Ziel macht. Als Beispiel für ein gemeinsames Ziel mit Wir-Intention führt Searle (1990) die Aufführung eines Freiluftballets an. Die Tanzenden haben das gemeinsame Ziel, mit ihrem Handeln zu einer größeren Aufführung beizutragen. Die Kombination des gemeinsamen Ziels mit der Wir-Intention führt zu einer geteilten Intention der Tanzenden. Nach Tomasello et al. (2005) müssen die Ziele und Intentionen jedes Interaktionspartners ebenfalls etwas von den Zielen und Intentionen des anderen beinhalten. Geteilte Intentionalität, bezieht sich in Anlehnung an Tomasello et al. (2005) auf kollaborative Interaktionen, bei denen die Teilnehmer ein geteiltes Ziel, geteilte Intentionen und koordinierte Handlungsrollen zur Verfolgung dieses gemeinsamen Ziels haben (Gilbert, 1989; Searle, 1995; Tuomela, 1996). Die Aktivität selbst kann komplex (z. B. ein Gebäude bauen, eine Symphonie spielen) oder einfach (z. B. gemeinsam spazieren gehen, ein Gespräch führen) sein, solange die Interagierenden auf eine bestimmte Weise miteinander verbunden sind. Nach Bratman (1993) haben gemeinsame Handlungen, drei wesentliche Merkmale: Erstens gehen die Interaktionspartner wechselseitig aufeinander ein, zweitens gibt es ein gemeinsames Ziel in dem Sinne, dass

jeder Akteur das Ziel hat, X (in gegenseitigem Wissen) gemeinsam zu tun, und drittens koordinieren die Interaktionspartner ihre Handlungspläne und Intentionen in der Hierarchie nach unten. Beide Akteure müssen ihren Handlungsplan in der Aktivität im Rahmen des Handlungsplans des anderen (und in Abstimmung mit diesem) wählen. Dies setzt voraus, dass jeder Akteur kognitiv beide Rollen der Zusammenarbeit in einem einzigen Darstellungsformat repräsentiert und so einen Rollentausch und gegenseitige Hilfe ermöglicht. Insgesamt erfordern kollaborative Aktivitäten also sowohl eine Ausrichtung des Selbst auf den anderen, um das gemeinsame Ziel zu erreichen, als auch eine Differenzierung des Selbst vom anderen, um die unterschiedlichen, aber komplementären Rollen im gemeinsamen Vorhaben zu verstehen und zu koordinieren (Tomasello et al., 2005).

Übertragen auf die Übergabe eines Glases mit Wasser an eine bewegungseingeschränkte Person ergibt sich folgende Situation (Abbildung 9): Akteur A ist bewegungseingeschränkt, verspürt Durst und möchte entsprechend etwas trinken. Sein übergeordnetes Ziel ist es, seinen Durst zu löschen. Akteur A ist sich bewusst, dass dieses Ziel nur erreicht werden kann, indem er von Akteur B ein Glas mit Wasser gebracht bekommt. Um überhaupt eine Übergabehandlung in Gang zu setzen, muss Akteur A zunächst mit Akteur B interagieren, indem er verbal darum bittet, ihm ein Glas Wasser zu bringen. Akteur B akzeptiert die Bitte von Akteur A und verpflichtet sich, Akteur A dabei zu unterstützen. Alternativ kann Akteur B die Bitte von Akteur A ablehnen, sodass keine Übergabehandlung zustande kommt. Wenn sich Akteur B dazu verpflichtet Akteur A zu unterstützen, so besteht das übergeordnete Ziel von Akteur B in der Unterstützung von Akteur A. Aus den beiden übergeordneten Zielen von Akteur A und Akteur B ergibt sich das gemeinsame Ziel der Übergabe des Wasserglases. Ab diesem Moment teilen beide Akteure eine gemeinsame Intention, und damit auch ein gemeinsames Ziel. Um das gemeinsame Ziel zu erreichen, holt Akteur B ein Glas Wasser und transportiert es zu Akteur A. Akteur B greift das Wasserglas so, dass Akteur A das Wasserglas möglichst einfach entgegennehmen kann und achtet darauf beim Transport des Wasserglases nichts zu verschütten. Akteur A beobachtet die Bewegungen von Akteur B und versucht den Ort der physischen Übergabe sowie die effizienteste Möglichkeit das Objekt zu greifen

abzuschätzen, um das Objekt so gut wie möglich von Akteur B entgegenzunehmen und dabei nichts zu verschütten. Mit der Übernahme des Objekts durch Akteur A sind für Akteur B sowohl das gemeinsame Ziel als auch sein individuelles höheres Ziel, Akteur A zu unterstützen, erfüllt. Für Akteur A ist das wichtigste Zwischenziel, das Wasserglas in seiner Hand zu halten, erfüllt, er kann nun trinken und damit sein übergeordnetes Ziel, seinen Durst zu löschen, erreichen.

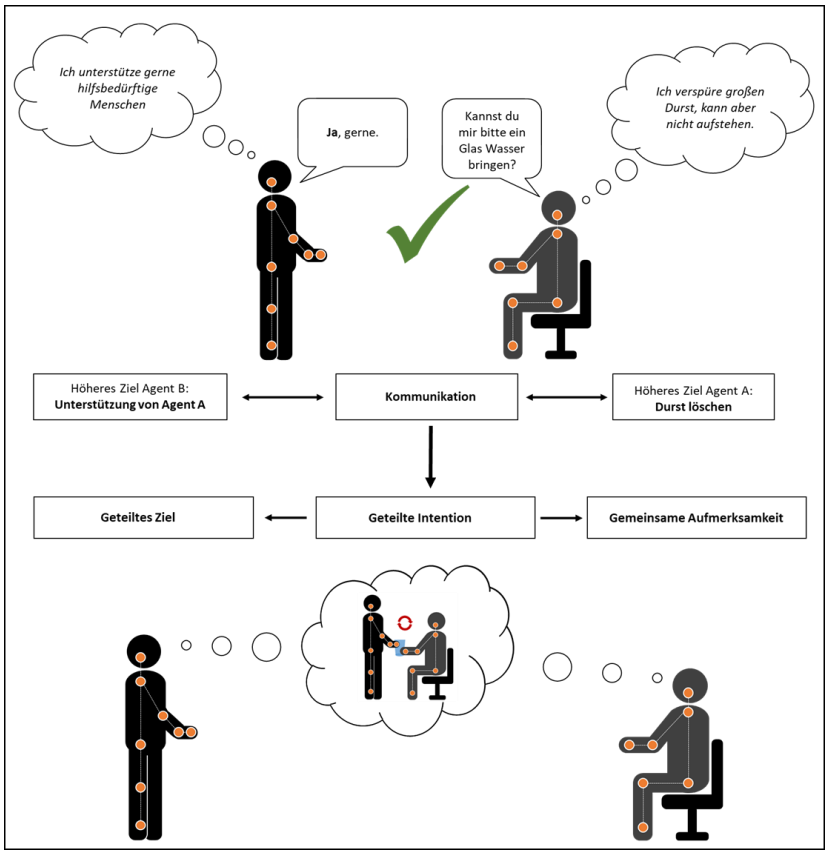


Abbildung 9: Kommunikation und geteilte Intention am Beispiel einer Objektübergabe.

Damit es bei Handlungen wie Objektübergaben zu geteilten Intentionen und entsprechenden geteilten Repräsentationen kommen kann, muss zunächst eine Form der Kommunikation stattfinden, um den Wunsch nach Interaktion einem potenziellen Interaktionspartner mitzuteilen.

2.5 Kommunikation

Kommunikation ist für gemeinsames Handeln im Allgemeinen und Objektübergaben im Speziellen entscheidend und dient insbesondere dazu, die Handlung einzuleiten, d. h. die Intention zu zeigen eine Objektübergabe durchführen zu wollen, mit der Handlung zu beginnen, und dann die Handlung zu koordinieren, sobald sie begonnen hat (Vesper et al., 2010). Kommunikation ist für Objektübergaben so wichtig, dass eine Objektübergabe sowohl als physischer Prozess (Annäherung, Reichen und Übergabe) als auch als kognitiver Prozess betrachtet werden kann (Strabala et al., 2013). Merten (1977) definiert Kommunikation als notwendige Voraussetzung für Interaktion und geht davon aus, dass für jede Interaktion Kommunikation notwendig ist. Menschen verfügen über eine breite Palette von Kommunikationsfähigkeiten, um das Was, Wann und Wo einer Übergabe zu koordinieren. Die *Sprache*, der *Blick* sowie die *Körperhaltungen* und *Bewegungen* sind gängige Kommunikationsmittel zur Einleitung und Koordinierung von Objektübergaben (Strabala et al., 2013). Die Kommunikation findet nicht nur direkt durch die Äußerung der Absicht, einen Gegenstand zu übergeben statt, sondern auch indirekt in Form von Bewegungen oder Gesten durch die ein Geber seine Absicht, einen Gegenstand zu übergeben, deutlich zeigt. Die Art und Weise, wie ein Gegenstand gegriffen und angeboten wird, gibt oft Hinweise auf die Absicht, ihn zu übergeben (Ortenzi et al., 2021). Die Informationsverarbeitung bei gemeinsamen Handlungen ist nicht auf eine Sinnesmodalität beschränkt. Der Mensch ist in der Lage, redundante Informationen aus mehreren Sinnesmodalitäten zu integrieren. Das Ziel ist es, dadurch die Zuverlässigkeit und Präzision der Wahrnehmung zu verbessern (Ernst & Banks, 2002; Wahn & König, 2015, 2016). Zusätzlich werden verschiedene Signalisierungsstrategien genutzt, um die Vorhersage des Partners über die eigenen Handlungen zu verbessern und damit durch Minimierung von Unsi-

cherheiten die Koordination zu unterstützen (Pezzulo et al., 2013). *Verbale Kommunikation* kann verwendet werden, um die Intention auszudrücken, einen Gegenstand übergeben zu wollen. Bei komplexeren Formen gemeinsamen Handelns kann Sprache auch genutzt werden, um die Handlungen während des Austauschs zu koordinieren. Der Sprachgebrauch selbst kann bereits als eine Form gemeinsamen Handelns betrachtet werden (Clark, 1996). Die Verwendung von Sprache kann jedoch auch die Koordination während einer gemeinsamen Aktion beeinträchtigen, wenn die Aufmerksamkeit der Partner zwischen mehreren Modalitäten der sensorischen Kommunikation (Masumoto & Inui, 2014) aufgeteilt ist. *Der Blick* wird als wichtiges Instrument angesehen, um die Handlungsintention zu kommunizieren und die Handlung zu koordinieren. Im Rahmen von gemeinsamen Handlungen setzt sich der Blick aus Augen-, Kopf- und Körperorientierung zusammen (Mutlu, 2009). Der Blick unterstützt die Planung von Handlungen bei der Manipulation von Objekten, indem er Positionen bzw. Kontaktpunkte ausfindig macht, an denen das Objekt gegriffen werden kann (Johansson et al., 2001). Außerdem scheint es eine Verbindung zwischen der Wahrnehmung von Handlungen und ihrer Ausführung zu geben. Castiello (2003) und Tomasello et al. (2005) zufolge sind Menschen in der Lage, die Handlungsintentionen anderer Menschen zu erkennen, indem sie deren Blicke beobachten. Die Augenbewegungen anderer gelten als wichtige Informationsquelle über das, was andere sehen, und über ihre inneren Zustände. Wenn zwei Akteure beispielsweise gemeinsam einen Tisch tragen, können sie anhand der gegenseitigen Blicke feststellen, ob jeder von ihnen ein potenzielles Hindernis (wie einen kleinen Absatz) wahrnimmt. Die Fähigkeit der Interaktionspartner die Blicke und Aufmerksamkeitszustände des anderen zu beobachten bildet die Grundlage für gemeinsame Aufmerksamkeit (Emery, 2000). Bei der Synchronisierung von Handlungen teilen die Akteure beispielsweise ihre Aufmerksamkeit zwischen Orten auf, die für ihr eigenes Ziel und das des anderen Akteurs relevant sind (Böckler et al., 2012; Ciardo et al., 2016; Kourtis et al., 2014). Das Teilen des Blicks wirkt sich auf die Handhabung von Objekten aus, indem es die Relevanz der fixierten Objekte motorisch und emotional erhöht (Becchio et al., 2008; Innocenti et al., 2012; Scorolli et al., 2014).

Neben der Sprache und dem Blick verwenden Menschen eine Reihe anderer Mittel wie *Körperhaltung, Armhaltung und Gesten*, um ihre Absicht zu kommunizieren, einen Gegenstand zu übergeben und um die Übergabe sowohl zeitlich als auch räumlich zu koordinieren. Die Präsentation eines Objekts, mit ausgestrecktem Arm, einer Neigung des Objekts in Richtung des Empfängers und eine gut zu greifende Fläche für den Empfänger, sind Konfigurationen, die die Absicht vermitteln, ein Objekt zu übergeben (Cakmak et al., 2011; Cosgun et al., 2015). In vielen Fällen plant der Geber während einer Übergabe seine Bewegungen unter Berücksichtigung der Aufgabe des Nehmers. Insbesondere überlegt der Geber, wie er das Objekt greifen kann, um es dem Nehmer auf die bestmögliche Weise anzubieten, z. B. wenn möglich, um die Manipulation des Objekts durch den Nehmer zu minimieren, bevor er das Objekt für den vorgesehenen Zweck verwendet (Gonzalez et al., 2011). Auf individueller Ebene wird dieses Phänomen als End-State Comfort Effect bezeichnet. Der End-State Comfort Effect besagt, dass die von einem Akteur für die Ausführung des ersten Teils einer Bewegung gewählte Reaktion diejenige ist, die eine bequeme Position am Ende der Bewegung gewährleistet (Short & Cauraugh, 1999). Wenn der Geber im Falle einer Objektübergabe, sein Verhalten nicht nur auf Grundlage der unmittelbaren Aufgabenanforderungen, sondern auch auf der Grundlage der nächsten auszuführenden Aufgabe anpasst, so kann nach Rosenbaum et al. (2012) von einer Planung der Manipulation von Objekten zweiter Ordnung gesprochen werden. Berücksichtigt die Planung mehr als zwei Schritte, so spricht man von einer Planung höherer Ordnung. Im Falle einer Objektübergabe kann bereits der Griff des Gebers am Objekt die vom Nehmer zu erfüllende Aufgabe berücksichtigen (Meyer et al., 2013).

Bei gemeinsamen Handlungen ist es sinnvoll, nicht nur Informationen über andere Personen zu sammeln, sondern auch aktiv Informationen über die eigenen Aktionen an andere weiterzugeben. Unter der Voraussetzung der Fähigkeit der Menschen, subtile kinematische Hinweise zu erkennen, können Ko-Akteure durch *sensomotorische Kommunikation* die kinematischen Merkmale ihrer Handlung (z. B. Geschwindigkeit oder Bewegungshöhe) anpassen, um ihre eigenen Handlungen für eine andere Person leichter vorhersagbar zu machen (Sartori et al., 2011). Sensomotorische Kommunika-

tion zeichnet sich dadurch aus, dass sie sowohl ein instrumentelles als auch ein kommunikatives Ziel hat. Dies erleichtert die Vorhersage von Handlungen, indem unterschiedliche motorische Absichten für den Beobachter disambiguiert werden (Pezzulo et al., 2013). Um Objektübergaben zu koordinieren, nutzen Menschen in der Regel nonverbale, sensomotorische Formen der Kommunikation, um Koordinierungssignale zu senden. Die Abwandlung häufiger Bewegungen, wie Armbewegungen kann von Menschen zur Kommunikation bei gemeinsamen Handlungen genutzt werden. Bewegungsabläufe können verändert werden, um dem Partner etwas mitzuteilen (Pezzulo et al., 2013). Diese subtilen Veränderungen in der Handlungskinetik liefern Informationen über die Ziele des Ausführenden und können helfen, auf seine Intentionen zu schließen. Sie haben also kommunikative und nicht nur pragmatische Auswirkungen (Becchio et al., 2012; Neal & Kilner, 2010; Sartori et al., 2009). Weitere Studien zeigen, dass Akteure, die an gemeinsamen Handlungen beteiligt sind, die Kinematik ihrer Handlungen verändern und insbesondere ihr Verhalten vorhersagbarer und unterscheidbarer machen (Pezzulo & Dindo, 2011, 2013; Sacheli et al., 2013; Vesper et al., 2010). Dies kann durch Minimierung der Varianz (Vesper et al., 2011) oder durch die Auswahl von Trajektorien geschehen, die eine schnellere Unterscheidung der Aktion von den Alternativen ermöglichen (Pezzulo & Dindo, 2013; Sacheli et al., 2013). Das Senden von Signalen zur Verringerung der Unsicherheit kann im Rahmen der sensomotorischen Kommunikation als Teil einer Strategie zur Optimierung von gemeinsamen Handlungen (Pezzulo & Dindo, 2011) verstanden werden. Bei gemeinsamen Handlungen, bei denen die Akteure in physischem Kontakt miteinander stehen, können Informationen auch über den taktilen Kanal übermittelt werden (Vesper et al., 2017) So ermöglicht beispielsweise das gemeinsame Tragen eines Tisches den gegenseitigen Austausch von Kraftinformationen, die Aufschluss über die Bewegungsrichtung oder Bewegungsgeschwindigkeit des Partners geben.

Nachdem geklärt ist, wie die Absicht zur Übergabe eines Objekts kommuniziert wird und wie die Kommunikation selbst den weiteren Prozess der Objektübergabe unterstützt, wird in den folgenden Abschnitten darauf eingegangen, welche kognitiven und motorischen Prozesse bei koordinierten individuellen und gemeinsamen Handlungen ablaufen.

2.6 Motorische Kontrolle

Aus der Perspektive der motorischen Kontrolle kann die Übergabe von Objekten von Mensch zu Mensch als koordinierte gemeinsame Handlung beschrieben werden, bei der die Kontrolle über ein Objekt von einem Geber auf einen Nehmer übertragen wird (Döhring et al., 2020). Im Allgemeinen befasst sich der Forschungsbereich der *motorischen Kontrolle* mit der Untersuchung, wie Menschen und Tiere ihre Bewegungen kontrollieren und Stabilität aufrechterhalten (Rosenbaum, 1991; R. A. Schmidt & Lee, 2011; Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Genauer genommen geht es darum, wie das Zentrale Nervensystem organisiert ist, um die Vielzahl an Muskeln und Gelenken zu koordinieren, wie externe sensorische Informationen aus der Umwelt und interne sensorische Informationen des Körpers zur Bewegungskontrolle genutzt werden können und wie die Eigenwahrnehmung, die auszuführende Aufgabe sowie die Umwelt das Bewegungsverhalten beeinflussen (Rosenbaum, 1991; R. A. Schmidt & Lee, 2011; Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Shumway-Cook & Woollacott betrachten motorische Kontrolle als eine Fähigkeit und definieren diese als „...ability to regulate or direct the mechanisms essential to movement.“ (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Nach ihrer Definition entstehen Bewegungen durch Interaktion der drei Faktoren Individuum, Aufgabe und Umwelt. Das Individuum generiert Bewegungen um die Erfordernisse der Aufgabe, die in einer spezifischen Umwelt ausgeführt werden, zu erfüllen. Hossner et al. (2013) spezifizieren diese Mechanismen und definieren motorische Kontrolle als „die internen Steuerungs- und Regelungsmechanismen, die äußerlich sichtbarem Bewegungsverhalten zugrunde“ liegen.

Zur Erklärung motorischer Kontrolle liegt eine Vielzahl von Modellen und Theorien vor. Laut Magill (2007) soll eine gute Theorie der motorischen Kontrolle erklären, wie das Nervensystem koordinierte Bewegungen generiert, um eine Vielzahl motorischer Fertigkeiten in unterschiedlichen Umweltkontexten erfolgreich auszuführen. Eine allgemein anerkannte und tragfähige Theorie zur Erklärung der motorischen Kontrolle sowie des motorischen Lernens stellt die *Theorie interner Modelle* dar (Hossner et al., 2013; Wolpert et al., 1995). Als Beispiel für interne Modelle gelten neuronale

Netzwerke, die sensomotorische Transformationen berechnen können. Sensomotorische Transformationen können anhand von äußerlich sichtbaren Bewegungen anschaulich erklärt werden. Äußerlich sichtbare Bewegungen entstehen aus motorischen Outputs, die durch neuronale Kommandos generiert werden. Neuronale Kommandos wirken auf die Muskeln ein, lassen diese kontrahieren und dadurch Bewegungen entstehen. Die motorischen Outputs sind die Ergebnisse von sensomotorischen Transformationen, d. h. interner Berechnungen (interner Modelle) die sensorische Information in motorische Information transformieren. Sensomotorische Inputs beinhalten extrinsische Informationen über den Zustand der Umwelt sowie intrinsische Informationen über den Körper. Extrinsische Informationen, zum Beispiel die räumliche Lage eines Ziels, können durch auditive und visuelle Inputs bereitgestellt werden. Intrinsische Informationen beinhalten kinematische und kinetische Informationen über den Körper. Kinematische Informationen beinhalten Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung, Gelenkwinkel und Muskellängen ohne Bezug zu den Kräften die sie auslösen. Kinetische Informationen beinhalten Informationen über die Kräfte, die der Körper generiert oder erfährt (Wolpert et al., 2013). Bei monosynaptischen Reflexen wie dem Kniesehenreflex, handelt es sich um einfache sensomotorische Transformationen, bei denen sensorischer Input direkt, ohne Eingriff höherer Hirnzentren, zu motorischem Output führt. Reflexe gelten als stereotype Bewegungsmuster, die gar nicht oder nur eingeschränkt durch den Willen beeinflusst werden können. Willkürbewegungen hingegen sind bewusste, geplante Bewegungen wie Greifen, Zeigen oder Sprechen (Konczak, 2003). Für Willkürbewegungen werden mehrstufige sensomotorische Transformationen benötigt. Damit eine Person ein Objekt greifen kann, muss sensorische Information über die Lage des Ziels in eine Abfolge von Muskeltätigkeiten umgewandelt werden, die zu Gelenkbewegungen führen, was wiederum dazu führt, die Hand zum Ziel zu bewegen. Die neuronalen Netzwerke die solche sensomotorischen Transformationen berechnen, können als Beispiele für interne Modelle gesehen werden. Daher gelten interne Modelle als neuronale Repräsentationen des eigenen Körpers und der Umwelt (Wolpert et al., 2013). Interne Modelle lassen sich in zwei Varianten unterscheiden. Zum einen *interne Vorwärtsmodelle* und zum anderen *interne inverse Modelle* (Jordan & Rumelhart, 1992). Ein Vorwärtsmodell, oder Prädiktormodell,

repräsentiert kausale Beziehungen zwischen Handlungen und ihren Konsequenzen. Es schätzt zukünftige sensorische Inputs auf Grundlage der motorischen Outputs. Dazu wird eine Efferenzkopie eines motorischen Kommandos, das auf das sensomotorische System einwirkt, in ein Vorwärtsmodell übermittelt (Kawato, 1999). Das Vorwärtsmodell fungiert dann als Simulator des Muskelskelettsystems, das sich in der Umwelt bewegt (Hossner et al., 2013; Wolpert et al., 2013). Das inverse Modell, oder Kontrollmodell, dagegen berechnet motorische Outputs aus sensorischen Inputs. Mit einem inversen Modell können motorische Kommandos festgelegt werden, die bestimmte Bewegungen erzeugen, um eine gewünschte sensorische Konsequenz zu erreichen. Abbildung 10 veranschaulicht das Zusammenspiel von Vorwärtsmodell und inversem Modell am Beispiel des Beugens des Arms mit einem Ball in der Hand. Im Falle von korrekten Struktur- und Parameterwerten des Vorwärtsmodells und des inversen Modells wird der Output des Vorwärtsmodells (prädiziertes Verhalten) der Gleiche sein wie der Input des inversen Modells (gewünschtes Verhalten) (Wolpert et al., 2013).

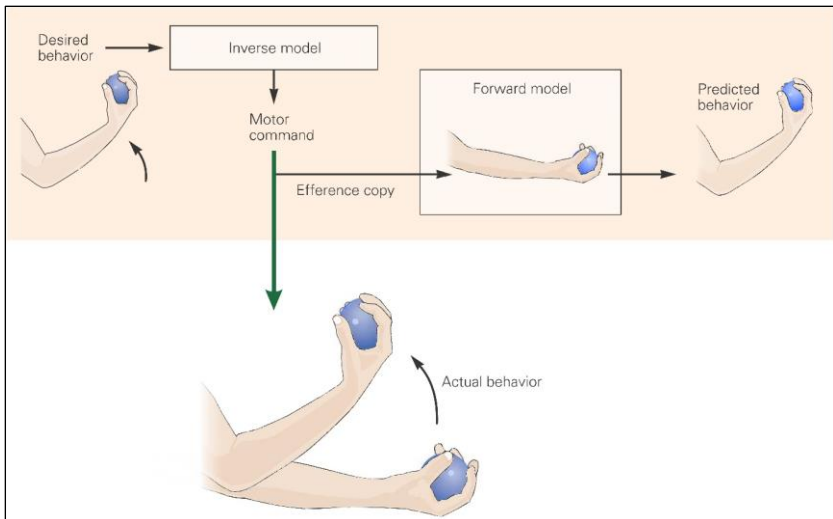


Abbildung 10: Zusammenspiel von Vorwärtsmodell und inversem Modell (Wolpert et al., 2013).

Für die motorische Kontrolle lassen sich die zwei Mechanismen *Regelung (Feedback-Kontrolle)* und *Steuerung (Feedforward-Kontrolle)* unterscheiden. Bei der *Feedback-Kontrolle* wird auf der Basis sensorischer Rückmeldungen ein Kontrollsignal generiert. Die sensorischen Rückmeldungen werden entweder während der Bewegungsausführung (online) oder nach Bewegungsende (offline) verarbeitet (Konczak, 2003; Scott, 2004). Feedback-Kontrolle nutzt sensorische Signale, um Bewegungen zu korrigieren. Um Bewegungsfehler zu korrigieren, während sie auftreten, muss die Bewegung erfasst werden, bevor sie abgeschlossen ist. Solche Fehlerkorrektursysteme werden als Feedback- oder *Closed-loop-Systeme* bezeichnet, weil die sensomotorische Schleife geschlossen ist (Wolpert et al., 2013). *Feedforward-Kontrolle* hingegen ist eine Form der Kontrolle, die auf der Ausführung eines zuvor formulierten Bewegungsplans basiert (Konczak, 2003). Feedforward Kommandos werden ohne Berücksichtigung der Konsequenzen generiert. Um möglichst genaue Kommandos zu generieren, ist es wichtig, über ein gut entwickeltes inverses Modell zu verfügen. Solche Kommandos werden auch als *Open-loop* bezeichnet, da die sensomotorische Schleife nicht durch sensorisches Feedback geschlossen wird. Feedforward-Kontrolle ist wichtig für ballistische Bewegungen, wie einen Boxschlag mit einer Dauer von ca. 40 ms, da das sensomotorische System Verzögerungen aufweist. Visuelles Feedback benötigt etwa 100 ms (Wolpert et al., 2013), um von der Retina verarbeitet und an den visuellen Kortex weitergeleitet zu werden. Bei der weiteren Verarbeitung kommt es zu weiteren Verzögerungen. Die kombinierte Verzögerung der sensomotorischen Schleife beträgt ca. 200 ms (Wolpert et al., 2013) bis zur Antwort auf einen visuellen Stimulus. Das bedeutet, dass bei schnellen Bewegungen kein sensorisches Feedback genutzt werden kann. Auch bei Bewegungen mit längerer Dauer können zur Initialisierung der Bewegung nur sensorische Informationen über den Ausgangszustand des Körpers und der Umgebung verwendet werden. Daher muss für die Initialisierung einer Bewegung die Feedforward-Kontrolle verwendet werden. (Wolpert et al., 2013). In den meisten motorischen Systemen wird motorische Kontrolle durch beide Prozesse, also Feedforward und Feedback erreicht. Da sensorisches Feedback für den ersten Teil einer Bewegung nicht zur Verfügung steht, generieren allein Feedforward-Prozesse die anfänglichen motorischen Kommandos. Wenn die Bewegung voranschreitet, wird Information

über die Bewegung verfügbar, was dazu führt, dass Feedback-Kontrolle eingreifen kann (Wolpert et al., 2013). Präzise Feedback-Kontrolle von Bewegungen benötigt Informationen über den aktuellen Zustand des Körpers, zum Beispiel die Positionen und Geschwindigkeiten der Körpersegmente. Das sensorische Feedback wird allerdings verrauscht und zeitlich verzögert. Ungenauigkeiten können entweder durch die Variabilität der sensorischen Inputs und motorischen Outputs oder durch Fehler in den internen Repräsentationen dieser Informationen entstehen. Eine wichtige Komponente der sensomotorischen Variabilität ist die Variabilität der Sensoren und Motoneuronen aufgrund von Fluktuationen ihres Membranpotenzials. Diese Fluktuationen sind auch bekannt als neural noise. Auf der Inputseite limitiert neural noise die Genauigkeit der Schätzungen der Lage eines Ziels oder der Gliedmaßen. Auf der Outputseite limitiert neural noise die Genauigkeit und Präzision der Muskelkontraktionen. Außerdem tendiert neural noise dazu, bei komplexen motorischen Kommandos anzusteigen und limitiert dadurch unsere Fähigkeit uns gleichzeitig schnell und genau zu bewegen (Faisal et al., 2008). Verzögerungen im Feedback können zu Problemen während der Bewegung führen, da die verzögerte Information nicht den aktuellen Zustand des Körpers und der Umwelt widerspiegelt. Motorische Kommandos stellen zusätzliche Informationen zum sensorischen Feedback bereit, die bereits zu einem früheren Zeitpunkt verarbeitet werden können. Wenn der aktuelle Zustand des Körpers und das efferente motorische Kommando bekannt sind, kann der nächste Zustand des Körpers geschätzt werden. Diese Schätzung wird aus einem Vorwärtsmodell generiert, das prädiziert wie der Körper sich als Reaktion auf das motorische Kommando verändert. Weil diese Schätzung prädiktiv ist, ist sie zeitlich vorteilhaft und kompensiert dadurch die Feedbackverzögerungen (Lalazar & Vaadia, 2008; Shadmehr & Wise, 2005; Wolpert et al., 2013). Entsprechend gilt Prädiktion als Hauptkomponente der Zustandsschätzung. Die Diskrepanz zwischen aktuellem und prädiziertem sensorischen Feedback ist der wesentliche Stimulus für das Lernen und Anpassen motorischer Kontrolle (Wolpert et al., 2013). Feedback-Kontrolle dagegen kann kein Kommando durch Antizipation eines Fehlers generieren. Sie wird immer durch einen tatsächlich auftretenden Fehler gesteuert. Durch kontinuierliche Korrektur einer Bewegung kann Feedback-Kontrolle wider-

standsfähig gegenüber neural noise des sensomotorischen Systems und Umweltstörungen werden (Wolpert et al., 2013).

2.7 Motorisches Lernen

Im Verlauf ihrer Lebensspanne müssen Menschen ihr motorisches Repertoire erweitern und neue sowie existierende motorische Programme kontinuierlich an sich verändernde Umstände anpassen. Ohne diese Fähigkeit wäre der Mensch, allein mit seinen angeborenen Verhaltensmustern wie Greif- und Saugreflexen, nicht in der Lage mit den Anforderungen seiner Umwelt zurecht zu kommen. Die Erweiterung des motorischen Repertoires wird als *skill learning* bezeichnet, die Modifikation und damit die Anpassung existierender motorischer Kontrollstrategien dagegen als *Adaptation* (Shadmehr & Wise, 2005). Sowohl die Fähigkeiten der Aneignung neuer als auch der Anpassung existierender motorischer Kontrollstrategien gelten als Formen des *motorischen Lernens* (Shadmehr & Wise, 2005). Zum Begriff des motorischen Lernens existieren vielfältige Definitionen. Schmidt und Lee definieren motorisches Lernen als „...set of processes associated with practice or experience leading to relatively permanent gains in the capability for skilled performance.“ (R. A. Schmidt & Lee, 2014). Hossner et al. (2013) führen eine etwas weniger spezifische Definition an. Sie definieren motorisches Lernen als „Prozess der zeitlich relativ überdauernden Veränderung der motorischen Kompetenz [...], die auf gesammelten Bewegungserfahrungen beruhen, insbesondere auf spezifischen Übungsprozessen.“. Shadmehr und Wise beschreiben den Prozess des motorischen Lernens dagegen als „...acquisition of information about movements (and other motor outputs), including what output to produce as well as how and when to produce it. Motor learning results in the formation of motor memory“ (Shadmehr & Wise, 2005). Entscheidend für motorisches Lernen ebenso wie für motorische Kontrolle ist sensorische Information. Abhängig vom Typ der Information, die das motorische System als Lernsignale nutzt, können unterschiedliche Prozesse motorischen Lernens unterschieden werden. Dabei kann zwischen *error-based learning*, *reinforcement learning* und *use-dependent learning* unterschieden werden (Krakauer & Mazzoni, 2011; Wolpert et al.,

2011). Beim *error-based learning* nimmt das sensomotorische System das Ergebnis einer ausgeführten Bewegung wahr und vergleicht es mit dem gewünschten bzw. prädierten Ergebnis. Stimmen das aktuelle und das prädierte Ergebnis nicht überein, wird von einem Prädiktionsfehler gesprochen. Die Information, die in einem solchen sensorischen Prädiktionsfehler enthalten ist, sagt dem System nicht nur, dass es das Ziel verfehlt hat, sondern spezifiziert die Art in der das Ziel verfehlt wurde (Wolpert et al., 2011). Für Reichbewegungen beispielsweise kann das motorische System die Kraft, die auf den Arm wirken wird, einschätzen. Wenn eine störende Kraft erfahren wird, wird die Schätzung durch Nutzung des Prädiktionsfehlers aktualisiert. Während der nächsten Bewegung versucht das motorische System die Störung aufzuheben, indem es eine Kraft generiert, die der aktuellen geschätzten Kraft entgegenwirkt (Diedrichsen et al., 2010). Error-based learning gilt als treibende Kraft hinter vielen gut untersuchten Adaptationsparadigmen, wie Prismenadaptation, Sakkadenadaptation, Reichbewegungen in Kraftfeldern, Visuomotorische Adaptation und Griffkraftadaptation. Diesen unterschiedlichen Untersuchungsparadigmen ist gemeinsam, dass das System bereits vom Fehler einer einzigen Wiederholung lernen kann (Wolpert et al., 2011). Error-based learning kann den mittleren Fehler der Bewegung auf null reduzieren, doch sobald dieser Zustand erreicht ist, stellt es keinen weiteren Mechanismus zur systematischen Verbesserung der Leistung mehr zur Verfügung. Um z. B. eine Reduktion der Variabilität der Fehler zu erreichen, werden andere Lernmechanismen benötigt, um das System in der Vielfalt der Lösungen zu einem Optimum zu führen. Eine Reduktion der Variabilität der Bewegungsgeschwindigkeit beispielsweise kann als ein Kennzeichen von Fertigkeitlernen angesehen werden. Ein mögliches Signal das eine Verbesserung der Leistung und damit Lernen weiter vorantreibt, ist Information über den relativen Erfolg oder Misserfolg der Bewegung. Dieser Prozess wird als *reinforcement learning* bezeichnet. Im Vergleich zu gerichteten Fehlersignalen sind reinforcement-Signale, wie Erfolg oder Misserfolg, grundsätzlich ungerichtet und geben dadurch keine Information über die Richtung der benötigten Verhaltensänderung. Folglich muss das motorische System verschiedene Möglichkeiten erkunden, um schrittweise seine motorischen Kommandos anzupassen. Reinforcement learning wird, wie error-based learning, genutzt um Lernen in Bezug auf die vorhandene Lösungsvielfalt in

Richtung der optimalen Lösung zu führen. Für das reinforcement learning ist zu beachten, dass das Signal weniger Informationen zu Verfügung stellt als beim error-based learning und entsprechend dazu neigt eher langsam zu sein (Wolpert et al., 2011). Diedrichsen et al. (2010) konnten zeigen, dass Störungen entlang redundanter Dimensionen der Bewegung (z. B. ändern der Bewegung ohne an einer erfolgreichen Aufgabenleistung zu hindern) zu einem weiteren Lernmechanismus führen. Redundanz ist eine grundlegende Eigenschaft des motorischen Systems, gleiche Ziele auf verschiedene Arten erreichen zu können (Diedrichsen et al., 2010; Wolpert et al., 2013). Dieser Prozess des Lernens wird als *use-dependent learning* bezeichnet und bezieht sich auf das Phänomen, dass sich der Zustand des motorischen Systems durch reine Wiederholung von Bewegungen in Abwesenheit eines systematischen Fehlers ändern kann. Use-dependent learning beeinflusst die nächste Bewegung und versucht diese an die vorhergehende Bewegung anzugleichen (Diedrichsen et al., 2010).

Motorisches Lernen lässt sich nicht nur anhand unterschiedlicher Lernprozesse, sondern auch auf verschiedenen Zeitskalen unterscheiden. Während es sich bei skill learning um dauerhafte Veränderungen auf mittlerer Zeitskala und bei motorischen Entwicklungsprozessen um dauerhafte Veränderungen auf großer Zeitskala handelt, werden unter motorischen Adaptationsprozessen flüchtige Veränderungen auf kleiner Zeitskala verstanden (Hossner et al., 2013). Als *motorische Adaptation* wird die Fähigkeit des motorischen Systems verstanden, unter veränderten externen oder internen Bedingungen seine frühere Leistungsfähigkeit wiederzuerlangen (Shadmehr & Wise, 2005). Als Beispiel kann das Tragen neuer ungewohnter Schuhe angeführt werden, wodurch die externen Bedingungen und damit das Gangbild beeinflusst werden. Ebenso kann muskuläre Ermüdung zu einer Veränderung der internen Bedingungen und damit zu einer Veränderung des Gangbilds führen. Nach kurzer Gewöhnungszeit ist der Mensch in der Lage, trotz der geänderten externen oder internen Bedingungen zu seinem ursprünglichen Gangbild zurückzukehren. Adaptation wird als Prozess verstanden, der auf internen Modellen basiert (Izawa et al., 2008; Krakauer & Mazzoni, 2011). Ein Erklärungsansatz für Adaptation ist, dass das Nervensystem lernt, Störungen in einer neuen Umgebung zu präzisieren oder aufzuheben um zur Leistung

unter ungestörten Bedingungen zurückzukehren (Krakauer & Mazzoni, 2011). Ein anderer Ansatz geht davon aus, dass es das Ziel des Nervensystems ist, die Leistung in der neuen Umgebung zu maximieren. Interne Modelle werden dazu genutzt, um einen besseren Bewegungsplan zu suchen, um den impliziten motorischen Aufwand zu minimieren und den Ertrag der Bewegung zu maximieren (Izawa et al., 2008).

2.8 Koordination gemeinsamen Handelns

Im Gegensatz zu selbsterzeugten Handlungen, wie einer einfachen Objektmanipulation, stellt die Übergabe eines Objektes von Mensch zu Mensch eine nur bedingt vorhersagbare Aufgabe dar, da keine genauen Kenntnisse über das zukünftige Bewegungsverhalten des Partners vorliegen (Brand et al., 2022). Die sensorischen Effekte eigener Handlungen können in den meisten Fällen gut antizipiert werden, da die zugrundeliegenden Prozesse der Bewegungssteuerung für diese Vorhersage zur Verfügung stehen (Wolpert & Ghahramani, 2000) oder sogar als solche repräsentiert sind (Hommel, 2009, 2019; Prinz, 1997). Menschen verfügen auch über ein grundlegendes internes Modell des Körpers einer anderen Person und können deren aktuellen Zustand anhand visueller Informationen einschätzen (Mason & Mackenzie, 2005). Die Vorhersagbarkeit der Bewegung ist jedoch begrenzt, da keine Informationen über die motorischen Befehle der anderen Person vorliegen. (Blakemore & Decety, 2001). Da die Handlungskontrollprozesse anderer Personen nicht zugänglich sind, besteht die Herausforderung darin, die Handlungen anderer vorherzusagen und die eigenen Handlungen darauf abzustimmen, obwohl der Mensch selbst keinen direkten Zugang zur Handlungskontrolle anderer Personen hat (Vesper, 2020). Das bedeutet, dass Vorhersagen auf den beobachtbaren Bewegungen anderer Personen basieren müssen (Vesper, 2020; Wilson & Knoblich, 2005; Wolpert et al., 2003), wodurch sie möglicherweise weniger präzise sind als die Antizipation eigener sensorischer Handlungseffekte. Die umfangreichen Erfahrungen, die Menschen im Laufe ihres Lebens sammeln, ermöglichen es ihnen, das Verhalten ihrer Interaktionspartner auf der Grundlage ihres eigenen Wissens über deren Situation vorherzusagen (Aglioti et al., 2008; Ikegami & Ganesh, 2017).

Brand et al. (2022) gehen davon aus, dass die motorische Kontrolle bei der Objektübergabe ein allgemein etabliertes System von Feedforward- und Feedback-Mechanismen beinhaltet, das innerhalb der Dyade zweier interagierender Personen implizit geteilt wird. Wenn dies möglich ist, könnten Menschen ihre eigene Kontrolle vorausschauend auf der Grundlage des aktuellen Zustands ihres Partners anpassen. Alternativ dazu können die Anpassungen auch rein reaktiv auf wahrgenommene Veränderungen im Verhalten der anderen Person erfolgen (Döhring et al., 2020). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Unsicherheit über die Handlungen anderer Personen vor allem darin besteht, dass deren intendierte Handlungseffekte nicht direkt erkennbar sind und von äußeren Beobachtungen abgeleitet werden müssen (Brand et al., 2022; Vesper, 2020).

Um die räumliche und zeitliche Koordination von gemeinsamen Handlungen zu verstehen, existieren verschiedene Theorien und Modelle, die in ihrer Gesamtheit ein gutes Verständnis davon vermitteln, wie gemeinsames Handeln koordiniert wird. R. C. Schmidt et al. (2011) unterscheiden eine *kognitive Perspektive* und eine *verhaltensdynamische Perspektive* auf gemeinsames Handeln. Knoblich et al. (2011) unterscheiden zwischen *geplanter* und *emergenter Koordination*. Bei der *geplanten Koordination* wird das Verhalten der Akteure durch *Repräsentationen* gesteuert, die die gewünschten Ergebnisse des gemeinsamen Handelns und den eigenen Anteil an der Erreichung dieser Ergebnisse festlegen. Bei *emergenter Koordination* entsteht koordiniertes Verhalten durch *Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplungen*, die mehrere Individuen unabhängig von gemeinsamen Plänen in ähnlicher Weise handeln lassen (Knoblich et al., 2011). Zwei getrennte Akteure können beginnen, als eine einzige koordinierte Einheit zu handeln (Marsh et al., 2009; Spivey, 2007), weil gemeinsame Prozesse in den einzelnen Akteuren durch die gleichen Hinweise und motorischen Routinen angetrieben werden.

Im Fall von gemeinsamen Handlungen kann ein Akteur die Motive, Gedanken oder Perspektiven anderer berücksichtigen oder einfach nur darauf warten, dass eine bestimmte Aktion ausgeführt wird (Vesper et al., 2010). Vesper et al. (2010) erklären gemeinsames Handeln auf Basis ihrer Minimal-Architektur durch *geteilte Repräsentationen*, *Überwachung*, *Vorhersage* und

Coordination Smoothers. Diese Prozesse der Minimal-Architektur von Vesper et al. geben eine gute Vorstellung davon, wie geplante Koordination zustande kommt, sie erklären allerdings nicht im Detail, wie die tatsächlichen Handlungen letztendlich koordiniert werden. Vesper et al. (2010) bezeichnen diese Prozesse als *Coordination Smoothers*, jedoch ohne diese genauer zu spezifizieren. Die *verhaltensdynamische Perspektive* (R. C. Schmidt et al., 2011) bzw. die Mechanismen der *emergenten Koordination* (Knoblich et al., 2011) liefern Erklärungen und Theorien, die die Prozesse der geplanten Koordination unterstützen und geben damit einen Eindruck, was Vesper et al. (2010) unter *Coordination Smoothers* zusammenfassen. Das genaue Verhältnis zwischen geplanter und emergenter Koordination, gilt als offene Forschungsdiskussion. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Mechanismen beider Kategorien eine relevante Rolle für die Koordination gemeinsamen Handelns spielen (Vesper, 2020; Vesper et al., 2010; Vesper & Richardson, 2014).

Eine gemeinsame Handlung wie eine Objektübergabe erfordert eine synergetische Harmonie zwischen geplanter Koordination für das Endziel und emergenter Koordination für die Echtzeitaspekte der Interaktion. Zahlreiche Studien deuten darauf hin, dass die Planung von gemeinsamen Handlungen auf mehrere verschiedene Mechanismen der emergenten Koordination zurückgreift und die Funktionalität dieser schnellen und parallelen Mechanismen rekrutiert (Knoblich et al., 2011).

2.8.1 Geteilte Aufgabenrepräsentationen

Geplante Koordination erfordert im Minimalfall einen Plan, der das Ergebnis des gemeinsamen Handelns, den eigenen Anteil an der gemeinsamen Handlung und ein gewisses Bewusstsein dafür festlegt, dass das Ergebnis nur mit der Unterstützung eines anderen Akteurs herbeigeführt werden kann (Vesper et al., 2010). Häufig sind die Repräsentationen der Aufgaben anderer jedoch detaillierter und spezifizieren die Handlungen, die andere ausführen werden. Dies zeigt sich darin, dass Menschen dazu neigen, die Spezifika der Handlungen und Aufgaben anderer zu repräsentieren (Sebanz et al., 2005). *Geteilte Aufgabenrepräsentationen* bieten Kontrollstrukturen, die es den Akteuren

ermöglichen, sich flexibel an gemeinsamen Handlungen zu beteiligen. Geteilte Aufgabenrepräsentationen spezifizieren nicht nur im Voraus die einzelnen Teile, die jeder Akteur ausführen wird, sondern sie steuern auch Überwachungs- und Vorhersageprozesse, die eine interpersonelle Koordination in Echtzeit ermöglichen (Knoblich & Jordan, 2002; Pacherie & Dokic, 2006). Geteilte Repräsentationen helfen dabei, die Handlungen des anderen vorherzusagen und eine bessere Koordination zu erreichen, indem das Was, Wann und Wo integriert werden. Mehrere Untersuchungen haben gezeigt, dass ähnliche augenmotorische Programme aktiviert werden, wenn die gleiche Szene ausgeführt oder beobachtet wird (Flanagan & Johansson, 2003; Rizzolatti & Craighero, 2004), wodurch die Verbindung zwischen Wahrnehmung und Handlung verstärkt wird. Außerdem neigen Menschen bei gemeinsamen Handlungen dazu, ihre Bewegungen unter Berücksichtigung der Bedürfnisse des Interaktionspartners zu planen, um die Handlungen des Partners und dessen Ergebnisse darzustellen und vorherzusagen (Sacheli et al., 2018; Wolpert & Ghahramani, 2000). Aus diesem Grund wird argumentiert, dass Menschen gemeinsame Repräsentationen der Aufgabe bilden, um die Bewegungen des anderen besser vorherzusagen und entsprechend handeln zu können (Ray & Welsh, 2011). Als weitere Gründe für die Annahme gemeinsamer Repräsentationen werden Effizienz und sozialer Zusammenhalt genannt (Ortenzi et al., 2021).

Die geplante Koordination kann verbessert werden, indem die Wahrnehmungen des anderen in die eigene Darstellung der Aufgabe des anderen einbezogen werden. Dies kann darin bestehen, die Perspektive des anderen in Situationen einzunehmen, in denen sich die Perspektiven der Mitwirkenden auf eine gemeinsam wahrgenommene Umgebung unterscheiden, z. B. wenn sich zwei Akteure gegenüber sitzen und die zu montierenden Objekte betrachten. Oder sie kann darin bestehen, in Situationen, in denen die Akteure unterschiedliche Wahrnehmungszugänge zu Objekten in der Umgebung haben, daraus zu schließen, was ein Akteur wahrnehmen kann und was nicht (Brennan & Hanna, 2009; Shintel & Keysar, 2009). Obwohl es umstritten ist, inwieweit Akteure dazu neigen, die Wahrnehmungen des anderen mitzuarbeiten, gibt es Hinweise darauf, dass zumindest einige Aspekte der Perspektive des anderen berechnet werden, selbst wenn dies die eigene Leistung

behindert (Samson et al., 2010). Die gemeinsame Wahrnehmung kann für eine geplante Koordination sehr nützlich sein, da sie hilft, eine gemeinsame Wahrnehmungsbasis zwischen den Akteuren herzustellen (Clark, 1996), die eigene Aufgabe anzupassen und die Überwachung der Aufgabe des anderen zu erleichtern (Knoblich et al., 2011). Studien zur gemeinsamen Aufmerksamkeit deuten darauf hin, dass die Fähigkeit, die eigene Aufmerksamkeit auf die Aufmerksamkeit des Interaktionspartners zu richten, einen grundlegenden Mechanismus für die geteilte Repräsentation von Objekten und Ereignissen darstellt (Frischen & Tipper, 2004; Tollefsen, 2005). Zu wissen, worauf der Interaktionspartner in einem bestimmten Handlungskontext achtet, liefert wichtige Hinweise auf die Handlungsziele des anderen (Bayliss & Tipper, 2005) und kann beim Beobachter komplementäre Handlungen hervorrufen (Sebanz et al., 2006). Gleichzeitig zeigen Clark und Krych, dass sich die gemeinsame Handlungsleistung verschlechtert, wenn die Interaktionspartner nicht gemeinsam auf dieselben Objekte und Ereignisse achten können (Clark & Krych, 2004).

2.8.2 Überwachung der Zielerreichung

Durch einen Überwachungsprozess wird festgestellt, inwieweit eine bestimmte Aufgabe oder ein bestimmtes Ziel erreicht wird oder ob die Handlungen wie vorgesehen ablaufen (Botvinick et al., 2001). In einigen Fällen erfordert eine gemeinsame Handlung nur die Überwachung des kombinierten Ergebnisses der Handlungen der Akteure, aber in anderen Fällen werden einige der an einer gemeinsamen Handlung beteiligten Akteure auch die Aktionen der anderen oder die individuellen Ergebnisse dieser Aktionen überwachen (Vesper et al., 2010). Im Rahmen der *Überwachung* bei gemeinsamen Handlungen existieren zwei eng miteinander verbundene Konzepte. Zum einen das Konzept der *Handlungsbeobachtung* und zum anderen das Konzept der *Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung*. Beide Konzepte beziehen sich auf die Beziehung zwischen Wahrnehmung und Handlung. *Handlungsbeobachtung* bezieht sich auf die Fähigkeit, die Handlungen anderer zu beobachten und zu verstehen, was sie tun. Die Handlungsbeobachtung kann als ein passiver Prozess verstanden werden, bei dem die Handlungen anderer

beobachtet werden, um ihre Absichten, Ziele und Motivationen zu verstehen. *Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung* hingegen bezieht sich auf die neuronale Fähigkeit, sensorische Informationen mit motorischen Aktionen zu verknüpfen. Das Gehirn nutzt sensorische Informationen, um motorische Aktionen zu planen und auszuführen, und es nutzt motorische Informationen, um sensorische Informationen zu interpretieren. Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung kann als aktiver Prozess verstanden werden, bei dem sensorische Informationen genutzt werden, um Handlungen auszuführen und umgekehrt. Eine Vielzahl von Studien hat gezeigt, dass während der Handlungsbeobachtung eine entsprechende Repräsentation im Handlungssystem des Beobachters aktiviert wird (Rizzolatti & Craighero, 2004). Es wird vermutet, dass eine solche motorische Resonanz das Handlungsverständnis unterstützt (Blakemore & Decety, 2001). Diese Behauptung wird durch Befunde gestützt, die zeigen, dass Handlungen nicht nur anhand der visuellen Eigenschaften der beobachteten Bewegung kodiert werden, sondern vielmehr anhand von Handlungszielen (Fogassi & Luppino, 2005; Kohler et al., 2002; Umiltà et al., 2001). Die Ähnlichkeit zwischen den Handlungsrepräsentationen eines Beobachters und eines Akteurs kann das Ausmaß der Resonanz beim Beobachter bestimmen. Beispielsweise ist die Resonanz höher, wenn der Beobachter über ein hohes Maß an Erfahrung bei der Ausführung der beobachteten Handlung verfügt (Calvo-Merino et al., 2005; Repp & Knoblich, 2004) oder wenn er seine eigenen, zuvor ausgeführten Handlungen wahrnimmt (Knoblich & Flach, 2003; Loula et al., 2005).

Der Abgleich von beobachtetem Handeln mit dem eigenen Handlungsrepertoire kann zu emergenter Koordination führen. Ein solcher Abgleich kann zur Nachahmung der beobachteten Handlungen oder zu komplementären Handlungen führen, weil die Wahrnehmung einer bestimmten Handlung entsprechende Repräsentationen aktiviert, die auch die Handlungen des Beobachters leiten. Geteilte Repräsentationen in Wahrnehmung und Handlung wurden in Erweiterungen ideomotorischer Theorien postuliert (Hommel et al., 2001; Jeannerod & Frak, 1999; Prinz, 1997) und durch Studien an Affen und bildgebende Untersuchungen des Gehirns beim Menschen neurophysiologisch unterstützt (Rizzolatti & Sinigaglia, 2010). Bei Affen und Menschen beruht die Kopplung auf der Ähnlichkeit der Akteur-Objekt-Beziehung.

Beispielsweise werden beim Greifen nach einer Weintraube Greifbewegungen aktiviert, die auf kleine runde Objekte gerichtet sind. Beim Menschen kann die Kopplung auch auf der Ähnlichkeit von Bewegungen beruhen, die nicht auf Objekte gerichtet sind. Beobachtet beispielsweise eine Person eine andere Person beim Tanzen, werden entsprechende Handlungsrepräsentationen aktiviert, sobald der Beobachter selbst eine Vorstellung davon hat, wie getanzt wird (Calvo-Merino et al., 2005; Cross et al., 2006). Die Übereinstimmung von Wahrnehmung und Handlung kann zu emergenter Koordination führen, da sie bei verschiedenen Akteuren, die die Handlungen des jeweils anderen beobachten, gleiche Handlungstendenzen hervorruft (Knoblich & Sebanz, 2008).

In experimentellen Studien wird die Überwachung häufig als Fehlererkennung definiert. Zu den Verhaltensmerkmalen der Fehlererkennung gehört die Verlangsamung nach einem Fehler (Rabbitt, 1966). Elektrophysiologische Aktivierung, wie z. B. ein negatives Gehirnpotential, das sich aufbaut, wenn Fehler gemacht werden, markiert ebenfalls Fehlererkennung (Falkenstein et al., 2000). Diese Marker werden auch gefunden, wenn Menschen Fehler anderer beobachten (Schuch & Tipper, 2007; van Schie et al., 2004), was darauf hindeutet, dass dieselben Überwachungsmechanismen für eigene und fremde Handlungen genutzt werden können. Weitere Belege liefern bildgebende Untersuchungen des Gehirns, die zeigen, dass bei der Verarbeitung eigener und fremder Fehler ähnliche Hirnregionen aktiv sind (Bruijn et al., 2009; Malfait et al., 2010; Newman-Norlund et al., 2009). Vesper et al. (2010) weisen jedoch darauf hin, dass die meisten dieser Studien die Überwachung im Zusammenhang mit der Beobachtung von Handlungen und nicht von gemeinsamen Handlungen untersucht haben. Ein direkter Nachweis für eine solche Überwachung wäre gegeben, wenn die an einer gemeinsamen Handlung beteiligten Akteure empfindlicher auf Fehler in ihrer gemeinsamen Leistung reagieren als auf Fehler in ihrer individuellen Leistung. Wenn sich die individuellen Fehler zweier Akteure gegenseitig aufheben, sollten sie sich nicht bewusstwerden, dass sie einen Fehler gemacht haben (Vesper et al., 2010).

2.8.3 Prädiktion von Handlungseffekten

Um erfolgreich mit anderen zu interagieren, reicht es oft nicht aus, zu wissen, was sie zu einem bestimmten Zeitpunkt tun. Stattdessen ist es entscheidend, die Ergebnisse der Handlungen anderer vorhersagen zu können und zu wissen, was andere als Nächstes tun werden (Verfaillie & Daems, 2002). Die *Prädiktion* von Handlungen und Handlungseffekten anderer Personen gilt als entscheidend für den Erfolg von gemeinsamen Handlungen, insbesondere in Situationen, in denen Interaktionspartner zeitlich präzise aufeinander abgestimmt agieren müssen. Vorhersagen ermöglichen es, zu antizipieren, was ein Handlungspartner als Nächstes tun wird, und die eigene Handlung entsprechend anzupassen (Vesper, 2020; Wilson & Knoblich, 2005). Bei gemeinsamen Handlungen ist entscheidend, dass Wahrnehmung und Handlung nicht unabhängig voneinander funktionieren, sondern kognitiv im gleichen Format repräsentiert werden (Hommel, 2009; Prinz, 1997). Die beobachteten Handlungen anderer Personen aktivieren die eigenen motorischen Prozesse und können so durch die gleichen internen Prozesse simuliert und interpretiert werden, die auch der individuellen Handlungsplanung zugrunde liegen. Diese Prozesse werden häufig als *Handlungssimulation* bezeichnet (Sebanz & Knoblich, 2009), da sie interne Modelle, die das eigene Handeln steuern, nutzen, um die Handlungen anderer Akteure nahezu in Echtzeit vorherzusagen (Wolpert et al., 2003). Ein Basketballspieler, der einen Wurf beobachtet, kann relativ genau vorhersagen, ob der Wurf ein Treffer wird oder nicht (Aglioti et al., 2008). Handlungssimulationen können zu emergenter Koordination führen, da sie bei verschiedenen Akteuren gleiche Erwartungen über den Ablauf von Handlungen hervorrufen und damit ähnliche Handlungstendenzen für zukünftige Handlungen induzieren (Knoblich et al., 2011; Knoblich & Sebanz, 2008).

Interne prädiktive Modelle haben ihren Ursprung in der Beschreibung individueller Handlungen, da sie für die individuelle motorische Kontrolle nützlich sind (Wolpert & Ghahramani, 2000). Inzwischen wird angenommen, dass interne Modelle auch Vorhersagen über die Handlungen anderer in der unmittelbaren Zukunft treffen können (Wolpert et al., 2003). Belege dafür kommen aus Studien, die zeigen, dass Menschen in der Lage sind, den

zukünftigen Verlauf der Handlungen anderer vorauszusehen (Flanagan & Johansson, 2003; Graf et al., 2007). Das Grundprinzip, auf individueller Ebene, besteht darin, dass die zu erwartenden Konsequenzen eines motorischen Programms intern simuliert werden, bevor diese tatsächlich eintreten (Grush, 2004; Wilson & Knoblich, 2005). Dies wird durch ein Kontrollsystem aus internen Modellen realisiert (Davidson & Wolpert, 2005; Wolpert & Ghahramani, 2000). Inverse interne Modelle generieren die motorischen Programme, die für die Durchführung einer konkreten Handlung notwendig sind und richten sich damit nach dem intendierten Handlungseffekt. Vorwärtsmodelle verwenden die generierten motorischen Kommandos, um Vorhersagen über den zu erwartenden sensorischen Handlungseffekt zu treffen. So kann, bevor die Handlung abgeschlossen ist, antizipiert werden, ob beispielsweise bei der aktuell geplanten Bewegung das gewünschte Ergebnis erreicht werden kann. Das bedeutet, dass mit Hilfe der internen Vorhersage über zu erwartende sensorische Handlungseffekte Bewegungen gegebenenfalls korrigiert werden können, falls das gewünschte Handlungsziel mit der aktuell geplanten Bewegung nicht erreicht werden kann oder der Kontext, in dem die Bewegung stattfindet, sich verändert (Vesper, 2020). Prädiktion von Handlungseffekten kann auch in völliger Abwesenheit jeglicher Bewegungsausführung auftreten, wenn sich eine Person gemeinsames Handeln mit einer anderen Person nur vorstellt (Vesper & Richardson, 2014). Die Vorstellung von Bewegungen scheint auf den gleichen internen Prozessen wie die Ausführung oder die Beobachtung zu basieren (Decety & Grèzes, 2006; Jeannerod, 2004), nur ohne dabei durch motorische Signale die Muskeln zu aktivieren (Vesper, 2020). Auf neuronaler Ebene ist an solchen Simulationsprozessen das Spiegelneuronensystem beteiligt. Dieses Netzwerk von Hirnarealen, das sowohl beim Handeln als auch beim Beobachten einer Handlung aktiv ist, stellt einen Mechanismus dar, der eigene Handlungen mit denen anderer Personen in Beziehung setzt (Gallese et al., 2004; Iacoboni et al., 2005; Rizzolatti et al., 2001). Das Spiegelneuronensystem kann auch aktiviert werden, wenn Bewegungen nur teilweise sichtbar sind oder durch Geräusche angedeutet werden (Kohler et al., 2002). Sebanz et al. (2006) bemängeln, dass Untersuchungen zur motorischen Vorhersage vor allem hinsichtlich der Handlungsbeobachtung durchgeführt wurden, d. h. in Situationen, in denen die Personen selbst nicht aktiv sind. Interaktionen mit

anderen Personen sind jedoch weitaus komplexer, da nicht nur die eigene und die andere Handlung vorgesagt werden muss, sondern auch das Zusammenspiel beider Handlungen. Es bleibt nach aktuellem Stand zu klären, ob es vergleichbare Mechanismen zur Vorhersage der kombinierten Ergebnisse der Handlungen mehrerer Akteure gibt (Sebanz & Knoblich, 2009; Vesper et al., 2010). Auf Objektübergaben bezogen bedeutet das, dass es nicht ausreicht, eine Vorhersage über die Bewegung des Übergabepartners zu treffen und davon unabhängig die eigene Bewegung zu planen. Vielmehr erfordern gemeinsame Handlungen ein hohes Maß an Präzision und zeitlicher Abstimmung, sodass Vorhersagen über den eigenen Anteil und den des Partners integriert werden müssen (Knoblich & Jordan, 2003; Vesper, 2020).

2.8.4 Entrainment

Ein weiterer wichtiger Prozess, der die zeitliche Koordination des Verhaltens zweier Akteure bei gemeinsamen Handlungen unterstützt, ist das *Entrainment*. Entrainment gilt als der am besten untersuchte Prozess der sozial-motorischen Koordination (R. C. Schmidt et al., 2011). Unter Entrainment wird die spontane Synchronisation rhythmischer Bewegungen verstanden. In der Forschung zu dynamischen Systemen wird interpersonelles Entrainment häufig als eine besondere Form der Kopplung rhythmischer Oszillatoren betrachtet (R. C. Schmidt & Richardson, 2008). Die Synchronisation kann durch Prinzipien der dynamischen Systemtheorie mit nicht-linearen Gleichungen beschrieben werden (Marsh et al., 2009; Shockley & Riley, 2015). Spontane Synchronisation ist eine Form der Selbstorganisation, die grundlegenden Regeln folgt und sowohl in mechanischen als auch in biologischen Systemen häufig zu beobachten ist (Knoblich et al., 2011). In den meisten Fällen wird dabei das Verhältnis von rhythmischen Bewegungen zueinander, also deren Phasenrelation, betrachtet (Oullier et al., 2008). Beispielsweise synchronisieren zwei Personen in Schaukelstühlen unwillkürlich ihre Schaukelfrequenzen (Richardson et al., 2007), und Theaterbesucher neigen dazu, im Gleichklang zu klatschen (Néda et al., 2000). Damit spontane Synchronisation zustande kommt, reicht es aus, dass einzelne Personen miteinander in Verbindung stehen, z. B. dadurch, dass sie sich sehen (Richardson et al.,

2007), berühren (Harrison & Richardson, 2009) oder miteinander sprechen (Shockley et al., 2003).

3 Roboter-Mensch Übergaben: Herausforderungen für die Robotik

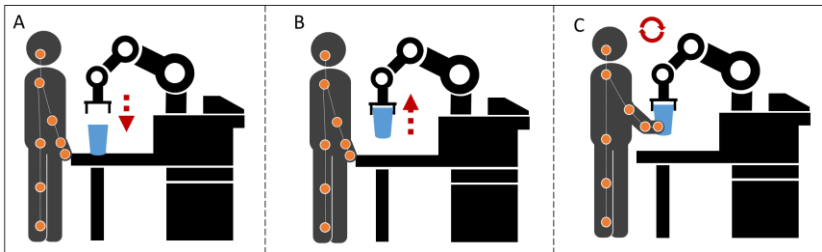


Abbildung 11: Schematischer Ablauf einer Roboter-Mensch Übergabe: (A) Roboter steuert das Objekt an, (B) Roboter greift das Objekt und bringt es in seine Ausgangsposition, (C) Roboter steuert die Hand des Menschen an und übergibt das Objekt.

3.1 Unterschiede zu Mensch-Mensch Übergaben

Bei Roboter-Mensch Übergaben wird im Vergleich zu Mensch-Mensch Übergaben, der menschliche Interaktionspartner durch einen Roboter ersetzt. Zunächst muss der Roboter technisch in der Lage sein, den Übergabewunsch des Menschen zu erkennen. Dies kann durch Drücken eines Knopfes, ein sprachliches Kommando oder kamerabasiertes Tracking einer bestimmten Körperhaltung oder Geste erfolgen. Nachdem der Übergabewunsch durch den Menschen kommuniziert wurde, setzt sich der Roboter in Bewegung, greift das Objekt, hebt es an und transportiert es zum menschlichen Interaktionspartner (Abbildung 11 A-C). Im Fall der beschriebenen Abbildung handelt es sich um einen stationären Roboter. Bei mobilen Robotern würde sich der Roboter zum gewünschten Objekt bewegen, es greifen und zum menschlichen Interaktionspartner transportieren.

Die Umsetzung einer ebenso effizienten und reibungslosen Übergabe zwischen Roboter und Mensch wie zwischen Menschen gilt als offene Herausforderung für die Robotik (Ortenzi et al., 2021). Technologische Entwicklungen beeinflussen neuartige Funktionsweisen von Robotern, wie z. B. die Integration von Kommunikationskanälen, wie das Blickverhalten des Roboters (Admoni et al., 2014; Gharbi et al., 2015; Moon et al., 2014). Die Analyse kinematischer Merkmale des Menschen kann durch maschinelles Lernen zur automatischen Erkennung der Absicht, einen Gegenstand zu übergeben, genutzt werden (Pan et al., 2018). Die Entwicklung spezifischer Bewegungs- und Geschwindigkeitsprofile (Huber et al., 2008; Shibata et al., 1995), sowie kamerabasiertes Handtracking (Zhang et al., 2020) ermöglichen eine Anpassung an den menschlichen Interaktionspartner. Aleotti et al. (2012) stellen ein System vor, das sowohl einen Eye-in-Hand Laserscanner als auch einen stationären Microsoft Kinect Abstandssensor zur Erkennung von Personen und Greifzuständen verwendet. Visuell basierte Ansätze weisen Nachteile wie Verdeckung, Exposition, stationärer Aufbau und Leistungsanforderungen an die Hardware auf (Ogenyi et al., 2021) auf. Um diesen Nachteilen zu begegnen werden Robotersysteme für MRK-Aufgaben (Mensch-Roboter-Kollaboration) in der Regel durch Kraft-Drehmoment-Sensoren ergänzt. Mamaev et al. (2021) untersuchten den Einsatz von Kraft-Drehmoment-Sensoren in Kombination mit kapazitiven Näherungssensoren. Dabei wurde festgestellt, dass kapazitive Näherungssensoren im Vergleich zu Kraft-Drehmoment-Sensoren und der Kombination beider Sensoren die beste Übergabepformance lieferten und gleichzeitig von den Versuchspersonen am meisten bevorzugt wurden. Die Steuerung der Kraft-Drehmomentsensoren ist ein weiterer wichtiger Baustein, um das Abgreifen des Übergabeobjekts für den Menschen so intuitiv wie möglich zu gestalten. Ziel all dieser Entwicklungen ist es, die bestmögliche Objektübergabe zwischen Roboter und Mensch zu erreichen. Erfolgreiche Übergaben zwischen Menschen stellen in der Robotik eine zu erreichende Benchmark in Bezug auf Geschwindigkeit, Flüssigkeit und Akzeptanz dar (Glasauer et al., 2010; Ortenzi et al., 2021; Strabala et al., 2013).

Bei Mensch-Mensch-Objektübergaben versucht der Mensch, das Verhalten seines Interaktionspartners durch Handlungsüberwachung und interne Model-

le vorherzusagen, um möglichst schnelle, flüssige und zuverlässige Objektübergaben durchzuführen. Bei Roboter-Mensch Objektübergaben stehen dem menschlichen Partner keine internen Modelle zur Verfügung, um das Verhalten des Roboters vorherzusagen. Dementsprechend muss der menschliche Partner sein Verhalten auf der Grundlage der Handlungsüberwachung des Roboters planen und anpassen, um schnelle und zuverlässige Objektübergaben zu gewährleisten. Je nach Anzahl der Freiheitsgrade eines Roboters ist es für den Anwender schwierig bis nahezu unmöglich, den Übergabeort aus der potentiell möglichen Kinematik des Roboters abzuschätzen. Daher ist die Vorhersagbarkeit des Roboterhaltens für eine erfolgreiche Übergabe zwischen Roboter und Mensch von großer Bedeutung. Die Vorhersagbarkeit bezieht sich darauf, wie einfach es für einen Interaktionspartner ist, die Bewegungen des anderen Partners zu verstehen, vorherzusagen und sich daran anzupassen. Um sich erfolgreich an einen Roboter anpassen zu können, muss der Mensch Vorhersagen treffen, die auf bestimmten Eigenschaften des Roboters basieren. Die Vorhersagbarkeit der Trajektorie und die Vorhersagbarkeit des Zielpunkts des Roboters können als geeignete Informationsquellen für die Anpassung betrachtet werden. In der Motorik wird unter motorischer Adaptation ein Prozess verstanden, bei dem das motorische System auf Veränderungen im Körper und/oder in der Umgebung reagiert, um unter diesen neuen Bedingungen zu einem früheren Leistungsniveau zurückzukehren (Krakauer & Mazzoni, 2011). Dies bedeutet, dass ein hoher Grad an Vorhersagbarkeit eines Roboters zu einer besseren Anpassung an den Roboter führt.

Ortenzi et al. (2021) berichten, dass in vielen Mensch-Roboter- und Roboter-Mensch-Übergabeszenarien die Übergabe entweder an einem festen Ort stattfindet (der Roboter begibt sich für die Objektübergabe immer an dieselbe Position) oder der Übergabeort auf der Grundlage verschiedener Kriterien (einschließlich Ergonomie, Sicherheit usw.) im Voraus geplant wird und nicht in Echtzeit mit dem sensorischen Feedback aktualisiert wird. Die Autoren halten diese Situation für ungünstig, da der Mensch sich dem Roboter anpassen muss, was zu kognitiver und physischer Ermüdung führen kann. Ausgehend von dieser Annahme sind Ortenzi et al. (2021) der Ansicht, dass die Vorplanung eines Übergabepunktes unter Berücksichtigung der Ergono-

mie und der physischen Eigenschaften des menschlichen Partners zwar angemessen ist, der Übergabepunkt jedoch nicht fixiert oder vorgeplant, sondern online an den menschlichen Partner angepasst werden sollte. Aus motorischer Sicht ist die Vorhersage von Übergaben, die bei jeder Übergabe neu geplant werden, um sich an die Handposition des menschlichen Partners anzupassen, schwieriger als Übergaben, die immer zum gleichen Übergabepunkt auf der gleichen Trajektorie navigieren. Nach Sebanz und Knoblich (2009) muss die physische Übergabe aufgrund der schlechteren Vorhersagbarkeit der Bewegungstrajektorie deutlich reaktiver erfolgen, was eine weniger flüssige und schnelle Handlungskoordination zur Folge hat. Aus technischer Sicht ist mehr Aufwand erforderlich, damit sich Roboter online an veränderte Umstände und damit an die Bedürfnisse des menschlichen Partners anpassen können (Ortenzi et al., 2021). Aus wissenschaftlicher Sicht ist daher zu klären, ob die Anpassung von Robotern an den Menschen zu einer besseren Übergabeleistung führt als ein vordefiniertes Roboterverhalten.

3.2 Bewertung von Objektübergaben

Die quantitative Bewertung von Mensch-Mensch, Mensch-Roboter und Roboter-Mensch Übergaben ist sowohl für die wissenschaftliche Weiterentwicklung im Bereich der Mensch-Mensch Objektübergabe als auch für die Entwicklung neuer Hardware- und Softwarelösungen für Objektübergaben in der Robotik von großer Bedeutung. In der Forschungsgemeinschaft der Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) und der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) besteht ein allgemeiner Konsens über den Bedarf an standardisierten Messinstrumenten und Metriken (Aly et al., 2017; Steinfeld et al., 2006). Metriken sollten darauf abzielen, eine Übergabe qualitativ und quantitativ zu bewerten. Allgemein etablierte Metriken würden einen einfacheren und gerechteren Vergleich zwischen verschiedenen vorgeschlagenen Techniken ermöglichen und möglicherweise zur Entwicklung neuer Rahmenwerke beitragen (Steinfeld et al., 2006). In MRI-Experimenten werden häufig Metriken für die Aufgabenleistung verwendet, um den Erfolg quantitativ zu bewerten. Die Wahl der Metriken hängt stark von der Aufgabe ab. Die

Leistung von Objektübergaben wird in verschiedenen Untersuchungen durch die Erfolgsrate beschrieben. Dabei wird die Anzahl der erfolgreichen Übergaben durch die Gesamtzahl der Versuche dividiert. Die Erfolgsrate gilt derzeit als die gängigste Leistungskennzahl für Mensch-Roboter Übergaben (Ortenzi et al., 2021). Obwohl die Gesamterfolgsrate einer Implementierung wichtig ist, gibt sie nur einen quantitativen Überblick über erfolgreiche und nicht erfolgreiche Übergaben und nicht über die Qualität der Interaktion. Sie erklärt auch nicht, warum und wie die Fehler aufgetreten sind. Darüber hinaus erschweren unterschiedliche Testprotokolle den direkten Vergleich von Erfolgsquoten-Metriken. Je robuster die technischen Systeme agieren, desto mehr tritt die Erfolgsrate in den Hintergrund. Dementsprechend müssen andere Metriken herangezogen werden, um die Qualität der Objektübergabe mit quantitativen Maßen bewerten zu können.

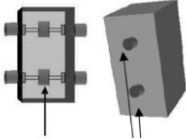


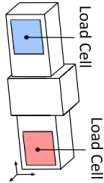
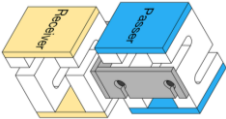
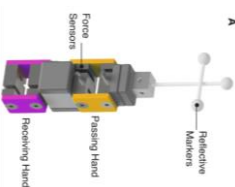
Die Interaktionskraft ist ein häufig verwendetes Maß, um das Verhalten und die zugrundeliegenden Kontrollstrategien bei Objektübergaben zu untersuchen. Interaktionskräfte werden in verschiedenen Studien mit unterschiedlichen Objektformen, -orientierungen und -gewichten sowohl bei Mensch-Mensch als auch bei Roboter-Mensch Übergaben gemessen (Brand et al., 2022; Chan et al., 2012; Controzzi et al., 2018; Döhring et al., 2020; Endo et al., 2012; Mason & Mackenzie, 2005). Die Untersuchungen widmen sich der Frage, wie Akteure ihre Handlungen bei Objektübergaben unabhängig voneinander planen und ausführen und dabei das Verhalten des Partners berücksichtigen (Döhring et al., 2020). In den oben genannten Studien zu Mensch-Mensch Übergaben, die sich auf die Messung der Greifkraft konzentrieren, wird auch die physische Übergabezeit erfasst. Die physische Übergabezeit ermöglicht einen Vergleich der verschiedenen Studien untereinander. Durch den Vergleich der physischen Übergabezeit können Unterschiede und Gemeinsamkeiten der vorliegenden Studien identifiziert werden. Die Studien geben Hinweise darauf, dass die physische Übergabezeit sensitiv auf Eigenschaften der Übergabeobjekte wie Größe, Gewicht und den verwendeten Griff reagiert. In der Studie von Chan et al. (2012) wurden Übergaben mit unterschiedlichen Objektgewichten durchgeführt. Je schwerer das Objekt ist, desto stärker erhöht sich die Übergabezeit (483 g: 470 ms; 577 g: 500 ms; 678 g: 523 ms). Aus den Ergebnissen schließen Chan et al. (2012),

dass unterschiedliche Objektgewichte zu unterschiedlichen Schwierigkeiten bei der Übergabe führen. Ein schwereres Objekt stellt eine größere Schwierigkeit dar, da es zusätzliche Aufmerksamkeit der Teilnehmer erfordert und ein Fallenlassen schwerwiegendere Folgen (z. B. Verletzungen) haben kann. Controzzi et al. (2018) zeigen in ihrer Studie, dass eine schnellere Reichbewegung des Nehmers zu kürzeren Übergabezeiten führt, wenn der Geber das Objekt statisch hält. Bei langsamer Reichbewegung dauern die Übergaben ca. 350 ms, bei mittlerer Reichbewegung ca. 300 ms und bei schneller Reichbewegung ca. 250 ms. Controzzi et al. (2018) erklären dieses Verhalten damit, dass der Nehmer durch eine schnelle Reichbewegung eine intensivere Kollision erzeugt, wodurch die taktilen Signale eine bestimmte Schwelle überschreiten und der Geber früher mit dem Loslassen beginnt (Controzzi et al., 2018; Johansson et al., 1992). Die Ergebnisse von Controzzi et al. (2018) gelten für das Loslassen eines Objekts durch einen Geber der das Objekt statisch hält und stimmen mit der Theorie von Mason und Mackenzie (2005) sowie Chan et al. (2012) überein, wonach der Geber für die Sicherheit des Objekts verantwortlich ist, während der Nehmer die Effizienz des Objektaus-tauschs moduliert. Controzzi et al. (2018) zeigen, dass der Geber unter normalen visuellen Bedingungen die Freigabegeschwindigkeit entsprechend der Beschleunigung der Reichbewegung des Nehmers skaliert. Dies deutet darauf hin, dass der Geber, während der Nehmer nach dem Objekt greift, aus der Beobachtung der Bewegung des Nehmers auf die Dynamik der bevorstehenden Übergabe schließt und daraus die geeignete Freigabegeschwindigkeit ableitet. In der Untersuchung von Mason und Mackenzie (2005) führt die Übergabe eines 90 g schweren Objekts in horizontaler Ausrichtung zwischen Geber und Nehmer zu einer durchschnittlichen Übergabezeit von etwa 500 ms. Endo et al. (2012) berichten für ein Objekt mit 150 g in horizontaler Ausrichtung eine physische Übergabezeit von $323,1 \text{ ms} \pm 24,1 \text{ ms}$ vom ersten Kontakt des Nehmers mit dem Objekt bis zum vollständigen Loslassen des Gebers. Brand et al. (2022) vergleichen Soloübergaben mit Partnerübergaben, mit einem 450 g schweren Übergabeobjekt in vertikaler Ausrichtung, und berichten eine physische Übergabezeit von $352,76 \text{ ms} \pm 71,51 \text{ ms}$ für Soloübergaben und $515,08 \text{ ms} \pm 87,22 \text{ ms}$ für Partnerübergaben.

Döhring et al. (2020) berichten eine Übergabezeit von $643 \text{ ms} \pm 71 \text{ ms}$ für ein Objekt mit einem Gewicht von 1800 g, das in vertikaler Ausrichtung übergeben wird (Controzzi et al., 2018).

Die physische Übergabezeit konnte als wichtige Metrik identifiziert werden, die es ermöglicht, sowohl Mensch-Mensch als auch Roboter-Mensch Übergaben hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zu bewerten (Brand et al., 2022; Chan et al., 2012; Controzzi et al., 2018; Döhring et al., 2020; Endo et al., 2012; Mason & Mackenzie, 2005). Die physische Übergabezeit kann mit einer Vielzahl von Messsystemen und unterschiedlicher Sensorik erfasst werden. Somit leistet die Verwendung der physischen Übergabezeit als Leistungsmetrik einen wichtigen Beitrag zur Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen unterschiedlicher Forschungsdisziplinen (Aly et al., 2017; Steinfeld et al., 2006). Weitere Untersuchungen zu Mensch-Mensch, Roboter-Mensch und Mensch-Roboter Übergaben weisen entweder kleine Stichprobengrößen, eine geringe Anzahl an durchgeführten Übergabewiederholungen oder eine Kombination aus beidem auf (Aleotti et al., 2012; Basili et al., 2009; Becchio et al., 2008; Dehais et al., 2011; Huber et al., 2008; Pan et al., 2018). Je nach Zielsetzung der Untersuchungen waren die geringen Stichprobengrößen und die geringe Anzahl an Wiederholungen ausreichend, um die jeweilige Forschungsfrage zu beantworten oder die jeweilige technische Entwicklung zu bewerten und voranzutreiben. In Übereinstimmung mit Leichtmann et al. (2022) besteht jedoch ein großes Potenzial in der Durchführung von Studien mit größeren Stichproben und auch höheren Wiederholungszahlen, um mehr Details des menschlichen Verhaltens in der Kooperation mit Robotern aufzudecken und für die weitere Forschung und Entwicklung nutzbar zu machen. Durch Untersuchungen mit größeren Stichproben können statistisch abgesicherte Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit gezogen werden. Durch eine höhere Anzahl von Wiederholungen und die Durchführung mehrerer Durchläufe können Rückschlüsse auf die Gewöhnung des Menschen an die jeweiligen Robotersysteme gezogen werden.

Tabelle 2: Merkmale der Übergabeobjekte der diskutierten Studien.

Paper	Mason & MacKenzie, 2005	Endo et al., 2012	Chan et al., 2012	Controzzi et al., 2018	Döhning et al., 2020	Brand et al., 2022
Objekt						
Gewicht	90 g	150 g	483 g: light 577 g: medium 678 g: heavy	160 g	1800 g	450 g
Maße	84 x 55 x 33 mm	130 x 60 x 25 mm	247 x 54 x 42 mm	85 x 50 x 25 mm	14 x 9 x 5 cm	98 x 34 x 24 mm
Ausrichtung	horizontal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	vertikal

4 Experiment I: Generierung von Benchmarkdaten zur Bewertung von Roboter-Mensch Übergaben

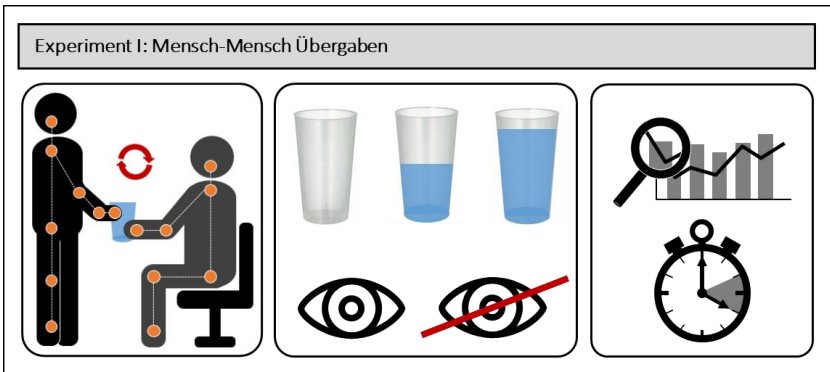


Abbildung 12: Schematischer Überblick Experiment I.

4.1 Einleitung

Eine große Herausforderung für die Robotik besteht darin, die impliziten und expliziten Erwartungen des Menschen an die Interaktion bei der Objektübergabe, zu antizipieren und in die Entwicklung der Funktionsweise von Robotern einfließen zu lassen. Im Kontext der Objektübergabe müssen Service-Roboter, die in Pflegeeinrichtungen eingesetzt werden, in der Lage sein, mehrere Herausforderungen gleichzeitig zu bewältigen. Zum einen müssen Service-Roboter in der Lage sein, Objekte mit unterschiedlichen Eigenschaften (Größe, Gewicht, Unsicherheiten durch Objekteigenschaften) zu übergeben. Zum anderen ist speziell in der Pflege damit zu rechnen, dass ein großer Teil der Empfänger Einschränkungen aufweist. Diese Einschränkungen können sensorischer, motorischer oder auch kognitiver Natur sein. Ein alltagstauglicher Roboter, der in einem solchen Setting direkte Objektüber-

gaben an Menschen durchführt, muss mit diesen Einschränkungen umgehen können. Basierend auf den theoretischen Grundlagen der Objektübergabe wird angenommen, dass Vorhersagen über das Verhalten des Interaktionspartners genutzt werden, um flüssige und sichere Objektübergaben zu ermöglichen. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass auch Objekteigenschaften in die Vorhersage des Verhaltens des Interaktionspartners einfließen. So können auf Basis der Objekteigenschaften bereits Erwartungen entstehen, die der Empfänger implizit an die Objektübergabe und damit an den Interaktionspartner stellt. Eine weitere Annahme ist, dass Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers zu einem angepassten Verhalten des Gebers führen. Der Geber versucht, sich aufgrund seiner Erfahrungen in die Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers hineinzusetzen und seine eigenen Handlungen so anzupassen, dass trotz der Einschränkungen eine erfolgreiche und sichere Objektübergabe zustande kommt. Darauf aufbauend wird angenommen, dass auch ein Nehmer mit eingeschränkter Wahrnehmung aufgrund seiner Erfahrungen Erwartungen an das Verhalten seines Interaktionspartners hat und eine entsprechend angepasste Objektübergabe erwartet, um eine erfolgreiche Übergabe zu gewährleisten.

Die Untersuchungen von Mason und Mackenzie (2005), Endo et al. (2012), Chan et al. (2012), Controzzi et al. (2018), Döhring et al. (2020) und Brand et al. (2022) liefern wichtige Hinweise über die Verhaltensweisen und Kontrollstrategien von Menschen bei Objektübergaben. Die Untersuchungen widmen sich der Frage wie zwei Akteure bei Objektübergaben ihre Handlungen unabhängig voneinander planen und ausführen und dabei das Verhalten des Partners berücksichtigen. Obwohl der Schwerpunkt der genannten Studien auf der Untersuchung der Modulation der Greifkraft bei der Übergabe von Objekten liegt, liefern sie dennoch wertvolle Daten zur physischen Übergabezeit, die als Benchmark für die Übergabeleistung zwischen Roboter und Mensch herangezogen werden können. Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass die physische Übergabezeit sensitiv auf Eigenschaften des Übergabeobjekts, wie Größe, Gewicht und Art des verwendeten Griffs sowie auf Manipulationen der Wahrnehmung reagiert. Partnerübergaben führen verglichen mit Soloübergaben zu signifikant höheren physischen Übergabezeiten (Brand et al., 2022). Die Manipulation der haptischen und der visuellen

Informationen führt zu einer signifikanten Erhöhung der Übergabezeit (Döhring et al., 2020; Endo et al., 2012). Die Zunahme des Objektgewichts führt zu einer Erhöhung der physischen Übergabezeit (Chan et al., 2012). Die Übergabeobjekte in den genannten Untersuchungen waren mit Kraftmesssensoren ausgestattet und für die Untersuchungen prototypisch entwickelt (Tabelle 2). Je nach Integration der Sensorik in die Objekte müssen diese von den Versuchspersonen auf eine bestimmte Art und Weise gegriffen werden. Obwohl die Übergabeobjekte in Größe und Gewicht Ähnlichkeiten mit Alltagsgegenständen aufweisen, führen sowohl die Formgebung als auch die integrierte Sensorik zu unnatürlicheren Griffen und damit zu unnatürlicheren Übergaben als bei normalen Alltagsgegenständen. Die genannten Untersuchungen zeigen unterschiedliche Werte für die Übergabezeiten, die auf die Objekteigenschaften zurückgeführt werden können. Zudem wurden die Objektübergaben in den Untersuchungen in einer Tischanordnung durchgeführt, bei der sich die Versuchspersonen gegenübermaßen und die Objekte über den Tisch hinweg übergaben. Inwieweit diese Ergebnisse mit alltagsnäheren Übergabesituationen, z. B. mit vorherigem Objekttransport durch den Geber vergleichbar sind, bleibt offen. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die physische Übergabezeit mit zunehmender Schwierigkeit des zu übergabenden Objekts ansteigt. Eine Erhöhung des Schwierigkeitsgrades kann z. B. durch ein höheres Gewicht des Objektes, eine höhere Anforderung an die Präzision des Griffs, ein zerbrechlicheres Objekt (bei dem der Mensch vorsichtiger ist, um es nicht zu beschädigen), die Möglichkeit, den Inhalt des Objektes zu verschütten oder die Möglichkeit, den menschlichen Partner durch Fallenlassen oder Verschütten zu verletzen oder zu beschmutzen, erzeugt werden. Einschränkungen der taktilen und visuellen Feedbackmechanismen führten in den zitierten Untersuchungen zu signifikant höheren Übergabezeiten.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird angenommen, dass die Zunahme des Schwierigkeitsgrades der Übergabe, manipuliert durch die Wasserfüllmenge eines Kunststoffbechers, zu einer Erhöhung der physischen Übergabezeit, zu einer längeren Objektführung, d. h. der gemeinsam zurückgelegten Strecke während der physischen Übergabe, und zu einer geringeren Übergabegeschwindigkeit führt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass Ein-

schränkungen der visuellen und auditiven Wahrnehmung des Nehmers zu einer höheren physischen Übergabezeit, zu einer längeren Objektführung und zu einer geringeren Übergabegeschwindigkeit führen.

Um diese Annahmen zu prüfen, wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der es ermöglicht, Übergaben in einer alltagsnahen Form durchzuführen. Hierfür wurden Übergabeobjekte von einem Geber aus sechs verschiedenen Raumrichtungen geholt, transportiert und an einen sitzenden Nehmer übergeben. Als Übergabeobjekte wurden handelsübliche Kunststoffbecher verwendet. Zur Manipulation der Objekteigenschaften wurden die Kunststoffbecher ohne Füllung, mit 50 % Wasserfüllung und mit 90 % Wasserfüllung übergeben. Es wird davon ausgegangen, dass die höhere Füllung des Bechers zu einer größeren Schwierigkeit bei der Übergabe führt, da der Becher zum einen ein höheres Gewicht hat und zum anderen die Möglichkeit besteht, den Inhalt zu verschütten. Zur Manipulation der visuellen und auditiven Wahrnehmung der Nehmerperson wurden eine lackierte Skibrille sowie ein starker Gehörschutz eingesetzt. Diese extreme Manipulation soll Hinweise darauf geben, welche Herausforderungen sich für die weitere Entwicklung von Robotern ergeben, die in der Lage sein sollen, Gegenstände an Personen mit unterschiedlich ausgeprägten Wahrnehmungseinschränkungen zu übergeben.

Als Metriken zur Bewertung der Übergabeleistung wurden die physische Übergabezeit und die Objektführung verwendet. Die generierten Daten können einerseits für die Auswertung von Untersuchungen mit anderen Objekten verwendet werden, andererseits können sie in der Robotik genutzt werden, um zu überprüfen, wie nahe wir mit dem aktuellen Stand der Technik am Benchmark sind.

4.2 Ziele Experiment I

Die Ziele von Experiment I sind es,

- a) Benchmarkdaten für Übergaben eines alltäglichen Kunststoffbechers mit und ohne Wasserfüllung in einer alltagsnahen Übergabesituation zu generieren.
- b) zu untersuchen, welchen Einfluss die Objekteigenschaften auf die Übergabezeit und die Objektführung haben und ob diese in Einklang mit bisherigen Untersuchungen in weniger alltagsnahen Situationen stehen.
- c) zu untersuchen, welchen Einfluss die Einschränkungen der visuellen und auditiven Wahrnehmung des Nehmers auf die Übergabezeit und die Objektführung haben.

4.3 Material und Methoden

4.3.1 Versuchsaufbau

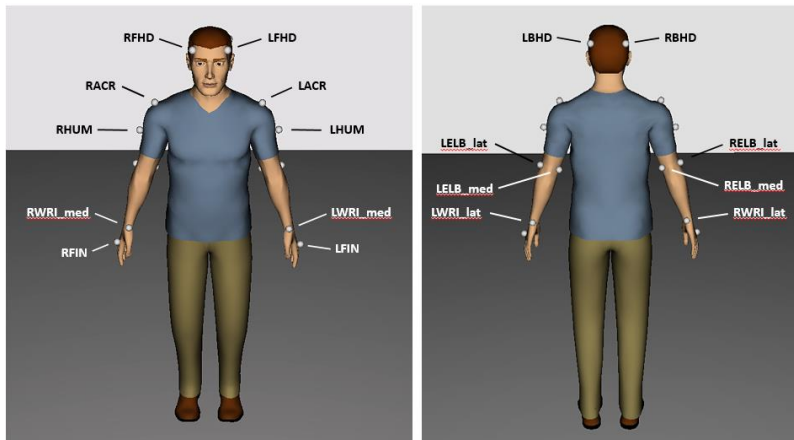
Für das Experiment wurde ein kreisförmiger Aufbau entwickelt, der es ermöglicht, die Übergabe von Gegenständen zwischen zwei Versuchspersonen aus unterschiedlichen Raumrichtungen aufzuzeichnen. Die kinematischen Daten wurden mit einem kommerziell erhältlichen optoelektronischen System (Vicon Motion Systems; Oxford Metrics Group, Oxford, UK) aufgenommen. Motion-Capture-Systeme, wie das Vicon System, gelten als Goldstandard für die 3D-Bewegungsanalyse (Barker et al., 2006; Carse et al., 2013; Richards, 1999; Robertson et al., 2013; Winter, 2009). Passiv reflektierende Marker, die auf der Haut der Versuchspersonen angebracht wurden, wurden mit Infrarotkameras aufgenommen. Die 3D-Position jedes Markers über die Zeit wird mit einer Genauigkeit von weniger als 1,0 mm berechnet. Im vorliegenden Experiment wurden die Markerkoordinaten mit 11 Infrarotkameras (Vicon MX Kamerasystem; Auflösung 1280 x 1024 Pixel; 200 Hz) aufgezeichnet (Abbildung 13).



Abbildung 13: Kamerasetup mit 11 Infrarotkameras zur Aufnahme der Objektübergaben.

Für die Aufnahmen wurden 18 reflektierende Marker (Durchmesser 14 mm) an anatomischen Orientierungspunkten der Versuchspersonen platziert. Die Markerpositionen wurden in Anlehnung an das alaska/Dynamicus Modell angebracht (Tabelle 3).

Tabelle 3: Liste der reflektierenden Marker, die in Anlehnung an das alaska/Dynamicus Modell an den Versuchspersonen angebracht wurden.



Kopf			
LFHD	Left front head	RFHD	Right front head
LBHD	Left back head	RBHD	Right back head
Schulter			
LACR	Left acromion	RACR	Right acromion
LHUM	Left humerus	RHUM	Right humerus
Oberarm			
LELB_lat	Left elbow lateral	RELB_lat	Right elbow lateral
LELB_med	Left elbow medial	RELB_med	Right elbow medial
Unterarm			
LWRI_lat	Left wrist lateral	RWRI_lat	Right wrist lateral
LWRI_med	Left wrist medial	RWRI_med	Right wrist medial
Hand			
LFIN	Left index finger knuckle	RFIN	Right index finger knuckle

Der Aufnahmebereich des Versuchs hatte die Form eines Kreises mit einem Durchmesser von 468 cm, in dessen Mitte ein Stuhl platziert wurde. Auf dem Kreis befanden sich an sechs Positionen Holzträger auf denen Kunststoffbecher in unterschiedlichen Farben (orange, gelb, weiß, rot, grün und blau) standen (Abbildung 14A+B). Die Kunststoffbecher hatten eine konisch geschwungene Form (Höhe: 13,1 cm; Durchmesser oben: 8,9 cm; Durchmesser unten: 5,6 cm), die in jeder Greifhöhe eine natürliche Greifhaltung der menschlichen Hand ermöglichen. Die Höhe der Holzträger wurde so gewählt, dass sowohl für das 5. als auch das 95. Perzentil ein Abgreifen der Becher in einer komfortablen Haltung gewährleistet wird. Insgesamt kamen drei Sätze Becher mit jeweils sechs Bechern mit unterschiedlichen Füllmengen zum Einsatz (Abbildung 14C). Sechs Becher waren ohne Füllung (36 g), sechs Becher waren zu 50 % mit Wasser gefüllt (276 g) und weitere sechs Becher waren zu 90 % mit Wasser gefüllt (468 g). Die visuelle und auditive Wahrnehmung des Nehmers wurde in zwei Durchgängen mit einer schwarz lackierten Skibrille und einem starken Gehörschutz (3M Peltor X5A, SNR=37dB) manipuliert (Abbildung 14D).

Im Rahmen der Übergabeuntersuchung kam eine standardisierte Übergabeperson (SP) für die Interaktion mit allen teilnehmenden Versuchspersonen (VP) zum Einsatz. Die standardisierte Übergabeperson wurde instruiert die Übergaben natürlich nach ihren Präferenzen durchzuführen, jedoch darauf zu achten ihr Verhalten bei allen Übergaben möglichst konstant zu halten. Bei zehn Versuchspersonen begann die SP als Geber, bei den anderen zehn Versuchspersonen begann die SP als Nehmer. Nachdem alle Übergaben durchgeführt wurden, tauschten die Standardperson und die Versuchsperson die Rollen und die Untersuchung wurde mit den getauschten Rollen erneut durchgeführt.

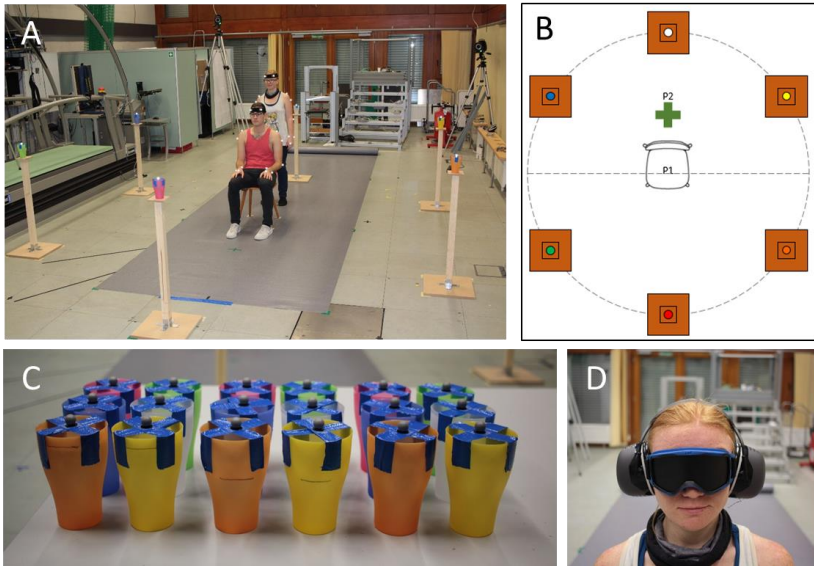


Abbildung 14: Versuchsaufbau der Übergabeuntersuchung. (A) Start- bzw. Endposition einer jeden Übergabe. (B) Kreisförmige Anordnung ($\varnothing = 468$ cm) der Holzträger auf denen die Becher stehen. (C) Jeweils sechs Becher mit reflektierenden Markern und unterschiedlichen Füllmengen mit Wasser. Von links nach rechts: 90% Füllung (468 g), 50% Füllung (276 g), keine Füllung (36 g). (D) Manipulation der visuellen und auditiven Wahrnehmung durch schwarz lackierte Skibrille und Gehörschutz.

4.3.2 Ablauf einer Objektübergabe

Der Ablauf einer Objektübergabe wird aus Sicht der SP in der Geberrolle und der VP in der Nehmerrolle beschrieben. Zu Beginn jeder Aufnahme saß die VP auf dem Stuhl. Die SP stand auf der grünen Markierung hinter der VP. Beide Personen blickten zum Versuchsleiter (Abbildung 14A). Die Aufnahme wurde gestartet und der SP direkt im Anschluss eine Farbkarte gezeigt. Die Farbkarte zeigte der SP zum einen an, welcher Becher übergeben werden soll, zum anderen diente sie als „GO-Signal“ für die SP, sich zum angezeigten Becher zu bewegen, diesen aufzunehmen und ihn an die sitzende VP zu übergeben. Die Farben der Farbkarten entsprachen denen der sechs Becher.

Die Reihenfolge der Farbkarten war pseudorandomisiert. In jedem Durchgang kam jede Farbe und entsprechend jede Raumrichtung einmal vor. Die Reihenfolge war für alle Versuchspersonen gleich. Nach erfolgter Übergabe des Bechers stellte sich die SP wieder zurück auf die Markierung hinter der VP. In diesem Zustand wurde die Aufnahme gestoppt und dies den beiden Versuchspersonen signalisiert. Daraufhin nahm die SP der VP den Becher wieder ab, stellte diesen zurück auf den Holzträger und kehrte zurück auf die grüne Markierung.

4.3.3 Stichprobe

An dieser Untersuchung nahmen 20, nach eigener Aussage, gesunde und erwachsene Versuchspersonen teil. Die Versuchspersonen waren zwischen 20 und 32 Jahre alt und Rechtshänder (Alter: $24,2 \pm 3$ Jahre, Größe: 176 ± 8 cm; Gewicht: 74 ± 12 kg). Alle Versuchspersonen nahmen freiwillig an der Studie teil und wurden vorher ausführlich über den Untersuchungsablauf, mögliche Risiken, ihre Rechte und die Anonymität der Daten aufgeklärt. Hierfür unterschrieben alle Versuchspersonen eine Einverständniserklärung. Die Versuchspersonen wiesen keine Seheinschränkungen auf bzw. trugen ihre entsprechende Sehhilfe für die Untersuchung. Alle Versuchspersonen wiesen eine normale Zeit- und Bewegungsantizipation auf (getestet mit ZBA, Vienna Test System, Schuhfried).

4.3.4 Versuchsablauf

Die Untersuchung fand im BioMotion Center des Karlsruher Instituts für Technologie statt. Am Tag der Untersuchung wurden die Versuchspersonen über die Untersuchung und deren Ablauf (Abbildung 15) sowie ihre Rechte aufgeklärt. Anschließend unterschrieben sie eine Einverständniserklärung und führten einen Zeit- und Bewegungsantizipationstest durch (ZBA, Vienna Test System, Schuhfried). Wenn die Versuchspersonen eine normale Zeit- und Bewegungsantizipation aufwiesen, durften sie an der Übergabeuntersuchung teilnehmen. Für die Aufzeichnung der Objektübergaben wurden den Versuchspersonen die reflektierenden Marker an den zuvor beschriebenen

anatomischen Punkten aufgeklebt. Danach nahmen die Versuchspersonen im Aufnahmebereich Platz. Den Versuchspersonen wurde der Ablauf einer Übergabe erklärt. Die Versuchspersonen führten zunächst 12 Übergaben (jede Raumrichtung zwei Mal) zur Gewöhnung an die Interaktionsaufgabe durch. Hierfür kamen die Becher ohne Füllung zum Einsatz. Es wurden keine Vorgaben zur Bewegungsgeschwindigkeit und zur Ausführung der Übergaben gemacht, um möglichst realitätsnahe Geschwindigkeiten und Bewegungstrajektorien der Versuchspersonen aufzeichnen zu können. Direkt im Anschluss wurde die Baselinemessung mit weiteren 6 Wiederholungen mit leeren Bechern durchgeführt. Die Versuchspersonen wurden darüber nicht informiert und führten entsprechend 18 Übergaben in Folge durch. Danach folgten vier Bedingungen, die in ihrer Reihenfolge ausgeglichen über alle Versuchspersonen durchgeführt wurden, um Reihenfolgeeffekte auszuschließen. Zwei der vier Übergabebedingungen wurden ohne Einschränkung der Wahrnehmung der Nehmerperson durchgeführt. In einer der beiden Bedingungen waren die Becher zu 50 % mit Wasser gefüllt, in der anderen Bedingung waren sie zu 90 % mit Wasser gefüllt. In den beiden anderen Übergabebedingungen wurde die visuelle und auditive Wahrnehmung der Nehmerperson durch die schwarz lackierte Skibrille und den Gehörschutz eingeschränkt. Zusätzlich zur Wahrnehmungseinschränkung wurde die Füllung der Becher mit 50 % und 90 % Wasser variiert. In jeder der vier Übergabebedingungen wurden jeweils 6 Übergaben durchgeführt. Am Ende der Aufnahmen wurden den beiden Versuchspersonen die Marker abgenommen und eine qualitative Befragung zu besonders angenehmen und besonders unangenehmen Situationen während der Übergabe sowie zu ihren Übergabestrategien durchgeführt.

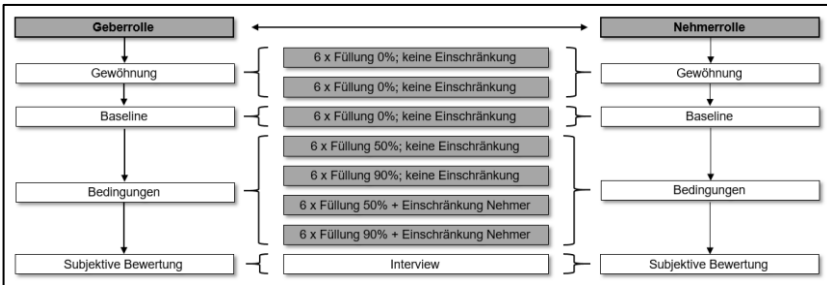


Abbildung 15: Studiendesign Experiment I.

4.3.5 Datenverarbeitung und Statistik

4.3.5.1 Phaseneinteilung

Die Bewegungsdaten wurden mit der Software Vicon Nexus 1.8.5 aufgezeichnet und aufbereitet. Die weitere Aufbereitung der Daten fand mit der Software MATLAB (R2019b) statt. Die kinematischen Daten wurden digital mit einem Butterworth low-pass filter zweiter Ordnung mit einer cut-off Frequenz von 6 Hz gefiltert. Zur differenzierten Bewertung der Objektübergaben wurde der gesamte Übergabevorgang in mehrere Phasen unterteilt. Zur Identifikation der Phasen wurden die Marker der Geberhand (RFIN Geber), der Nehmerhand (RFIN Nehmer) und des Bechers (CUP) genutzt. Basierend auf den Markerdaten wurden die Verläufe der Geschwindigkeiten, der Differenzen der Geschwindigkeiten sowie der räumlichen Distanzen der Marker zueinander im dreidimensionalen Raum berechnet (Abbildung 17).

Tabelle 4: Tabellarische Beschreibung der eingeteilten Phasen, deren Start- und Endpunkte sowie deren Segmentierungsparameter.

Phase	Handlung	Start	Segmentierungsparameter	Ende	Segmentierungsparameter
Beschaffungsphase	Geber bewegt sich auf das Übergabeobjekt zu und greift es sicher.	Start der Bewegung des Gebers	Geschwindigkeitsschwellwert von Kopfmittelpunkt und Geberhand $> 0,00035$ m/s	Sicherer Griff des Übergabeobjekts durch Geber	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Geberhand und Übergabeobjekt $\leq 0,00015$ m/s
Transport-phase	Geber greift das Übergabeobjekt und transportiert es zum Nehmer.	Sicherer Griff des Übergabeobjekts durch Geber	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Geberhand und Übergabeobjekt $\leq 0,00015$ m/s	Sicherer Griff des Übergabeobjekts durch Nehmer.	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Nehmerhand und Übergabeobjekt $\leq 0,00015$ m/s
Physische Übergabe	Übergang des Übergabeobjekts von Geber an Nehmer.	Sicherer Griff des Übergabeobjekts durch Nehmer.	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Nehmerhand und Übergabeobjekt $\leq 0,00015$ m/s	Lösen des sicheren Griffs durch Geber	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Geberhand und Übergabeobjekt $>= 0,00015$ m/s

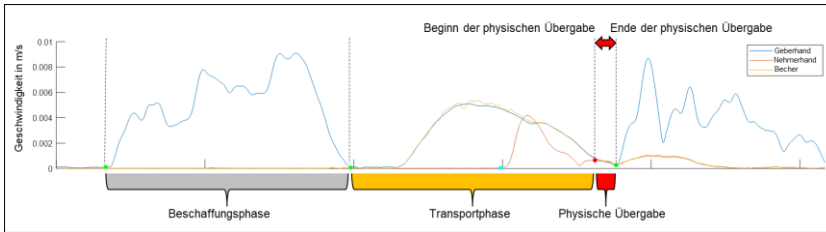


Abbildung 16: Phaseneinteilung einer Objektübergabe am Beispiel der Geschwindigkeitsverläufe der RFIN-Marker von Versuchs- und Standardperson sowie Becher-Marker. Die Objektübergabe kann rechnerisch in eine Beschaffungsphase, eine Transportphase und die physische Übergabe unterteilt werden.

Zur Bestimmung des Startpunktes der *Beschaffungsphase* wurde der Mittelpunkt des Kopfes aus den vier Kopfmarkern berechnet. Die Beschaffungsphase gilt als eingeleitet, wenn sowohl der Kopfmittelpunkt als auch die rechte Hand aus dem Stillstand einen Geschwindigkeitsschwellwert von 0,00035 m/s überschreiten (Abbildung 16A). Die Beschaffungsphase endet mit dem sicheren Greifen des Übergabeobjekts. Zur Definition des sicheren Greifens des Objektes werden sowohl die Geschwindigkeitsdifferenz als auch der räumliche Abstand zwischen dem Marker der Geberhand und dem Marker des Übergabeobjektes berücksichtigt. Durch die Annäherung der Geberperson an das Übergabeobjekt entsteht eine hohe Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem ruhenden Objekt und der sich bewegenden Geberperson und gleichzeitig verringert sich der räumliche Abstand zwischen der Geberhand und dem Objekt. Ein sicheres Greifen des Objektes wurde definiert, wenn die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der Geberhand und dem Übergabeobjekt $\leq 0,00015$ m/s beträgt (Abbildung 18).

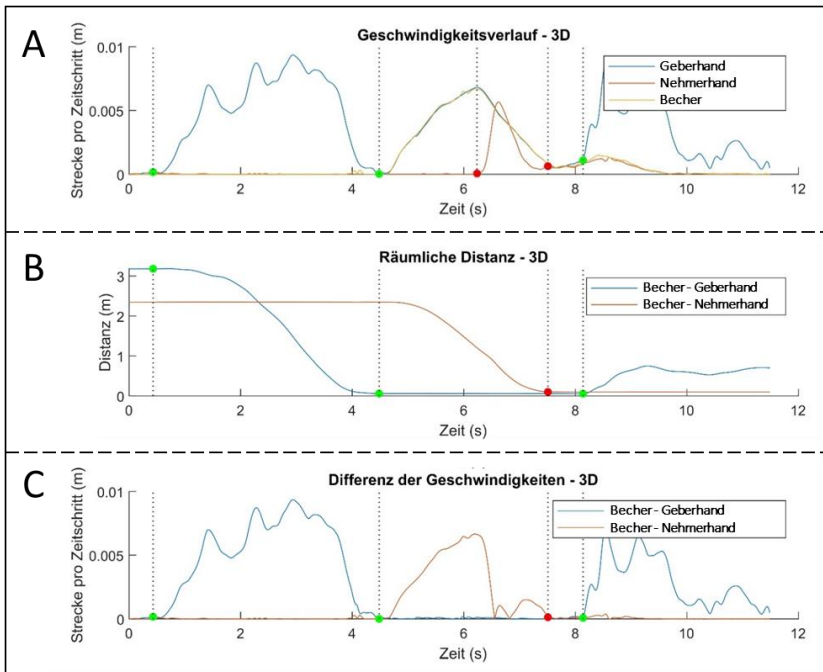


Abbildung 17: Messparameter und deren Verläufe zur Berechnung der Übergabephasen. (A) Geschwindigkeitsverlauf der RFIN-Marker der Versuchsperson, der Standperson und des Becher-Markers. (B) Räumliche Distanz zwischen RFIN-Marker der Versuchsperson und des Bechers sowie zwischen RFIN-Marker der Standardperson und Becher-Marker. (C) Differenz der Geschwindigkeit zwischen RFIN-Marker der Versuchsperson und Becher-Marker sowie zwischen RFIN-Marker der Standardperson und Becher-Marker.

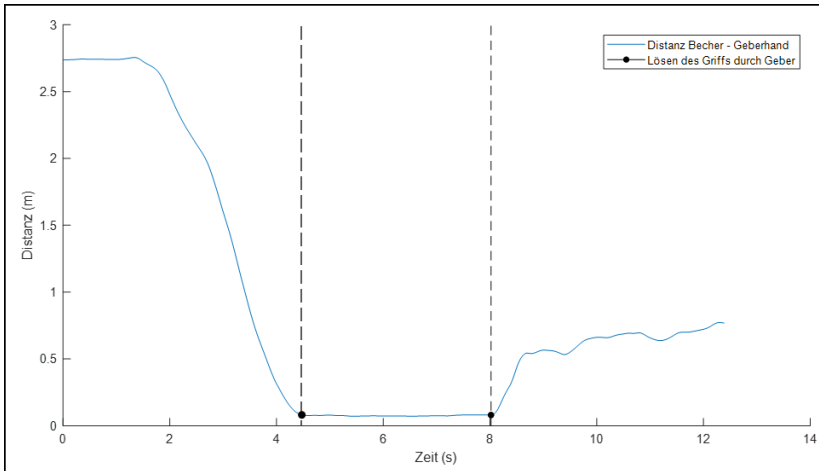


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der Distanz zwischen Marker der Geberhand und Marker des Objekts.

Mit dem sicheren Griff des Übergabeobjekts beginnt die *Transportphase* (Abbildung 16). Während der Transportphase betragen die Geschwindigkeitsdifferenz und die 1. Ableitung der räumlichen Distanz zwischen der Geberhand und dem Übergabeobjekt annähernd Null. Sowohl der Marker der Geberhand als auch der Bechermarker werden gleichzeitig im Raum bewegt. Die Transportphase endet mit dem Kontakt der Nehmerhand am Übergabeobjekt. Mit dem Griff des Übergabeobjekts durch den Nehmer beginnt die physische Übergabe. Der sichere Griff des Übergabeobjekts wird, durch die 1. Ableitung der räumlichen Distanz zwischen Nehmerhand und Übergabeobjekt definiert. Werte $\leq -0,00015$ m/s wurden als sicherer Griff definiert. Während der *physischen Übergabe* betragen die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Geberhand und Übergabeobjekt sowie Nehmerhand und Übergabeobjekt annähernd Null (Abbildung 16). Die räumliche Distanz zwischen Übergabeobjekt und sowohl Nehmer- als auch Geberhand erreicht ihre absoluten Minimalwerte. Die physische Übergabe endet mit dem Lösen des Griffs durch den Geber. Das Lösen der Hand vom Objekt wurde definiert, als der Punkt an dem die 1. Ableitung des Distanzverlaufs $\geq 0,00015$ m/s wird (Abbildung 18). Das Übergabeobjekt befindet sich

vollständig in der Hand des Nehmers. Der Geber zieht seine Hand zurück und bewegt sich anschließend zurück zur Startposition.

Die rechnerische Segmentierung der Übergaben wurde für jede Übergabe visuell anhand der Grafenverläufe sowie Segmentierungspunkte und -linien wie in Abbildung 17 geprüft. Die Segmentierungspunkte wurden genutzt um den Datensatz entsprechend der Phaseneinteilung zu strukturieren.

4.3.5.2 Abhängige Variablen und Statistik

Zur Untersuchung der Objektübergaben werden die Einflüsse der Raumrichtung, der Becherfüllung und der Wahrnehmungseinschränkungen als unabhängige Variablen auf die physische Übergabezeit und die Objektführung (zurückgelegte Strecke innerhalb der Phase der physischen Übergabe) während der physischen Übergabe als abhängige Variablen untersucht.

Die physische Übergabezeit wird definiert als Zeitraum zwischen sicherem Griff des Übergabeobjekts durch den Nehmer und Loslassen des Übergabeobjekts durch den Geber. Die physische Übergabezeit wird in Sekunden angegeben. Die Objektführung während der physischen Übergabe wird definiert als die zurückgelegte Strecke während sowohl der Geber- als auch der Nehmer physischen Kontakt mit dem Übergabeobjekt haben. Die zurückgelegte Strecke während der Objektübergabe wird in cm angegeben.

Zur Untersuchung des Einflusses der Raumrichtungen wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Raumrichtung (6) und Übergabebedingung (5) berechnet. Für die physischen Übergabezeiten zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Raumrichtungen ($F(5) = 1.303$, $p = 0.275$, $\eta^2 = 0.003$). Für die Objektführung zeigen sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Raumrichtungen ($F(2, 839) = 1.557$, $p = 0.218$, $\eta^2 = 0.015$). Sowohl für die Übergabezeit ($F(1, 656) = 119.199$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.781$) als auch für die Objektführung ($F(1,768) = 10.038$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.217$) zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Übergabebedingungen. Da keine signifikanten Unterschiede zwischen den Raumrichtungen vorliegen, wurden die Daten der sechs

Raumrichtungen für die weitere Bearbeitung zu Mittelwerten der Übergabebedingungen zusammengefasst.

Um zu prüfen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Übergabebedingungen Becherfüllung (0 %, 50 %, 90 %) und Wahrnehmungseinschränkung (eingeschränkt, nicht eingeschränkt) in Bezug auf die physische Übergabezeit und die Objektführung gibt, wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Becherfüllung (3) und Wahrnehmungseinschränkung (2) berechnet. Nicht alle Daten waren normalverteilt. Da die ANOVA als robust gegenüber einer Verletzung der Normalverteilung gilt, wurde sie für diese Studie als geeignet angesehen (Field et al., 2014; Schmitter et al., 2010; Wilcox, 2012). Auf die ANOVAs folgten Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur. Das Signifikanzniveau wurde a priori auf $p = 0,05$ festgelegt. Die Effektgröße wird durch eta Quadrat (η^2) angegeben. Bei Verletzung der Sphärizität, wurden die Freiheitsgrade mit der Greenhouse-Geisser-Korrektur angepasst. Die statistischen Berechnungen wurden mit der Software JASP (Version 0.17.1) durchgeführt.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Physische Übergabezeit

Die Erhöhung der Becherfüllung führt zu einem signifikanten Anstieg der Übergabezeit ($F(1, 109) = 148.384, p = <.001, \eta^2 = .511$). Die Kombination aus höherem Becherfüllgrad und Wahrnehmungseinschränkung des Nehmers führt zu einem signifikanten Anstieg der Übergabezeit ($F(1, 688) = 127.867, p = <.001, \eta^2 = .126$).

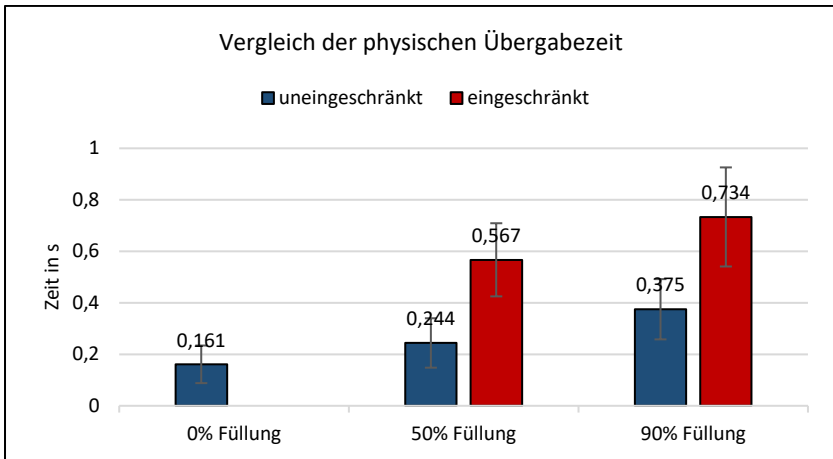


Abbildung 19: Vergleich der physischen Übergabezeiten mit 0%, 50% und 90% Becherfüllung, sowie eingeschränkter und uneingeschränkter Wahrnehmung.

Ohne Wahrnehmungseinschränkung führt eine Becherfüllung von 50 % im Vergleich zu einer Becherfüllung von 0 % zu einer signifikanten Erhöhung ($t(19) = -3.172$, $p_{\text{bonf}} = 0.036$, $d = -0.676$) der physischen Übergabezeit von 0,161 s ($\pm 0,073$ s) auf 0,244 s ($\pm 0,096$). Eine Becherfüllung von 90 % führt im Vergleich zu einer Becherfüllung von 50 % ebenfalls zu einer signifikanten Erhöhung ($t(19) = -5,011$, $p_{\text{bonf}} = <.001$, $d = -1,067$) der physischen Übergabezeit von 0,244 s ($\pm 0,096$) auf 0,375 s ($\pm 0,117$ s). Beim Vergleich der Becherfüllung mit 90 % mit der Becherfüllung mit 0 %, zeigt sich auch hier eine signifikante Erhöhung ($t(19) = -8,183$, $p_{\text{bonf}} = <.001$, $d = -1,743$) der physischen Übergabezeit von 0,161 s ($\pm 0,073$ s) auf 0,375 s ($\pm 0,117$ s) (siehe Abbildung 19). Der Einfluss der Wahrnehmungseinschränkungen der Nehmerperson führt bei der Übergabe des zu 50 % gefüllten Bechers im Vergleich zur uneingeschränkten Wahrnehmung der Nehmerperson zu einer signifikanten Erhöhung ($t(19) = -14,525$, $p_{\text{bonf}} = <.001$, $d = -2,629$) der physischen Übergabezeit von 0,244 s ($\pm 0,096$) auf 0,567 s ($\pm 0,142$). Der Einfluss der eingeschränkten Wahrnehmung der Nehmerperson führt bei der Becherübergabe mit 90 % Füllung im Vergleich zur uneingeschränkten Wahrnehmung ebenfalls zu einer signifikanten Erhöhung ($t(19) = -16,140$, $p_{\text{bonf}} = <.001$, $d = -2,921$) der physischen Übergabezeit von 0,375 s ($\pm 0,117$ s) auf

0,734 s ($\pm 0,192$ s). Bei eingeschränkter Wahrnehmung führt eine Becherfüllung von 90 % (0,734 s $\pm 0,192$ s) im Vergleich zu einer Becherfüllung von 50 % (0,567 s $\pm 0,142$ s) zu einer signifikant höheren physischen Übergabezeit ($t(19) = -6,383$, $p_{\text{bonf}} = <.001$, $d = -1,360$).

Der Zeitaufwand für die physische Übergabe steigt signifikant mit dem Füllgrad des Bechers. Die Wahrnehmungseinschränkungen der Nehmerperson führen bei gleicher Becherfüllung zu signifikant höheren Übergabezeiten als ohne Wahrnehmungseinschränkungen.

4.4.2 Objektführung

Die Erhöhung des Becherfüllgrades führt zu einer signifikanten Verlängerung der Objektführung ($F(1, 306) = 23.218$, $p = <.001$, $\eta^2 = 0.291$). Die Kombination aus höherer Becherfüllung und Wahrnehmungseinschränkungen der Nehmerperson führt zu einer signifikanten Verkürzung der Objektführung ($F(1, 222) = 6.189$, $p = 0.016$, $\eta^2 = 0.042$).

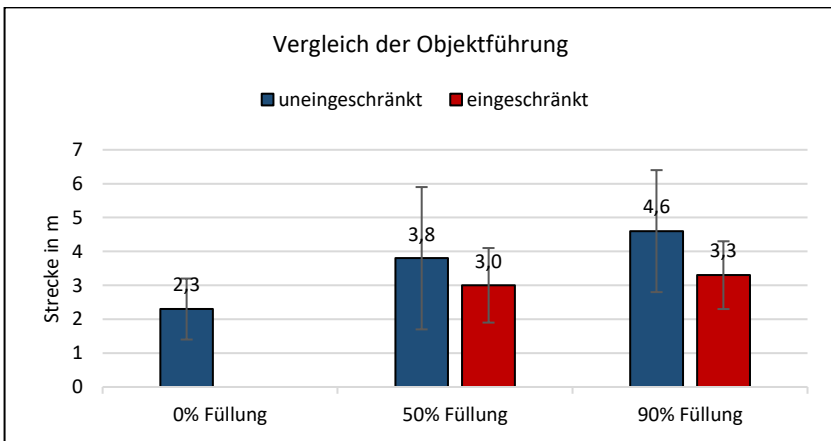


Abbildung 20: Vergleich der Objektführung mit 0%, 50% und 90% Becherfüllung, sowie eingeschränkter und uneingeschränkter Wahrnehmung.

Ohne eingeschränkte Wahrnehmung der Nehmerperson führt die höhere Becherfüllung von 50 % im Vergleich zur Becherfüllung von 0 % zu einem

signifikanten Anstieg ($t(19) = -4,939$, $p_{\text{bonf}} = <.001$, $d = -1,108$) der Objektführung von 2,3 cm ($\pm 0,9$ cm) auf 3,8 cm ($\pm 2,1$ cm). Eine Becherfüllung von 90 % führt im Vergleich zum leeren Becher (0 %) zu einem ebenfalls signifikanten Anstieg ($t(19) = -7,441$, $p_{\text{bonf}} = <.001$, $d = -1,669$) der Objektführung von 2,3 cm ($\pm 0,9$ cm) auf 4,6 cm ($\pm 1,8$ cm). Die höhere Becherfüllung von 90 % im Vergleich zur Becherfüllung von 50 % führt zu keinem weiteren signifikanten Anstieg ($t(19) = -2,502$, $p_{\text{bonf}} = 0,220$, $d = -0,561$) der Objektführung von 3,8 cm ($\pm 2,1$ cm) auf 4,6 cm ($\pm 1,8$ cm) (siehe Abbildung 20). Die eingeschränkte Wahrnehmung der Nehmerperson führt bei der Übergabe des Bechers mit 50 % Füllung zu keinem signifikanten Unterschied in der Objektführung ($t(19) = 2,352$, $p_{\text{bonf}} = 0,354$, $d = 0,598$) von 3,8 cm ($\pm 2,1$ cm) auf 3,0 cm ($\pm 1,1$ cm). Die eingeschränkte Wahrnehmung der Nehmerperson führt bei der Übergabe des Bechers zu 90 % gefüllten Bechers zu einer signifikanten Reduktion ($t(19) = 3,629$, $p_{\text{bonf}} = 0,012$, $d = 0,922$) der Objektführung von 4,6 cm ($\pm 1,8$ cm) auf 3,3 cm ($\pm 1,0$ cm). Bei eingeschränkter Wahrnehmung führt die 90 %ige Becherfüllung im Vergleich zur 50 %igen Becherfüllung zu keinem signifikanten Unterschied ($t(19) = -1,056$, $p_{\text{bonf}} = 1,000$, $d = -0,237$) der Objektführung von 3,0 cm ($\pm 1,1$ cm) auf 3,3 cm ($\pm 1,0$ cm). Die Wahrnehmungseinschränkung der Nehmerperson führt weder bei einer 50 %igen Becherfüllung ($t(19) = -1,809$, $p_{\text{bonf}} = 1,000$, $d = -0,510$) noch bei einer 90 %igen Becherfüllung ($t(19) = -2,649$, $p_{\text{bonf}} = 0,159$, $d = -0,747$) zu einer signifikant längeren Objektführung als in der Baselinebedingung ohne Wahrnehmungseinschränkung und ohne Becherfüllung.

Die zurückgelegte Strecke für die gemeinsame Führung des Übergabeobjekts steigt signifikant mit dem Füllgrad des Bechers. Die Wahrnehmungseinschränkungen der Nehmerperson führen bei gleicher Becherfüllung zu einer signifikant geringeren Objektführung während der physischen Übergabe.

4.4.3 Übergabegeschwindigkeit

Die Erhöhung des Becherfüllgrades führt zu einer signifikanten Reduktion der Übergabegeschwindigkeit ($F(1, 528) = 60,832$, $p = <.001$, $\eta^2 = .265$). Die Kombination aus höherem Becherfüllgrad und Wahrnehmungseinschränkung

der Nehmerperson führt zu einer signifikanten Reduktion der Übergabegeschwindigkeit ($F(1, 388) = 79.711, p = <.001, \eta^2 = .186$).

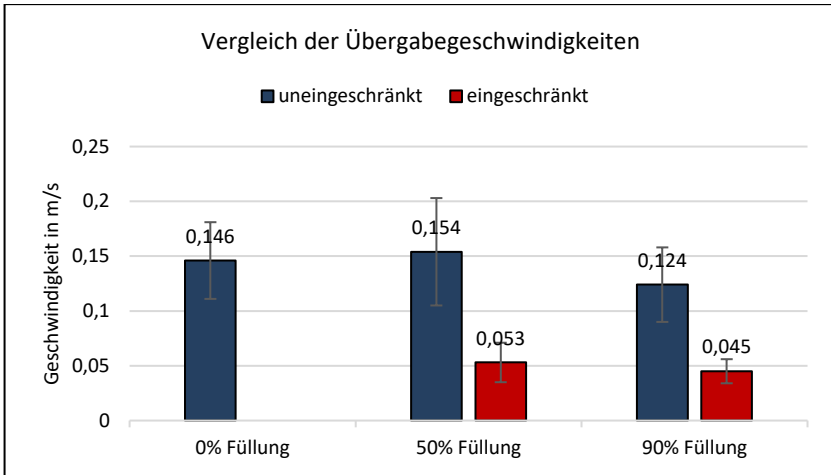


Abbildung 21: Vergleich der Übergabegeschwindigkeiten mit 0%, 50% und 90% Becherfüllung, sowie eingeschränkter und uneingeschränkter Wahrnehmung.

Ohne Wahrnehmungseinschränkung führt eine Becherfüllung von 50 % (0,154 m/s \pm 0,049 m/s) im Vergleich zu einer Becherfüllung von 0 % (0,146 m/s \pm 0,035 m/s) zu keinen signifikanten Unterschieden ($t(19) = -1.104, p_{\text{bonf}} = 1.000, d = -0.237$) der physischen Übergabegeschwindigkeit. Eine Becherfüllung von 90 % führt im Vergleich zu einer Becherfüllung von 50 % zu einer signifikanten Abnahme ($t(19) = 4.246, p_{\text{bonf}} = <.001, d = 0,911$) der physischen Übergabegeschwindigkeit von 0,154 m/s (\pm 0,049 m/s) auf 0,124 m/s (\pm 0,034 m/s). Vergleicht man die Becherfüllung mit 90 % mit der Becherfüllung mit 0 %, so spiegelt sich die Erhöhung der physischen Übergabezeit von 0,161 s (\pm 0,073 s) auf 0,375 s (\pm 0,117 s) auch hier in einer signifikanten Verringerung ($t(19) = 3.142, p_{\text{bonf}} = 0.0371, d = 0,674$) wider (siehe Abbildung 21). Der Einfluss der Wahrnehmungseinschränkungen der Nehmerperson führt bei einer Übergabe des zu 50 % gefüllten Bechers zu einer signifikanten Reduktion ($t(19) = 13.187, p_{\text{bonf}} = <.001, d = 3,047$) der Übergabegeschwindigkeit von 0,154 m/s (\pm 0,049 m/s) auf 0,053 m/s (\pm 0,018 m/s) im Vergleich zur uneingeschränkten Wahrnehmung.

mung der Nehmerperson. Der Einfluss der eingeschränkten Wahrnehmung der Nehmerperson führt auch bei der Übergabe des Bechers mit 90 % Füllung zu einer signifikanten Reduktion ($t(19) = 10,308$, $p_{\text{bonf}} = <.001$, $d = 2,382$) der Übergabegeschwindigkeit von $0,124 \text{ m/s}$ ($\pm 0,034 \text{ m/s}$) auf $0,045 \text{ m/s}$ ($\pm 0,011 \text{ m/s}$) im Vergleich zur uneingeschränkten Wahrnehmung der Nehmerperson. Bei eingeschränkter Wahrnehmung ergeben sich bei 90 % Becherfüllung ($0,045 \text{ m/s} \pm 0,011 \text{ m/s}$) im Vergleich zu 50 % Becherfüllung ($0,053 \text{ m/s} \pm 0,018 \text{ m/s}$) keine signifikanten Unterschiede in der Übergabegeschwindigkeit ($t(19) = 1.146$, $p_{\text{bonf}} = 1.000$, $d = 0,246$).

Die höhere Becherfüllung führt zu signifikant niedrigeren Übergabegeschwindigkeiten. Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers führen zu signifikant niedrigeren Übergabegeschwindigkeiten als ohne Wahrnehmungseinschränkungen.

4.4.4 Subjektive Wahrnehmung der Versuchspersonen

Als besonders angenehm wurde von den Versuchspersonen eine „optimale Geschwindigkeit“ genannt. Bevorzugt wird eine „Geschwindigkeit, bei der lange genug gewartet wird, bis der Becher richtig gegriffen ist“. Der Becher mit der „höheren Becherfüllung“ wurde von einigen Versuchspersonen als angenehmer empfunden, da nach ihrer Aussage der Becher dadurch „vorsichtiger übergeben“ wurde. In den Bedingungen mit eingeschränkter Wahrnehmung wurde der „besonders sanfte Kontaktaufbau“ als angenehm genannt. Als besonders unangenehm werden dagegen „zu schnelle Übergaben“ genannt, die zu einem „abrupten Kontakt“ führen. In diesem Zusammenhang wird auch das Gefühl des „zu frühen Loslassens“ durch den Geber und das damit verbundene Gefühl des „Nachfassen-Müssens“ als besonders unangenehm genannt. Als besonders angenehm wird der „fließende Übergang des Bechers von Hand zu Hand“ empfunden. Vor allem wenn dabei „der Arm kaum bewegt werden musste“ und „der Geber schon frühzeitig gesehen“ wurde. Als unangenehm empfanden die Versuchspersonen auch, wenn sie das Gefühl hatten, „zu sehr auf den Geber zugehen zu müssen“.

Frontale Übergaben wurden als besonders angenehm empfunden. Dies wurde häufig in Kombination, mit einem „großen Bogen den der Geber gelaufen ist“ um möglichst frontal zu übergeben, genannt. Besonders unangenehm empfanden die Versuchspersonen Übergaben die aus den Raumrichtungen hinter der Sitzposition kamen. Als Grund hierfür nennen die Versuchspersonen „den kurzen zeitlichen Abstand zwischen der Wahrnehmung der Geberperson und der Übergabe des Objekts“. Außerdem wurden „Übergaben aus Nehmersicht von links“, also über die Diagonale als unangenehm empfunden. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass sich der Geber dem Nehmer stärker annähern muss, um das Objekt zu übergeben. Des Weiteren bieten die mit Wasser gefüllten Becher bei Übergabe über die Diagonale ein größeres Gefahrenpotenzial das Wasser tatsächlich über dem Nehmer zu verschütten. Entgegen dieser Argumente bieten Übergaben über die Diagonale eigentlich die besten Voraussetzungen für eine komplementäre Handhaltung von Geber und Nehmer. Andere Versuchspersonen bewerten Übergaben aus Nehmersicht von rechts als besonders unangenehm, da diese beim Nehmer zu einem „Abknicken des Handgelenks“ führen. Diese Aussage lässt sich dadurch erklären, dass der Nehmer nicht passiv verharret und darauf wartet, dass der Geber das Objekt in die Hand übergibt. Sondern, dass der Nehmer aktiv zur erfolgreichen Übergabe beitragen will und sich entsprechend versucht an die Ausrichtung des Gebers und des Übergabeobjekts anzupassen.

Bezogen auf den Becherkontakt wurde als besonders angenehm empfunden, „wenn die ganze Handfläche Kontakt zum Becher hat“, wenn so gegriffen werden konnte, dass „kein Finger über den oberen oder unteren Becherrand hinausragt“ und wenn der Becher „vom Geber entweder weit oben oder weit unten“ gegriffen wird, so dass eine große greifbare Oberfläche für den Nehmer präsentiert wird. In Übereinstimmung damit wurde es als besonders unangenehm empfunden, „wenn der Becher zu weit oben gegriffen werden musste“ und dadurch „die Finger über den Becherrand gehen oder die obere Kante des Bechers spüren“. Als unangenehm wurde auch empfunden, wenn es bei der Übergabe zu „Finger- oder Handkontakt“ zwischen Geber und Nehmer kam. Außerdem wurde es als unangenehm empfunden, wenn das Gefühl bestand „die Wasserbewegung im Becher (das Schwappen) ausgleichen zu müssen“. Bei eingeschränkter Wahrnehmung wurde es als unange-

nehm empfunden, wenn bei den Übergaben „zu viel Druck auf mit dem Objekt auf die Hand ausgeübt wurde“.

4.5 Diskussion

Ziel der Untersuchung war es, herauszufinden, wie sich unterschiedliche Objekteigenschaften, in Form von unterschiedlichen Wasserfüllmengen in Kunststoffbechern, sowie visuelle und auditive Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers auf die Leistungsparameter Übergabezeit, Objektführung und Übergabegeschwindigkeit während der Phase der physischen Übergabe auswirken. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Objekteigenschaften einen signifikanten Einfluss auf die Übergabezeit und die Objektführung haben. Je höher die Becherfüllung mit Wasser, desto länger die physische Übergabezeit und desto länger die Objektführung während der physischen Übergabe. Die Einschränkung der visuellen und auditiven Wahrnehmung der Nehmerperson führte zu signifikant höheren Übergabezeiten bei gleichzeitig signifikant geringerer Objektführung während der physischen Übergabe. Die Übergabegeschwindigkeit kann als Variable für die Untersuchung von Objektübergaben als ungeeignet angesehen werden, da die Details, aus denen sich Änderungen der Übergabegeschwindigkeit ergeben, nicht ersichtlich sind. Die Übergabegeschwindigkeit ist eine Funktion aus der Übergabezeit (Zeit) und der Objektführung (Weg). Eine Erhöhung der Übergabegeschwindigkeit kann sich aus einer Verkürzung der Objektführung bei gleicher Übergabezeit ergeben. Gleichzeitig kann sie sich aus einer Verkürzung der Übergabezeit bei konstanter Objektführung ergeben. Eine konstante Übergabegeschwindigkeit kann sich aus einer Erhöhung der Objektführung bei gleichzeitiger Erhöhung der Übergabezeit oder aus einer Verringerung der Übergabezeit bei gleichzeitiger Verringerung der Objektführung ergeben.

4.5.1 Einfluss der Objekteigenschaften auf die Übergabeleistung

In der vorliegenden Untersuchung ergeben sich für die Übergabe von Kunststoffbechern mit einem Gewicht von 36 g ohne Wasserfüllung Übergabezeiten von $161 \text{ ms} \pm 73 \text{ ms}$. Die mittlere Objektführung beträgt $23 \text{ mm} \pm 9 \text{ mm}$. Die Übergaben der Kunststoffbecher mit 50 % Wasserfüllung und einem Gesamtgewicht von 276 g führen zu Übergabezeiten von $244 \text{ ms} \pm 96 \text{ ms}$, bei einer Objektführung von $38 \text{ mm} \pm 21 \text{ mm}$. Die Übergaben der Kunststoffbecher mit 90 % Wasserfüllung und einem Gesamtgewicht von 468 g ergeben eine mittlere Übergabezeit von $375 \text{ ms} \pm 117 \text{ ms}$ und eine Objektführung von $46 \text{ mm} \pm 18 \text{ mm}$.

Der Anstieg der Übergabezeit mit zunehmender Füllmenge der Becher und damit mit zunehmendem Objektgewicht bzw. mit zunehmender Schwierigkeit des Übergabeobjekts steht im Einklang mit den Ergebnissen von Chan et al. (2012), die Übergaben mit unterschiedlich schweren Objekten in vertikaler Ausrichtung verglichen haben. Für das leichteste Objekt mit 483 g beträgt die Übergabezeit $470 \text{ ms} \pm 159 \text{ ms}$. Für das mittelschwere Objekt mit 577 g beträgt die Übergabezeit $500 \text{ ms} \pm 182 \text{ ms}$ und für das schwerste Objekt mit 678 g beträgt die Übergabezeit $523 \text{ ms} \pm 201 \text{ ms}$. Aus den Ergebnissen schließen Chan et al. (2012), dass unterschiedliche Objektgewichte zu unterschiedlichen Schwierigkeiten bei der Übergabe führen. Ein schwereres Objekt stellt eine größere Schwierigkeit dar, da es mehr Aufmerksamkeit von den Teilnehmern erfordert und ein Fallenlassen schwerwiegendere Folgen (z. B. Verletzungen) haben kann. In Anlehnung an die Ausführungen von Chan et al. (2012) bleibt an dieser Stelle die Frage offen, ob in der hier durchgeführten Untersuchung das Objektgewicht zu einer erhöhten Übergabezeit führt oder tatsächlich die Schwierigkeit der Übergabe, die aus dem expliziten Wissen resultiert, dass der Becherinhalt bei einer höheren Füllung leichter verschüttet werden kann. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden insgesamt 480 Übergaben mit wassergefüllten Bechern aufgezeichnet. Bei keiner der 480 Übergaben wurde Wasser aus dem Becher verschüttet. Daraus kann geschlossen werden, dass die Teilnehmer versuchten, die Übergaben so sicher und zuverlässig wie möglich durchzuführen. Je höher der Wasserfüll-

grad der Becher war, desto schwieriger wurden die Übergaben, da das Risiko, Wasser zu verschütten, zunahm. Um die gleiche Sicherheit und Zuverlässigkeit der Übergaben zu erreichen, mussten die Übergaben langsamer und sorgfältiger durchgeführt werden. Im Gegensatz zur Studie von Chan et al. (2012) zeigt sich, dass die Becher in der vorliegenden Untersuchung trotz 90 % Wasserfüllung mit $375 \text{ ms} \pm 117 \text{ ms}$ mit einer deutlich kürzeren Übergabezeit übergeben wurden als das ähnlich schwere Objekt von Chan et al. mit einer Übergabezeit von $470 \text{ ms} \pm 159 \text{ ms}$. Es wird vermutet, dass das natürlichere Greifen der Kunststoffbecher in dieser Untersuchung und die daraus resultierenden geringeren Anforderungen an die Präzision des Greifens zu den geringeren Übergabezeiten führen.

Controzzi et al. (2018) verwendeten für ihre Übergabeuntersuchung ein Objekt mit einem Gewicht von 180 g, das horizontal übergeben wurde. Der Geber hielt das Objekt statisch, die Reichbewegung durch den Nehmer wurde mit langsamer, mittlerer und schneller Reichgeschwindigkeit manipuliert. Controzzi et al. (2018) konnten zeigen, dass eine schnelle Reichbewegung des Nehmers bei einem Geber, der das Objekt statisch hält, zu kürzeren Übergabezeiten führt. Bei einer langsamen Reichbewegung dauerten die Übergaben ca. 350 ms, bei einer mittleren Reichbewegung ca. 300 ms und bei einer schnellen Reichbewegung ca. 250 ms. Controzzi et al. (2018) erklären dieses Verhalten damit, dass der Nehmer durch eine schnelle Reichbewegung eine intensivere Kollision erzeugt, wodurch die taktilen Signale eine bestimmte Schwelle überschreiten und der Geber früher mit dem Loslassen beginnt (Controzzi et al., 2018; Johansson et al., 1992). Die Ergebnisse von Controzzi et al. (2018) gelten für das Loslassen eines Objekts durch einen Geber, der das Objekt statisch hält, und stimmen mit der Theorie von Mason und Mackenzie (2005) und Chan et al. (2012) überein, wonach der Geber für die Sicherheit des Objekts verantwortlich ist, während der Nehmer die Effizienz des Objektaustauschs moduliert. Controzzi et al. (2018) zeigen, dass unter normalen visuellen Bedingungen der Geber die Freigabegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Beschleunigung der Reichbewegung des Nehmers skaliert. Dies deutet darauf hin, dass der Geber, während der Nehmer nach dem Objekt greift, aus der Beobachtung der Bewegung des Nehmers auf die Dynamik der bevorstehenden Übergabe schließt und daraus

die angemessene Freigabegeschwindigkeit ableitet. Überträgt man diese Ergebnisse auf einen Geber, der einen Gegenstand dynamisch an einen dynamischen Nehmer übergibt, so kann diskutiert werden, ob die Verlängerung der Übergabezeit durch die Becherfüllung darauf zurückzuführen ist, dass der Nehmer versucht, einen möglichst geringen Kollisionsimpuls zu erzeugen, um kein Wasser zu verschütten. Diese Verringerung des Kollisionsimpulses kann dadurch erklärt werden, dass der Nehmer seine Reichbewegung langsamer ausführt. Die Idee des verringerten Kollisionsimpulses wird dadurch unterstützt, dass mit zunehmender Becherfüllung auch die Objektführung während der physischen Übergabe zunimmt. Diese Beobachtung kann dadurch erklärt werden, dass der Nehmer seinen Arm früher in Richtung des Objektes ausstreckt, um einen sanfteren Kontakt mit dem Objekt herzustellen und somit ein höheres Maß an Sicherheit bei der Übergabe zu gewährleisten.

Mason und Mackenzie (2005) führten eine Untersuchung durch, bei der ein 90 g schweres Objekt in horizontaler Ausrichtung zwischen Geber und Nehmer übergeben wurde. Sie konnten zeigen, dass eine typische Objektübergabe im Durchschnitt etwa 500 ms dauert. Endo et al. (2012) berichten für ein Objekt von 150 g in horizontaler Ausrichtung eine physische Übergabezeit von $323,1 \text{ ms} \pm 24,1 \text{ ms}$ vom ersten Kontakt des Nehmers mit dem Objekt bis zum vollständigen Loslassen des Gebers. Brand et al. (2022) vergleichen Solo- mit Partnerübergaben, mit einem 450 g schweren Übergabeobjekt in vertikaler Ausrichtung, und berichten für Soloübergaben eine physische Übergabezeit von $352,76 \text{ ms} \pm 71,51 \text{ ms}$, während für Partnerübergaben $515,08 \text{ ms} \pm 87,22 \text{ ms}$ benötigt werden. Döhning et al. (2020) berichten eine Übergabezeit von $643 \text{ ms} \pm 71 \text{ ms}$ für ein Objekt mit einem Gewicht von 1800 g, das in vertikaler Ausrichtung übergeben wurde.

Eine zusammenfassende Betrachtung der diskutierten Literatur zeigt, dass die Übergabezeiten höher liegen als die in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Werte. In den diskutierten Studien wurden speziell für die Studien entwickelte Objekte für die Übergaben eingesetzt (siehe Tabelle 2). Der Schwerpunkt dieser Objekte lag auf der integrierten Sensorik. Bei der Übergabe von Objekten mit spezieller integrierter Sensorik wird bei näherer

Betrachtung der Objekte deutlich, dass die Formgebung der Objekte einen definierten Griff der Versuchspersonen erfordert. Durch die höheren Präzisionsanforderungen an den Griff bzw. die unnatürlichere Griffwahl im Vergleich zu Alltagsgegenständen kann eine Erhöhung der Übergabezeit erklärt werden. Die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Becher konnten einfacher gegriffen werden, da die Form der Becher der Form der geöffneten Hand der Versuchspersonen entsprach.

Die Form der Objekte in den genannten Studien sowie die Art und Weise, wie diese von den Versuchspersonen gegriffen werden müssen, sind nur bedingt mit Alltagsgegenständen vergleichbar. Werte wie Übergabezeiten oder Übergabegeschwindigkeiten aus diesen Studien sind als Benchmark für Roboter-Mensch oder Mensch-Roboter Übergaben nur bedingt für die Bewertung von Übergaben von Alltagsgegenständen geeignet. Dementsprechend müssen Leistungsparameter wie die Übergabezeit und auch die Objektführung immer in Abhängigkeit von den Eigenschaften des zu übergebenden Objekts und der daraus resultierenden Handhabung betrachtet werden.

4.5.2 Einfluss der Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers

Die Manipulation der visuellen und auditiven Wahrnehmung der Nehmerperson führt bei einer Becherfüllung von 50 % zu signifikant höheren Übergabezeiten von $567 \text{ ms} \pm 142 \text{ ms}$ (ohne Manipulation: $244 \text{ ms} \pm 96 \text{ ms}$). Bei einer Becherfüllung von 90 % erhöhen sich die Übergabezeiten durch Manipulation der Wahrnehmung der Nehmerperson ebenfalls signifikant auf $734 \text{ ms} \pm 192 \text{ ms}$ (ohne Manipulation: $375 \text{ ms} \pm 117 \text{ ms}$). Die Objektführung verringert sich bei einer Becherfüllung von 90 % durch die Manipulation der Wahrnehmung des Nehmers signifikant auf $33 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ (ohne Manipulation $46 \text{ mm} \pm 18 \text{ mm}$). Bei einer Becherfüllung von 50 % führt die Manipulation der visuellen und auditiven Wahrnehmung der Nehmerperson zu keiner signifikant kürzeren Objektführung mit $30 \text{ mm} \pm 11 \text{ mm}$ (ohne Manipulation: $38 \text{ mm} \pm 21 \text{ mm}$).

Die Erhöhung der Übergabezeit durch Manipulation der Wahrnehmung steht im Einklang mit den Ergebnissen von Endo et al. (2012) in deren Untersuchung das haptische Feedback des Nehmers durch einen Handschuh manipuliert wurde und zu einer signifikanten Erhöhung der Übergabezeit von $323,1 \text{ ms} \pm 24,1 \text{ ms}$ auf $334,3 \text{ ms} \pm 26,3 \text{ ms}$ führte. Die Ergebnisse der Untersuchung von Döhring et al. (2020) bestätigen die Zunahme der Übergabezeit durch Manipulation der taktilen Rückmeldung. Der Einsatz eines Handschuhs zur Manipulation führt bei ihrer Untersuchung zu einer Erhöhung der Übergabezeit von $643 \text{ ms} \pm 71 \text{ ms}$ ohne Manipulation auf $712 \text{ ms} \pm 112 \text{ ms}$. Zusätzlich zeigen Döhring et al. (2020), dass die Manipulation der visuellen Rückmeldung ohne taktile Manipulation zu einer Erhöhung der Übergabezeit auf $796 \text{ ms} \pm 141 \text{ ms}$ führt. Die Kombination aus taktile sowie visueller Manipulation führt zu den höchsten Übergabezeiten von $885 \text{ ms} \pm 132 \text{ ms}$.

Unter normalen Bedingungen und ohne Wahrnehmungseinschränkung der Nehmerperson kann die gemeinsame Handlung der physischen Übergabe als Zusammenspiel von antizipatorischer Kontrolle und somatosensorischer Feedback-Kontrolle verstanden werden (Mason & Mackenzie, 2005). Controzzi et al. (2018) zeigen in ihrer Untersuchung, dass Geber, die sowohl über visuellen als auch über taktilen Input verfügen, eine prädiktive Steuerung ausschließlich auf der Basis des Sehvermögens nutzen, um die Übergabe auszulösen. Außerdem zeigen Controzzi et al. (2018), dass visuelles Feedback die antizipatorische Kontrolle beim Loslassen des Objekts ergänzt, indem es die durch die Hand des Nehmers erzeugte Kollision mit dem Objekt vorhersagt und erkennt (Controzzi et al., 2018). Bei eingeschränkter visueller und auditiver Wahrnehmung des Nehmers lässt sich die Übergabeposition nicht anhand der Bewegungskinetik vorhersagen. Entsprechend ist der Nehmer nicht in der Lage seine Hand dem Übergabeobjekt entgegenzustrecken, wodurch sich die kürzere Objektführung erklären lässt. Durch Einschränkungen der visuellen und auditiven Informationsverarbeitung des Nehmers, kann nahezu ausgeschlossen werden, dass der Nehmer eine Objektkollision oder den Übergabeort prädiziert, da keine Informationen dazu verarbeitet werden können. Das Fehlen des visuellen Feedbacks des Nehmers führt zu größeren Unsicherheiten, da dieser sich nur noch auf sein taktiles

Feedback verlassen kann. Da die Modulation der eingesetzten Greifkraft von den Eigenschaften des Objekts abhängt, muss die eingesetzte Greifkraft ohne visuelles Feedback allein auf Basis des taktilen Feedbacks kontrolliert werden. Bei den vorliegenden Objektübergaben kann das Verhalten nach Kawai et al. (2001) im Sinne einer „Worst-Case Prediction“ erklärt werden. Kawai et al. (2001) konnten zeigen, dass die Strategie einer Person für den Krafteinsatz beim Heben eines Objekts von visuellen Hinweisen abhängt. Bei verdeckter Sicht wendeten die Versuchspersonen eher eine maximale Kraft an, um im Zweifelsfall den sichersten Griff für alle möglichen Fälle zu gewährleisten. Die Manipulation der visuellen und auditiven Wahrnehmung des Nehmers führt nicht nur zu größeren Unsicherheiten auf Seiten des Nehmers, sondern auch auf Seiten des Gebers. Durch die Einschränkung der visuellen und auditiven Kanäle der Nehmerperson werden auch die Kommunikationskanäle der Nehmerperson und damit der Informationsaustausch zwischen Nehmer und Geber eingeschränkt. Der Geber muss sich auf sein visuelles und haptisches Feedback verlassen, ohne sein Handeln durch subtile Signale, die vom Nehmer ausgehen, ergänzen zu können. Im Falle der visuellen und auditiven Einschränkung des Nehmers, ist dieser nicht mehr in der Lage die Effizienz der Übergabe (Chan et al., 2012; Mason & Mackenzie, 2005) so zu modulieren, wie dies bei visuellem Feedback der Fall ist.

4.5.3 Limitationen

Die Untersuchung wurde mit Studierenden und Mitarbeitenden des KIT durchgeführt, die keine Einschränkungen der Bewegungsantizipation oder andere motorische oder kognitive Einschränkungen aufwiesen. Die Manipulation der Wahrnehmung diente dazu, Daten zu generieren, die erste Hinweise darauf geben, was aus Sicht der Robotik zu erwarten ist, wenn es um die Interaktion mit Menschen mit motorischen und/oder kognitiven Einschränkungen geht. Ein besseres Verständnis des Einflusses von kognitiven und motorischen Einschränkungen könnte durch eine Stichprobe mit explizit eingeschränkten Personen erreicht werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde die räumliche Distanz zwischen der Hand des Gebers, der Hand des Nehmers und dem Becher verwendet, um die Phase der physischen Übergabe

zu definieren. Die Aufzeichnung mit einem markerbasierten Motion-Tracking-System liefert diesbezüglich sehr genaue Aufzeichnungen. Objekte mit integrierten Kraftsensoren oder taktilen Sensoren wären in der Lage, zusätzliche Daten für eine detailliertere Auswertung zu liefern. Gleichzeitig schränken Übergabeobjekte mit integrierter Sensorik auch die Flexibilität des Untersuchungsaufbaus ein, da sie für die Datenaufzeichnung in der Regel kabelgebunden sind. Aufgrund des Studiendesigns kann nicht eindeutig geklärt werden, ob die Wasserfüllung der Becher oder das Übergabegewicht der Becher zur Verlängerung der Übergabezeit geführt hat. Für zukünftige Studien wäre es interessant, die physikalischen Eigenschaften der Übergabeobjekte von den Unsicherheiten zu trennen, die durch die Objekte sowohl beim Geber als auch beim Nehmer hervorgerufen werden. Dies würde zu einem besseren Verständnis der von Chan et al. (2012) vorgeschlagenen Rollenverteilung zwischen Sicherheit und Effizienz führen. Gleichzeitig wird eine klare Unterscheidung zwischen physikalischen und psychologischen Objekteigenschaften möglich.

Es konnte gezeigt werden, dass die Einschränkung der visuellen und auditiven Wahrnehmung zu einer Zunahme der Übergabezeit zwischen 320 und 360 ms führt. Eine weitere Bedingung mit eingeschränkter Wahrnehmung und ohne Becherfüllung hätte dazu beigetragen zu verifizieren, ob die Verzögerung nur durch die Einschränkung der visuellen und auditiven Wahrnehmung entsteht und die Verzögerung durch die Objekteigenschaften einfach addiert werden oder ob diese beiden Verzögerungen sich auch gegenseitig beeinflussen.

4.6 Implikationen

Controzzi et al. (2018) zeigen, dass langsame Reichbewegungen des Nehmers zu längeren Übergabezeiten führen als schnelle Reichbewegungen. Wird davon ausgegangen, dass der Geber wie von Chan et al. (2012) postuliert, die Sicherheit des Objekts moduliert, während der Nehmer die Effizienz der Übergabe moduliert, dann sind die in der vorliegenden Untersuchung beobachteten längeren Übergabezeiten darauf zurückzuführen, dass der Nehmer aufgrund von Wahrnehmungseinschränkungen oder Unsicherheiten

bezüglich der Objekteigenschaften eine längere Übergabezeit in Kombination mit einer längeren Objektführung moduliert.

Die vorliegende Untersuchung hatte explizit zum Ziel, Daten zu generieren, die es ermöglichen, die Übergabezeiten eines Alltagsgegenstandes mit anderen Studien zu Mensch-Mensch, aber auch zu Roboter-Mensch Übergaben vergleichbar zu machen. Zu diesem Zweck wurde ein handelsüblicher Kunststoffbecher verwendet. Die Daten der vorliegenden Untersuchung sowie die Ergebnisse aus der diskutierten Literatur zeigen, dass die Objekteigenschaften einen großen Einfluss auf die Übergabezeit haben. Es konnten Faktoren, wie das Objektgewicht, die Objektform, die Präzisionsanforderungen an den Griff und Unsicherheiten bei der Handhabung, beim Transport und bei der Übergabe des Objekts identifiziert werden, die einen Einfluss auf die Übergabezeit bei Objektübergaben haben. Um eine verlässliche Datenbasis für die Bewertung von Roboter-Mensch Übergaben zu schaffen, wäre eine systematische Untersuchung mit standardisierten Formen und Gewichten von Alltagsgegenständen wichtig. Für zukünftige Untersuchungen wäre es wichtig, sowohl das Objektgewicht, die Objektform, die Art des Griffs des Objekts als auch eine Kategorisierung der Objektunsicherheiten in eine Datenbank einfließen zu lassen. Ergänzend zum Aufbau einer Datenbank für Objekteigenschaften und Übergabezeiten könnte es von großem Nutzen sein, Übergabeobjekte zu entwickeln, die in ihrer Form, Alltagsgegenständen entsprechen, integrierte Sensoren zur Datengenerierung nutzen und diese Daten kabellos übertragen können. Die kabellose Datenerfassung würde dazu beitragen, alltagsnahe Situationen nachstellen zu können, die gleichzeitig in markerbasierten Trackingsystemen validiert und durch zusätzliche Daten ergänzt werden können.

Es konnte gezeigt werden, dass die Übergabezeit sowohl von den Objekteigenschaften als auch von den Wahrnehmungseinschränkungen der Nehmerperson abhängt. Robotergreifer mit Kraftmesssensoren oder kapazitiven Sensoren sind in der Lage, Objektübergaben auf Basis von Sensordaten auszulösen (Mamaev et al., 2021). Während der Übergabe kann die Übergabezeit z. B. durch kapazitive Sensoren in den Greiferbacken zuverlässig erfasst werden. Die Daten über die Übergabezeit könnten in einer Feedback-

Schleife an den Roboter zurückgespielt werden, so dass das Robotersystem seine Loslassstrategie selbstständig optimieren kann. Durch die Entwicklung und Optimierung eines solchen Ansatzes könnten Robotersysteme anhand der durchgeführten Übergaben lernen, sich sowohl auf die Objekteigenschaften als auch auf die Restriktionen des Übergabepartners einzustellen. Durch den Aufbau umfangreicher Trainingsdatensätze wäre es möglich, die Lernzeit des Roboters deutlich zu verkürzen, um möglichst benutzerfreundliche Objektübergaben zu realisieren.

5 Experiment II: Optimierung von Roboter-Mensch-Übergaben: Der Einfluss von adaptiven Transportmethoden

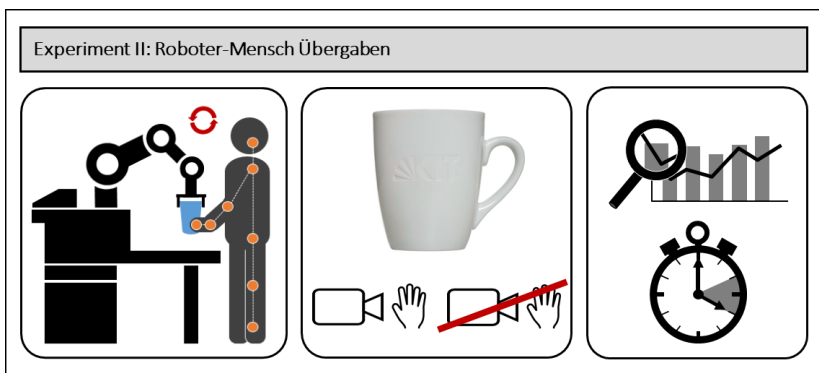


Abbildung 22: Schematischer Überblick Experiment II.

5.1 Einleitung

Wie bereits in der Einleitung angedeutet besteht eine große Herausforderung für die Robotik darin, die Anpassungsfähigkeit von Robotersystemen an den Menschen mit der Vorhersagbarkeit für den Menschen und der Anpassungsfähigkeit des Menschen in Einklang zu bringen. Ein technisches Ziel in der Robotik ist es, Objektübergaben so angepasst an den Menschen wie möglich zu realisieren. Robotersysteme auf aktuellem Stand sind in der Lage, durch Motion-Tracking, menschliche Bewegungen zu erkennen, diesen zu folgen und Objektübergaben an die menschlichen Bewegungen anzupassen. Gleichzeitig bieten die Prozesse des Motorisches Lernens dem Menschen die Fähigkeit sich an seine Umgebung anzupassen. Entsprechend ist der Mensch

in der Lage sich an die Gegebenheiten eines technischen Geräts, wie eines Roboters, anzupassen. Weist ein Roboter ein konsistentes, gut vorhersagbares Verhalten auf, sollten Menschen in der Lage sein, sich dem Roboterverhalten anzupassen. Wenn der Roboter seine Bewegungen an den Menschen anpasst, kann dies dazu führen, dass der Roboter an Vorhersagbarkeit für den Menschen verliert, was wiederum die Anpassungsfähigkeit des Menschen an den Roboter einschränkt.

Die Übergabe eines Objekts ist durch komplexe kognitive und motorische Prozesse gekennzeichnet, die es Menschen ermöglichen, ihre Handlungen in Interaktion mit anderen Menschen zu koordinieren (Ortenzi et al., 2021). Menschen verwenden Sprache, Blickverhalten, Körperbewegungen sowie Hand- und Armhaltungen, um ihre Absicht, etwas zu übergeben, sowie wann und wo dies geschehen soll, zu kommunizieren (Ortenzi et al., 2021; Strabala et al., 2013). Die Was-Komponente bezieht sich darauf, welche Art von Handlung der Interaktionspartner ausführen wird und welche Intentionen er hat. Die Wann-Komponente hingegen ist für die zeitliche Koordination relevant. Informationen darüber, wann die andere Person eine Handlung ausführen wird und wie lange diese dauern wird, tragen zu einem flüssigen und genauen Timing bei. Für die räumliche Koordination in einem gemeinsamen Handlungsraum ist es wichtig, Vorhersagen darüber treffen zu können, wo sich die andere Person sowie die Objekte, mit denen sie hantiert, in einer zukünftigen Position befinden werden (Sebanz & Knoblich, 2009). Nach Castiello (2003) setzt eine erfolgreiche Zusammenarbeit voraus, dass die Handlungen und Absichten der beteiligten Personen verstanden werden. Darüber hinaus ist es notwendig, die Handlungen der Interaktionspartner im eigenen Handeln zu berücksichtigen, um eine gemeinsame Abstimmung zu gewährleisten (Glasauer et al., 2010). Dabei einigen sich die Partner auf verschiedene Rahmenbedingungen und Aspekte der Umsetzung. Diese können explizit durch verbale Kommunikation oder indirekt und adaptiv im Verlauf der Interaktion durch nonverbale Kommunikation vereinbart werden (Huber et al. 2008). Kommunikative Signale ermöglichen es Menschen, Vorhersagen über die Handlungen anderer zu treffen. Vorhersagen erleichtern die Koordination zwischen den Interaktionspartnern (Belhassen et al., 2022; Strabala et al., 2012; Strabala et al., 2013). Wäre der Mensch nur

reaktiv, könnte er nicht die flüssige und schnelle Koordination erreichen, die für viele kollaborative Aktivitäten erforderlich ist (Sebanz & Knoblich, 2009).

Gegenwärtig gibt es mehrere Theorien und Modelle, die die gegenseitige Anpassung gemeinsamer Handlungen erklären (Knoblich et al., 2011; Sebanz et al., 2006; Vesper et al., 2010). Im Zentrum der Anpassung an einen menschlichen Partner steht die Vorhersagbarkeit der Handlungen des Partners. Im Gegensatz zu selbstinduzierten Handlungen, wie z. B. einer einfachen Objektmanipulation, stellen Objektübergaben von Mensch zu Mensch nur bedingt vorhersagbare Aufgaben dar, da der Mensch keine genaue Kenntnis über das zukünftige Bewegungsverhalten des Partners hat (Brand et al., 2022). Die sensorischen Auswirkungen der eigenen Handlungen können in den meisten Fällen gut antizipiert werden, da die zugrundeliegenden Prozesse der Bewegungskontrolle für diese Vorhersage zur Verfügung stehen (Wolpert & Ghahramani, 2000) oder sogar als solche repräsentiert sind (Hommel, 2009, 2019; Prinz, 1997). Menschen verfügen über ein grundlegendes internes Modell des Körpers einer anderen Person und können dessen aktuellen Zustand anhand visueller Informationen einschätzen (Mason & Mackenzie, 2005), dennoch ist die Vorhersagbarkeit von Bewegungen begrenzt, da keine Informationen über die motorischen Befehle der anderen Person verfügbar sind (Blakemore & Decety, 2001). Da die Handlungskontrollprozesse anderer Menschen nicht zugänglich sind, besteht die Herausforderung darin, die Handlungen anderer vorherzusagen und die eigenen Handlungen darauf abzustimmen, obwohl der Mensch selbst keinen direkten Zugang zur Handlungskontrolle anderer Menschen hat (Vesper, 2020). Das bedeutet, dass Vorhersagen auf den beobachtbaren Bewegungen anderer Menschen basieren müssen (Vesper, 2020; Wilson & Knoblich, 2005; Wolpert et al., 2003), was sie möglicherweise weniger genau macht als die Antizipation der eigenen sensorischen Handlungseffekte. Die umfangreiche Übung, die Menschen im Laufe ihres Lebens durchlaufen, könnte es ihnen ermöglichen, das Verhalten ihrer Interaktionspartner auf der Grundlage der Kenntnis seiner Situation vorherzusagen (Aglioti et al., 2008; Ikegami & Ganesh, 2017).

Brand et al. (2022) gehen davon aus, dass die motorische Kontrolle bei der Übergabe von Objekten ein etabliertes System von Feedforward- und Feedback-Mechanismen beinhaltet, die implizit innerhalb der Dyade zweier interagierender Individuen geteilt wird. Wenn dies möglich ist, könnten Menschen ihre eigene Kontrolle vorausschauend auf der Grundlage des aktuellen Zustands ihres Partners anpassen.

Bei der Übergabe von Objekten zwischen Roboter und Mensch stehen dem menschlichen Partner keine internen Modelle zur Verfügung, um das Verhalten des Roboters vorherzusagen. Daher muss der menschliche Partner sein Verhalten auf Grundlage der Überwachung der Handlungen des Roboters planen und anpassen, um eine schnelle und zuverlässige Objektübergabe zu gewährleisten. Abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade eines Roboters ist es für den Nutzer schwierig bis nahezu unmöglich, den Ort der Übergabe auf der Grundlage der potenziellen Kinematik des Roboters abzuschätzen. In den motorischen Neurowissenschaften wird der Prozess der motorischen Adaptation als ein Prozess beschrieben, bei dem das motorische System auf Veränderungen im Körper und/oder in der Umgebung reagiert, um beherrschte Fertigkeiten an die neuen Bedingungen anzupassen (Krakauer & Mazzoni, 2011). Um sich an einen Roboter anzupassen, muss der Mensch eine Vorhersage treffen, die auf bestimmten Eigenschaften des Roboters basiert. Die Vorhersagbarkeit der Trajektorie und der Zielposition des Roboters können als geeignete Informationsquellen für Übergaben betrachtet werden. Bei Übergaben, die bei jeder Übergabe neu geplant werden, um sich an die Position der Hand des menschlichen Partners anzupassen (Ortenzi et al., 2021), wird diese Vorhersage schwieriger sein als bei Übergaben, die immer zur gleichen Übergabeposition auf der gleichen Trajektorie navigieren. Nach Sebanz und Knoblich (2009) muss die physische Übergabe aufgrund der schlechteren Vorhersagbarkeit der Bewegungstrajektorie deutlich reaktiver sein, was zur Folge hat, dass Menschen nicht in der Lage sind, eine so flüssige und schnelle Handlungskoordination zu realisieren.

Ortenzi et al. (2021) unterteilen die Übergabe in Übereinstimmung mit Mason und Mackenzie (2005) in eine Vorübergabephase und eine physische Übergabe. Die Vorübergabephase umfasst die explizite und implizite Kom-

munikation zwischen den beteiligten Partnern sowie das Greifen und Transportieren des Objektes durch den Geber. Die physische Übergabe beginnt mit dem ersten Kontakt der Hand des Nehmers mit dem Objekt. Sie ist abgeschlossen, wenn der Geber seine Hand vom Objekt entfernt und das Objekt vollständig in der Hand des Nehmers ist. Um das menschliche Verhalten bei einer Objektübergabe besser zu verstehen, wird die von Ortenzi et al. (2021) vorgestellte Phaseneinteilung um einen weiteren Aspekt ergänzt. Dabei werden dem Geber und dem Nehmer für jede Handlung in der jeweiligen Phase ein aktives und ein passives Attribut zugewiesen (Abbildung 23). Diese Beschreibung soll verdeutlichen, dass sich der Nehmer an zwei zentralen Stellen der Objektübergabe aktiv verhält. Erstens, indem er aktiv den Wunsch äußert, ein bestimmtes Objekt übergeben zu bekommen (1.2), und zweitens, indem er aktiv nach dem Objekt greift, um die physische Interaktion einzuleiten (2.2). Basierend auf diesen Erklärungen wird angenommen, dass eine hoch adaptive Übergabe, bei der das zu übergebende Objekt absichtlich in Richtung der Hand des Nehmers bewegt wird, den Nehmer in eine passive Rolle des Wartens zwingt, anstatt in eine aktive Rolle des Greifens nach dem Objekt. Dies kann dazu führen, dass die endgültige Entscheidung, das Objekt zu ergreifen, nicht mehr vom Initiator der eigentlichen Übergabehandlung getroffen wird, was zu einer Verschlechterung der Übergabeleistung in Bezug auf Geschwindigkeit, Flüssigkeit und subjektive Wahrnehmung führen kann.











1 Vorübergabephase				2 Physische Übergabe					
									
1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	
Inaktivität	Anfrage nach Objekt	Transport des Objekts	Warten & Beobachten	Objekt zur Übergabeposition reichen	Warten Absicht zeigen, das Objekt entgegen zu nehmen	Stabilisierung des Objekts	Greifen des Objekts	Loslassen des Objekts	Halten des Objekts
Passiv	Aktiv	Aktiv	Passiv	Aktiv	Passiv (Aktiv)	(Aktiv) Passiv	Aktiv	Aktiv	Aktiv

Abbildung 23: Ergänzung der Phaseneinteilung von Mensch-Mensch Objektübergaben durch die Attribute "aktiv" und "passiv" (mod. nach Ortenzi et al. (2021)).

Derzeit ist unklar, welche Auswirkungen es hat, wenn ein Roboter versucht, sich an den Menschen anzupassen, während der Mensch versucht, sich an den Roboter anzupassen. Das Hauptziel dieses Experiments ist es, ein besseres Verständnis darüber zu erlangen, ob Übergaben, die an die menschliche Hand angepasst sind, zu einer höheren Gesamtübergabeleistung führen als Übergaben mit einer festen Zielposition des Roboters, oder umgekehrt. Bei der Übergabe von Objekten zwischen Roboter und Mensch ist es wichtig zu verstehen, dass die Gesamtleistung der Übergabe das Ergebnis der Interaktion zwischen Roboter und Mensch ist. Ausgehend von der Annahme einer schlechteren Vorhersagbarkeit der Trajektorie und der Zielposition bei der adaptiven Transportmethode wird zunächst erwartet, dass die adaptive Transportmethode zu höheren physischen Übergabezeiten führt als die nicht-adaptive Transportmethode. Zweitens wird erwartet, dass die nicht-adaptive Transportmethode zu vorzeitigeren Übergabe-Interventionen führt, bevor der Roboter seine Zielposition erreicht, als die adaptive Transportmethode. Drittens wird erwartet, dass die adaptive Transportmethode zu einer geringeren subjektiven Bewertung der Übergabe führt als die nicht-adaptive Transportmethode. Darüber hinaus gibt es bisher keine Studien, die die Übergabe zwischen Roboter und Mensch in mehreren Durchgängen unter gleichen Bedingungen und mit einer hohen Anzahl von Wiederholungen durchgeführt haben. Es kann davon ausgegangen werden, dass die meisten Studien im Bereich der Roboter-Mensch- oder Mensch-Roboter-Übergabe mit zu wenigen Wiederholungen und zu wenigen Durchgängen durchgeführt wurden, um

aussagekräftige Ergebnisse für die Bewertung des menschlichen Verhaltens oder gar für die Bewertung von Robotersystemen zu liefern (Aleotti et al., 2012; Basili et al., 2009; Becchio et al., 2008; Dehais et al., 2011; Huber et al., 2008; Pan et al., 2018). Daher wird davon ausgegangen, dass sich die Anpassung der Versuchspersonen an die Übergabeaufgabe und den Roboter im Laufe der Zeit in allen abhängigen Variablen widerspiegelt. Des Weiteren wird angenommen, dass die physische Übergabezeit im Verlauf der Durchgänge abnimmt, dass im Verlauf der Durchgänge frühzeitiger in die Übergabe eingegriffen wird und dass sich die subjektiven Bewertungen entweder verbessern oder verschlechtern.

Um diese Annahmen zu prüfen wurde ein Experiment mit zwei Versuchsgruppen durchgeführt. Eine Versuchsgruppe führte Übergaben mit der adaptiven Transportmethode durch, die andere Versuchsgruppe führte Übergaben mit der nicht-adaptiven Transportmethode durch. Zur Bewertung der Übergabeleistung werden die physische Übergabezeit, die vorzeitige Übergabe-Intervention, bevor der Roboter seine Zielposition erreicht, und die subjektive Wahrnehmung der Versuchspersonen verglichen (Abbildung 22).

5.2 Ziele Experiment II

Die Ziele von Experiment II sind es,

- a) zu untersuchen, ob eine adaptive, an die Hand des Menschen angepasste, Transportmethode zu höheren physischen Übergabezeiten führt als eine nicht-adaptive Transportmethode mit vordefiniertem Zielpunkt,
- b) zu untersuchen, ob die nicht-adaptive Transportmethode zu vorzeitigeren Übergabe-Interventionen führt, bevor der Roboter seine Zielposition erreicht, als die adaptive Transportmethode,
- c) zu untersuchen, ob die adaptive Transportmethode zu schlechteren subjektiven Bewertungen der Objektübergaben führt als die nicht-adaptive Transportmethode,
- d) zu untersuchen, ob die physische Übergabezeit im Verlauf der Durchgänge abnimmt, ob im Verlauf der Durchgänge vorzeitiger in die Transportbewegung des Roboters eingegriffen wird und ob sich

die subjektiven Bewertungen im Verlauf der Durchgänge entweder verbessern oder verschlechtern.

5.3 Material und Methoden

5.3.1 Versuchsaufbau

Der technische Aufbau des Experiments besteht aus einem Tisch, auf dem ein kollaborativer Roboter (Modell Panda von Franka Emika) montiert ist. Der Roboter hat 7 Freiheitsgrade und eine Nutzlast von 3 kg. Am Endeffektor des Roboters sind ein 2-Backen-Greifer und eine Intel RealSense RGB D-Kamera angebracht. In den Greiferbacken sind kapazitive Näherungssensoren integriert. Im Experimentalaufbau wird ein Geschwindigkeitsregler mit Hilfe der kartesischen Franka-Geschwindigkeitsschnittstelle innerhalb des ROS-Frameworks implementiert. Der Regler verwendet einen 6D-Positionsvektor als Eingabe. Der Geschwindigkeitsvektor wird aus dem verbleibenden Abstand zum Ziel und der aktuellen Geschwindigkeit des Roboters berechnet, wobei die Soft-Roboter-Grenzwerte berücksichtigt werden: eine maximale Geschwindigkeit von 0,7 m/s, eine maximale Beschleunigung von 6 m/s² und ein maximaler Ruck von 600 m/s³. Der Regelkreis arbeitet mit einer Frequenz von 1 kHz, so dass sich die Geschwindigkeitsregelung für den Benutzer natürlich anfühlt.

Bei der *nicht-adaptiven Steuerung* ist die Zielposition des Roboters vordefiniert, und die Trajektorie des Roboters wird bei allen Übergaben im nicht-adaptiven Modus beibehalten. Bei der *adaptiven Steuerung* wird die 6D-Position der Hand des Nehmers verfolgt und zur Aktualisierung der Position des Roboters als Ziel verwendet. Die Aktualisierungsfrequenz beträgt 30 Hz, so dass für das menschliche Auge keine merkliche Verzögerung entsteht. Für das Anhalten des Roboters stehen zwei verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung: der Hard-Stop und der Soft-Stop. Der Hard-Stop ignoriert alle Grenzwerte und führt zu einem abrupten Stopp. Diese Funktion wird nur für den Notstopp verwendet. Der Soft-Stop hingegen reduziert die Geschwindigkeit des Roboters langsam auf Null, wobei die Grenzwerte des Roboters

eingehalten werden. Diese Methode wird standardmäßig für alle Übergaben verwendet. Die implementierte Steuerung berücksichtigt auch den begrenzten Arbeitsraum des Roboters und ignoriert Zielpositionen außerhalb dieses Raums. Dies trägt dazu bei, Kollisionen mit dem Tisch und ein Überschreiten der physischen Grenzen des Roboters zu vermeiden.



Abbildung 24: Technischer Aufbau von Experiment II mit Panda-Roboterarm und Greifer von Franka Emika.

Als Übergabeobjekt wird eine Keramiktasse verwendet. Die Tasse wird zunächst in den roten Behälter auf der linken Seite des Tisches gestellt. Die Versuchspersonen stehen an einer definierten Position an der Vorderseite des Tisches (Abbildung 24). Die Position wurde so gewählt, dass der Übergabebereich sowohl für das 5. weibliche Perzentil als auch für das 95. männliche Perzentil zwischen dem bevorzugten und dem maximalen Arbeitsbereich des rechten Armes liegt (DIN EN ISO 14738). Die Versuchspersonen befinden sich in ihrer Ausgangsposition außerhalb des Greifraums des Roboters und können durch Ausstrecken des Armes in den kollaborativen Arbeitsraum

eintreten. Die physische Übergabe der Tasse erfolgt im Bereich des rechten Tischdrittels im bevorzugten rechten Arbeitsraum der Versuchspersonen.

5.3.2 Ablauf einer Objektübergabe

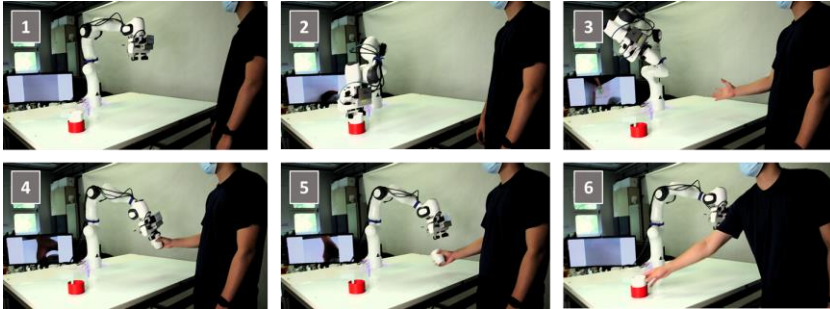


Abbildung 25: Ablauf einer Übergabe in Experiment II: (1) Ausgangsposition des Roboters, (2) Roboter ergreift den Becher, (3) Versuchsperson gibt das Signal zur Übergabe, (4) Versuchsperson ergreift den Becher, (5) Roboter lässt den Becher los, (6) Versuchsperson stellt den Becher zurück.

Zu Beginn des Übergabeexperiments befindet sich der Greifer des Franka Panda über der Mitte des Tisches (Abbildung 25). Diese Position wird als Startposition bezeichnet. Von dieser Startposition aus wird die Tasse im roten Behälter angefahren. Der nächste Schritt ist das Greifen der Tasse. Dazu fährt der Roboter zunächst in eine Position oberhalb der Tasse, öffnet den Greifer und fährt zur Tasse hinunter, bis sich die Greiferbacken auf Höhe der Tasse befinden. Wenn diese Position erreicht ist, schließen sich die Greiferbacken und die Tasse ist sicher gegriffen. Nachdem die Tasse gegriffen wurde, fährt der Roboter in die Übersichtsposition. Diese Position ist so gewählt, dass die Hand der Person von der Kamera getrackt werden kann. Zur Erkennung der Hand der Person wird Google MediaPipe Hands, ein Ansatz aus dem MediaPipe-Framework von Google Research, der maschinelles Lernen nutzt, um schnelles und robustes Hand- und Finger-Tracking zu gewährleisten, verwendet (Zhang et al., 2020).

In dieser Untersuchung wurden zwei verschiedene Transportmethoden für die Objektübergabe eingesetzt. Die beiden Transportmethoden werden als

adaptive Transportmethode und als *nicht-adaptive Transportmethode* bezeichnet. Bei der *adaptiven Transportmethode* wird der Übergabebereich zunächst nach einer Hand als Startsignal abgesucht. Die Versuchsperson kann so steuern, ob und wann der Roboter sich zu bewegen beginnt. Sobald eine Hand erkannt wird, setzt sich der Roboterarm in Bewegung, wobei die Hand als Zielpunkt angesteuert wird. Anhand der Kameradaten kann der Roboter seine Position bis zu 30 cm vor Erreichen der Hand an eine veränderte Handposition anpassen. Sobald der Abstand zur Hand weniger als 30 cm beträgt, kann die Position nicht mehr angepasst werden. Anhand der letzten Bilddaten der Hand wird die Zielposition berechnet und angefahren. Bei der *nicht-adaptiven Transportmethode* wird der Übergabebereich ebenfalls nach einer Hand abgesucht. In diesem Fall wird das Hand-Tracking nur als Startsignal für den Übergabevorgang verwendet. Sobald die Hand erkannt wird, fährt der Roboter zu seiner definierten Zielposition. Die Zielposition und der zurückgelegte Weg sind bei jeder Übergabe mit der nicht-adaptiven Transportmethode identisch. Die Zielposition wurde so gewählt, dass sie aus ergonomischer Sicht zwischen dem bevorzugten und dem maximalen Arbeitsbereich des rechten Arms der Versuchspersonen liegt. Der Roboter bewegte sich mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0,3 m/s für alle Bewegungen.

Um einen festen Griff der Versuchspersonen zu erkennen, wurden kapazitive Näherungssensoren (Alagi et al., 2016) eingesetzt. Diese Sensoren wurden in die Greiferbacken des Roboters integriert. Zur Erkennung des Griffs wurde ein Schwellenwert definiert, der überschritten werden muss, damit der Greifer die Tasse freigibt (Mamaev et al., 2021). Gleichzeitig mit dem Öffnen des Greifers fährt der Roboter 10 cm nach oben, um den Versuchspersonen mehr Platz zum Greifen der Tasse zu geben. Bei beiden Transportmethoden können die Versuchspersonen warten, bis der Roboter seine Zielposition erreicht hat, und dann die Tasse greifen, oder sie können die Tasse greifen, während sich der Roboter noch auf seine Zielposition zubewegt. Nachdem die Versuchspersonen die Tasse erfolgreich entgegengenommen haben, stellen sie sie zurück in den roten Behälter. Gleichzeitig fährt der Roboter, nachdem er die Tasse losgelassen hat, zurück zum roten Behäl-

ter, um die Tasse erneut aufzunehmen. Die nächste Übergabe beginnt wieder mit dem Greifen der Tasse durch den Roboter.

5.3.3 Stichprobe

An der Untersuchung nahmen 40 Studierende und Mitarbeitende des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) teil (Alter: $26,33 \pm 5,21$ Jahre; 25 Männer). Sieben Versuchspersonen hatten bereits Erfahrung mit Robotern und wurden gleichmäßig auf die beiden Versuchsgruppen verteilt. Alle Versuchspersonen waren Rechtshänder und führten das Experiment mit der rechten Hand durch. Alle Versuchspersonen nahmen freiwillig an der Studie teil und wurden ausführlich über den Ablauf der Studie, ihre Rechte und die Anonymität der Daten informiert. Alle Versuchspersonen unterzeichneten eine Einverständniserklärung. Für die Teilnahme an der Studie wurde keine Aufwandsentschädigung gezahlt.

5.3.4 Versuchsablauf

Vor der Untersuchung wurden die Versuchspersonen parallelisiert in die *adaptive* und die *nicht-adaptive Versuchsgruppe* eingeteilt. Der Versuchsleiter demonstrierte allen Versuchspersonen zwei Objektübergaben, jeweils mit der zur Versuchsgruppe passenden Transportmethode, und erklärte die Übergabeaufgabe. Die technische Funktionsweise des Roboteraufbaus wurde den Versuchspersonen nicht erklärt. Die Versuchspersonen führten keinen Testversuch durch und begannen direkt mit dem ersten Durchgang der Übergabe.

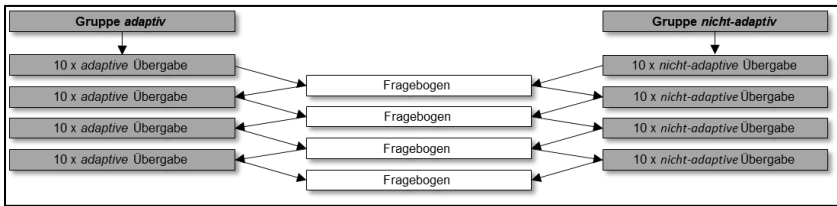


Abbildung 26: Studiendesign Experiment II.

Abbildung 26 gibt einen Überblick über das Studiendesign. Für die Versuchspersonen bestand ein Durchgang aus zehn aufeinanderfolgenden Übergaben. Nach den zehn Übergaben gingen die Versuchspersonen zu einem separaten Computer und beantworteten fünf Fragen zu ihrer subjektiven Wahrnehmung. Die Fragen des Fragebogens konnten auf einer 5-stufigen Likert-Skala beantwortet werden und lauteten wie folgt:

- *Haben Sie die Übergabe als flüssig empfunden?*
- *Konnten Sie das Objekt leicht vom Roboter entgegennehmen?*
- *Haben Sie Vertrauen in den Roboter, dass er das Richtige tut?*
- *Haben Sie sich während der Übergabe sicher gefühlt?*
- *Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit der Übergabe?*

Nach der Beantwortung der Fragen kehrten die Versuchspersonen zum Robotertisch zurück und absolvierten den nächsten Durchgang. Beide Versuchsgruppen führten in jedem der vier Durchgänge zehn Übergaben mit der gleichen Transportmethode durch. Die Pause zwischen den Durchgängen betrug ca. 1 Minute. Auf diese Weise absolvierte jede Versuchsperson insgesamt vier Durchgänge. Somit hat jede Versuchsperson insgesamt 40 Übergaben durchgeführt und die fünf Fragen insgesamt viermal beantwortet. Die Gesamtzeit pro Versuchsperson betrug ca. 40 Minuten.

5.3.5 Datenverarbeitung und Statistik

Um die Übergabeleistung zu untersuchen, wird der Einfluss der Transportmethode als unabhängige Variable auf die *physische Übergabezeit*, die *vorzeiti-*

ge *Übergabe-Intervention* und die *subjektive Wahrnehmung* der Versuchspersonen als abhängige Variablen zu mehreren Zeitpunkten untersucht. Die *physische Übergabezeit* wird von den kapazitiven Näherungssensoren des Roboters gemessen und ist definiert als die Zeit zwischen dem ersten physischen Kontakt der Versuchsperson mit dem Übergabeobjekt und dem Überschreiten des Schwellenwerts, der die Freigabe der Tasse bewirkt. Die physische Übergabezeit wird in Sekunden angegeben. Für die deskriptive Darstellung der Daten zur physischen Übergabezeit wurden die Daten zunächst auf Ausreißer untersucht. Werte $> 0,5$ s wurden als Ausreißer definiert. Auf Basis der Ausreißeranalyse wurden sechs Klassen mit einem Abstand von $0,1$ s von $< 0,1$ s bis $> 0,5$ s gebildet. Die abgeschlossenen Übergaben wurden anhand ihrer physischen Übergabezeiten den definierten Klassen zugeordnet und als prozentualer Anteil an allen abgeschlossenen Übergaben in der jeweiligen Versuchsgruppe dargestellt. Die Veränderungen der prozentualen Anteile der Übergaben im Verlauf der vier Durchgänge werden zusätzlich analysiert und nach den definierten Klassen differenziert. Die *vorzeitige Übergabe-Intervention* ist definiert als der Differenzvektor zwischen dem Koordinatenpunkt der Übersichtsposition (Overview point) des Roboters und dem Koordinatenpunkt der von der Versuchsperson ausgelösten Objektfreigabe (Release point) im dreidimensionalen Raum:

O_p = Overview point; R_p = Release point

$$premature\ handover = |\vec{O_p} - \vec{R_p}| = \begin{pmatrix} Op_x \\ Op_y \\ Op_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Rp_x \\ Rp_y \\ Rp_z \end{pmatrix}$$

Je niedriger der Wert in cm, desto näher wurde das Objekt an der Übersichtsposition des Roboters gegriffen und desto früher greifen die Teilnehmer in die Transportbewegung des Roboters ein.

Um zu prüfen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (adaptiv, nicht-adaptiv) und den Durchgängen (1-4) in Bezug auf die *physische Übergabezeit* und die *vorzeitige Übergabe-Intervention* gibt, wurden Varianzanalysen in Form einer zweifaktoriellen gemischten ANOVA durchgeführt. Die Daten sind nicht alle normalverteilt. Da die ANOVA jedoch als

robust gegenüber einer Verletzung der Normalverteilung gilt, wenn die Stichprobengrößen gleich sind, wird sie für diese Studie als geeignet angesehen (Field et al., 2014; Schmider et al., 2010; Wilcox, 2012). Auf die ANOVA folgen Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur. Das Signifikanzniveau wird a priori auf $p = 0,05$ festgelegt. Die Effektgröße wird durch eta zum Quadrat (η^2) angegeben. Bei Verletzung der Sphärizität wurden die Freiheitsgrade mittels Greenhouse-Geisser-Korrektur angepasst. Zur Untersuchung der *subjektiven Wahrnehmung* der Übergaben durch die Versuchspersonen wurden die Daten der beantworteten Fragebögen verwendet. Um die Unterschiede zwischen den verschiedenen Transportmethoden zu quantifizieren, wurden die Daten zunächst deskriptiv aufbereitet und grafisch dargestellt. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse wurden paarweise Vergleiche der Durchgänge 1-4 mit dem Wilcoxon-Test berechnet. Die Gruppenunterschiede in jedem Durchgang wurden mit dem Mann-Whitney-U-Test berechnet. Die Effektgröße wird als biserielle Rangkorrelation angegeben. Das Signifikanzniveau wurde a priori auf $p = 0,05$ festgelegt.

5.4 Ergebnisse

Das Ergebniskapitel ist in drei Unterabschnitte unterteilt, die sich mit den drei Leistungsparametern: physische Übergabezeit, vorzeitige Übergabe-Intervention und subjektive Bewertung befassen. Die physische Übergabezeit wird im Hinblick auf die Unterschiede der Mittelwerte zwischen den Studiengruppen und den Durchgängen betrachtet. Es folgt eine Übersicht über die prozentualen Anteile aller Übergaben innerhalb der Klassengrenzen im Verlauf der Durchgänge. Die vorzeitige Übergabe-Intervention wird anhand der Unterschiede der Mittelwerte zwischen den Untersuchungsgruppen und den Durchgängen betrachtet. Im dritten Unterkapitel werden die Antworten auf die Fragen zum subjektiven Empfinden der Versuchspersonen dargestellt.

5.4.1 Einfluss der Transportmethode auf die physische Übergabezeit

5.4.1.1 Vergleich der Mittelwerte der physischen Übergabezeit

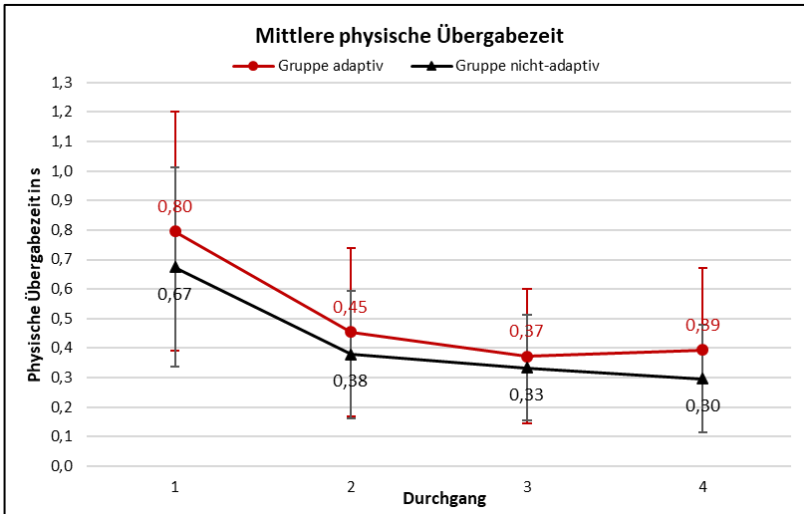


Abbildung 27: Vergleich der physischen Übergabezeiten der beiden Untersuchungsgruppen ‚adaptiv‘ und ‚nicht-adaptiv‘ im Verlauf der vier Durchgänge.

Abbildung 27 gibt einen Überblick über die Entwicklung der mittleren physischen Übergabezeiten im Verlauf der vier Durchgänge. Es besteht keine statistisch signifikante Interaktion zwischen den Durchgängen und den Gruppen ($F(3, 110) = 0,108$, $p = .959$, $\eta^2 = .001$). Es gibt keinen signifikanten Haupteffekt der Gruppen auf die physische Übergabezeit ($F(1, 38) = 1,542$, $p = .222$, $\eta^2 = .012$). Die *physische Übergabezeit* nimmt im Verlauf der Durchgänge signifikant ab ($F(3, 114) = 21,780$, $p < .001$, $\eta^2 = .014$). In der *adaptiven Gruppe* sinkt die physische Übergabezeit signifikant von 0,80 s ($\pm 0,41$ s) im ersten Durchgang auf 0,45 s ($\pm 0,29$ s) im zweiten Durchgang ($t(19) = 4,161$, $p_{\text{bonf}} = 0,002$, $d = 1,076$). In der *nicht-adaptiven Gruppe* sinkt die physische Übergabezeit ebenfalls signifikant von 0,67 s ($\pm 0,34$ s) im ersten Durchgang auf 0,38 s ($\pm 0,22$ s) im zweiten Durchgang ($t(19) = 3,900$, $p_{\text{bonf}} = 0,006$, $d = 1,008$).

Es gibt keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der *adaptiven* und der *nicht-adaptiven Gruppe*, während die mittlere physische Übergabezeit vom ersten zum zweiten Durchgang in beiden Versuchsgruppen signifikant abnimmt.

5.4.1.2 Vergleich des Anteils der Übergaben innerhalb der Klassengrenzen der physischen Übergabezeit

Bei näherer Betrachtung der Mittelwerte wird deutlich, dass die physische Übergabezeit im Verlauf der vier Durchgänge abnimmt. Gleichzeitig weisen die Mittelwerte hohe Standardabweichungen auf. Um eine differenziertere Betrachtung zu ermöglichen, wie die Verringerung der Mittelwerte zustande kommt und in welchen Bereichen die größten Veränderungen auftreten, wurden sechs Klassen definiert. Die Übergaben wurden den definierten Klassen getrennt nach Durchgängen und Untersuchungsgruppe zugeordnet. Abbildung 28 gibt einen deskriptiven Überblick über die Entwicklung des Anteils der Übergaben innerhalb der Klassen $< 0,1$ s bis $> 0,5$ s im Verlauf der vier Durchgänge. Für jede Klasse werden die Gruppenunterschiede und die Unterschiede über den Verlauf der vier Durchgänge betrachtet.

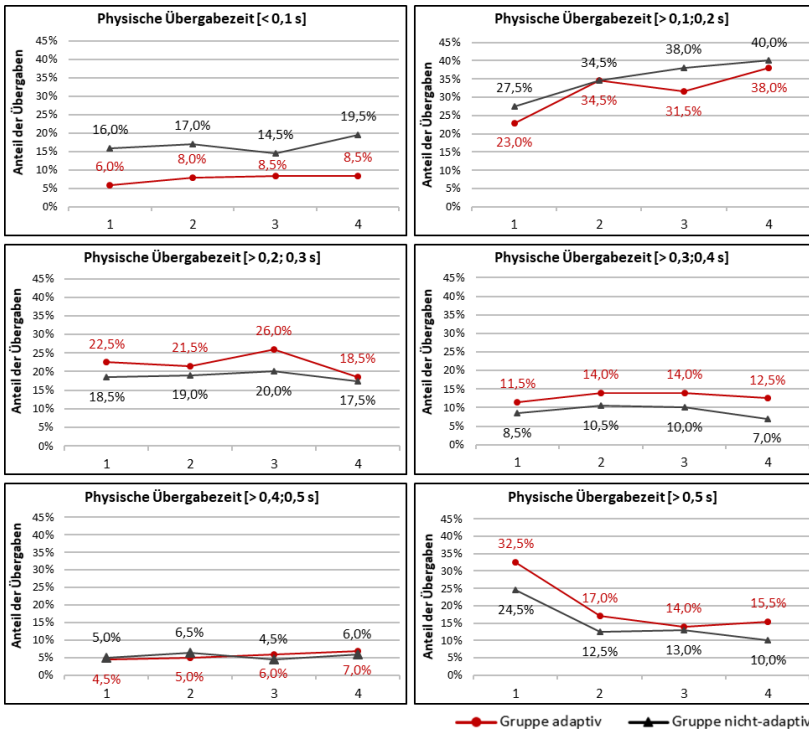


Abbildung 28: Vergleich der Prozentsätze der Übergaben beider Versuchsgruppen innerhalb der vier Durchläufe unter Verwendung der definierten Klassengrenzen der physischen Übergabezeit: < 0,5 s; > 0,1; 0,2 s; > 0,2; 0,3 s; > 0,3; 0,4 s; > 0,4; 0,5 s; > 0,5 s).

Zusammenfassend kann gezeigt werden, dass bei Übergaben < 0,1 s die *adaptive Gruppe* geringere Prozentsätze aufweist als die *nicht-adaptive Gruppe*. Bei Übergaben mit Übergabezeiten zwischen 0,1 s und 0,2 s gibt es keine großen Unterschiede zwischen den Prozentsätzen der beiden Versuchsgruppen. In beiden Versuchsgruppen nimmt der Anteil der Übergaben zwischen 0,1 s und 0,2 s im Verlauf der vier Durchgänge zu. Bei Übergaben zwischen 0,2 s und 0,3 s, 0,3 s und 0,4 s sowie > 0,5 s weist die *adaptive Gruppe* höhere Anteile auf als die *nicht-adaptive Gruppe*. Bei Übergaben > 0,5 s führt die adaptive Transportmethode zu höheren Prozentsätzen als die nicht-adaptive Transportmethode. Bei Übergaben > 0,5 s nehmen die Anteile

in beiden Versuchsgruppen in den ersten beiden Durchgängen ab. Der größte prozentuale Anstieg in beiden Untersuchungsgruppen trat bei Übergaben zwischen 0,1 s und 0,2 s auf, während der größte prozentuale Rückgang in beiden Untersuchungsgruppen bei Übergaben $> 0,5$ s auftrat.

5.4.2 Einfluss der Transportmethode auf die vorzeitige Übergabe-Intervention

5.4.2.1 Vergleich der Mittelwerte der vorzeitigen Übergabe-Intervention

Abbildung 29 zeigt die Entwicklung der Mittelwerte für die vorzeitige Übergabe-Intervention im Verlauf der vier Durchgänge. Es gibt keinen statistisch signifikanten Interaktionseffekt zwischen den Durchgängen eins bis vier und den Gruppen ($F(3,114) = 0,696$, $p = 0,556$, $\eta^2 = 0,002$). Die Effekte zwischen den Untersuchungsgruppen zeigen keine signifikanten Unterschiede ($F(1,38) = 1,010$, $p = 0,321$, $\eta^2 = 0,022$). Es gibt einen signifikanten Haupteffekt der Durchgänge mit früheren Übergabe-Interventionen im Verlauf der Durchgänge ($F(3,114) = 10,074$, $p < .001$, $\eta^2 = 0,029$). In der *nicht-adaptiven Gruppe* wird die Übergabe im Verlauf vom ersten bis zum vierten Durchgang nicht signifikant früher eingeleitet. In der *adaptiven Gruppe* wird die Übergabe signifikant früher im Verlauf vom ersten bis zum dritten Durchgang ($t(19) = 4,036$, $p_{\text{bonf}} = 0,003$, $d = 0,505$) und im Vergleich vom ersten bis zum vierten Durchgang ($t(19) = 4,137$, $p_{\text{bonf}} = 0,002$, $d = 0,517$) eingeleitet. Die *adaptive Gruppe* greift das Übergabeobjekt im ersten Durchgang 54,87 cm ($\pm 6,8$ cm) und im vierten Durchgang 51,11 cm ($\pm 7,2$ cm) von der Startposition entfernt.

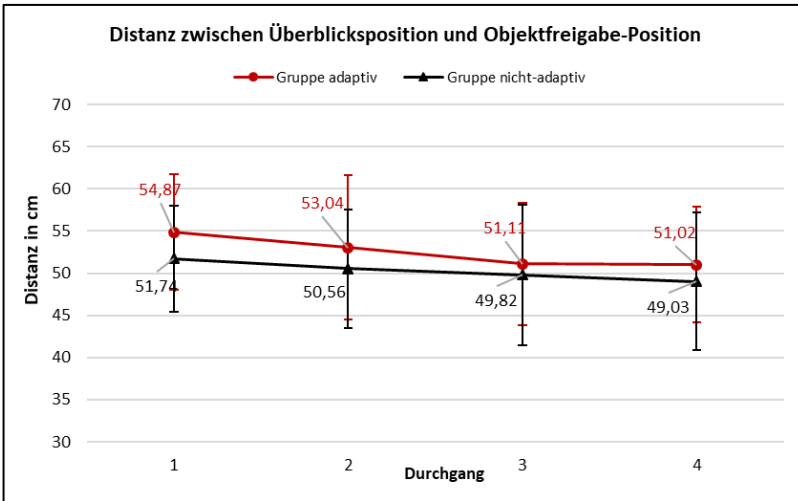


Abbildung 29: Vergleich der Mittelwerte der vorzeitigen Übergabe-Intervention, parametrisiert durch den Abstand zwischen der Übersichtsposition des Roboters und der Freigabe-Position des Objekts, der beiden Versuchsgruppen während der vier Durchgänge.

In der Versuchsgruppe mit der nicht-adaptiven Transportmethode wird das Übergabeobjekt vom ersten bis zum vierten Durchgang nicht signifikant früher gegriffen. In der Versuchsgruppe mit der adaptiven Transportmethode hingegen wird das Übergabeobjekt im dritten und vierten Durchgang signifikant früher gegriffen als im ersten Durchgang.

5.4.3 Einfluss der Transportmethode auf die subjektive Bewertung

Abbildung 30 gibt einen Überblick über die Entwicklung der subjektiven Bewertungen während der Durchgänge. Die Bewertung des *Vertrauens in den Roboter* zeigt weder für die adaptive noch für die nicht-adaptive Gruppe signifikante Unterschiede über die vier Durchgänge. Im zweiten Durchgang gibt es einen signifikanten Unterschied in der Bewertung des Vertrauens zwischen der adaptiven Gruppe ($3,9 \pm 0,85$) und der nicht-adaptiven Gruppe ($4,6 \pm 0,6$) ($W = 106,000$, $p = 0,006$, $r = -0,470$). Im dritten Durchgang gibt

es ebenfalls einen signifikanten Unterschied ($W = 102,500$, $p = 0,004$, $-0,488$) in den Vertrauensbewertungen zwischen der adaptiven ($4,0 \pm 0,6$) und der nicht-adaptiven Gruppe ($4,6 \pm 0,6$). Die Bewertung der *wahrgenommenen Sicherheit* während der Übergabe durch die adaptive Gruppe zeigt einen signifikanten Rückgang ($W = 62,000$, $p = 0,009$, $r = 0,879$) der Bewertung von $4,6 (\pm 0,6)$ im ersten Durchgang auf $4,0 (\pm 0,83)$ im zweiten Durchgang. Die Bewertung der nicht-adaptiven Gruppe zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier Durchgängen. Im zweiten Durchgang zeigen die adaptive ($4,0 \pm 0,83$) und die nicht-adaptive Gruppe ($4,7 \pm 0,47$) einen signifikanten Unterschied in der Bewertung der wahrgenommenen Sicherheit ($W = 99,000$, $p = 0,003$, $r = -0,505$). Im dritten Durchgang zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied ($W = 98,500$, $p = 0,003$, $r = -0,508$) in der Bewertung des Sicherheitsempfindens zwischen der adaptiven Gruppe ($4,1 \pm 0,6$) und der nicht-adaptiven Gruppe ($4,7 \pm 0,67$). Ein weiterer signifikanter Unterschied im Sicherheitsempfinden besteht im vierten Durchgang ($W = 125,500$, $p = 0,015$, $r = -0,373$) zwischen der adaptiven ($4,3 \pm 0,86$) und der nicht-adaptiven Gruppe ($4,9 \pm 0,37$).

Die Transportmethode zeigt einen signifikanten Einfluss auf das Vertrauen in den Roboter und das Sicherheitsempfinden während der Übergabe. Dagegen hat die Transportmethode keinen Einfluss auf die *wahrgenommene Flüssigkeit der Übergabe*, die *Leichtigkeit des Entgegennehmens* und die *allgemeine Zufriedenheit mit der Übergabe*.

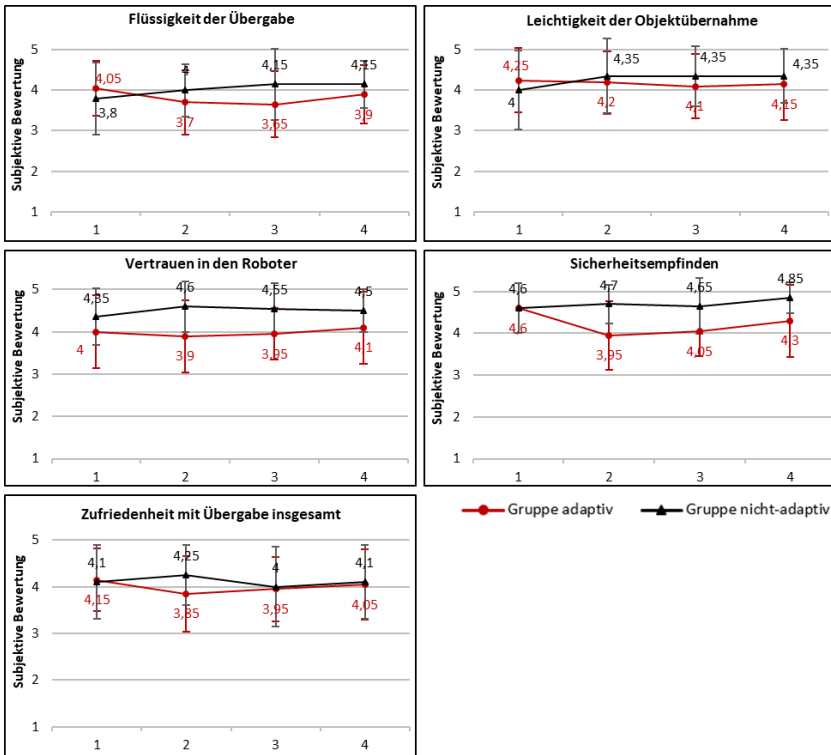


Abbildung 30: Vergleich der subjektiven Wahrnehmungen der beiden Versuchsgruppen in den vier Übergabedurchläufen. Bewertungen auf einer 5-stufigen Skala von 1: nein, überhaupt nicht; bis 5: ja, vollständig.

5.5 Diskussion

Das Hauptziel dieser Studie war es, die Übergabeleistungen von Roboter-Mensch Übergaben zu vergleichen. Dazu wurde eine an die menschliche Hand angepasste Übergabe mit einer Übergabe mit fester Zielposition verglichen. Die Studie wurde mit zwei Versuchsgruppen durchgeführt. Die adaptive Gruppe führte 4x10 Übergaben mit der adaptiven Transportmethode durch, während die nicht-adaptive Gruppe 4x10 Übergaben mit der nicht-adaptiven Transportmethode durchführte. Die physische Übergabezeit, die

vorzeitige Übergabe-Intervention und die subjektive Wahrnehmung wurden als Messgrößen für die Bewertung der Übergabe verwendet.

Die adaptive Transportmethode führt nicht zu signifikant höheren mittleren physischen Übergabezeiten als die nicht-adaptive Transportmethode. Die nicht-adaptive Transportmethode führt nicht zu einer signifikant vorzeitigeren Übergabe-Intervention als die adaptive Transportmethode. Die adaptive Transportmethode führt zu signifikant niedrigeren Bewertungen des Vertrauens und der wahrgenommenen Sicherheit als die nicht-adaptive Transportmethode. Die physische Übergabezeit nimmt bei beiden Versuchsgruppen innerhalb der ersten beiden Durchgänge signifikant ab. Die vorzeitige Übergabe-Intervention nimmt in der adaptiven Transportgruppe im Verlauf der Durchgänge signifikant zu. Die adaptive Transportgruppe zeigt einen signifikanten Rückgang der Bewertung des Sicherheitsempfindens im Verlauf der Durchgänge.

5.5.1 Einfluss der Transportmethode auf die Übergabe

Die adaptive Transportmethode führt in allen Durchgängen zu höheren mittleren physischen Übergabezeiten. Die Unterschiede zur nicht-adaptiven Transportmethode sind jedoch nicht signifikant. Die Mittelwerte beider Transportmethoden weisen hohe Standardabweichungen auf, die auf Übergaben mit sehr hohen physischen Übergabezeiten zurückzuführen sind. Eine Einteilung der Übergaben in Klassen der physischen Übergabezeit gibt einen genaueren Einblick in die Verteilung der Übergaben. Die adaptive Transportmethode führt im Vergleich zur nicht-adaptiven Transportmethode zu geringeren Anteilen bei sehr schnellen Übergaben und zu höheren Anteilen bei langsameren Übergaben. Für die vorzeitige Übergabe-Intervention gibt es keine statistischen Unterschiede zwischen der adaptiven und der nicht-adaptiven Transportmethode. Die Transportmethode hat keinen signifikanten Einfluss auf die subjektiv empfundene Flüssigkeit der Übergabe, die Leichtigkeit der Objektübernahme und die Gesamtzufriedenheit mit der Übergabe. Für die Übergabe des Objekts wurde in beiden Versuchsgruppen die gleiche Sensortechnik verwendet. Die Funktion des Greifers macht einen großen Teil des Greifens und Loslassens des Objekts aus und hat daher einen großen

Einfluss auf die Bewertung der subjektiven Parameter. Das Vertrauen in den Roboter und das Sicherheitsempfinden werden bei der adaptiven Transportmethode signifikant niedriger bewertet als bei der nicht-adaptiven Transportmethode.

Bei der adaptiven Transportmethode wird das Startsignal für die Übergabe von den Versuchspersonen gegeben, woraufhin diese den Bewegungspfad des Roboters beobachten und auf dieser Grundlage die Zielposition abschätzen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die adaptive Transportmethode mit mehr Unsicherheiten bei der Vorhersage der Zielposition des Roboters verbunden ist, was zu einem geringeren Vertrauen und Sicherheitsempfinden führt. Durch die Variation der Ausgangsposition der Hand der Versuchspersonen wird die Trajektorie des Roboters angepasst, was dazu führen kann, dass die Bewegung des Roboters für die Versuchspersonen an Vorhersagbarkeit verliert. Dies erschwert die Vorhersagbarkeit der Trajektorie und der Zielposition im Vergleich zur nicht-adaptiven Transportmethode. Bei der nicht-adaptiven Transportmethode gewöhnen sich die Versuchspersonen leichter an die gleiche Trajektorie und Zielposition, was ihnen mehr Freiheit bei der Entscheidung gibt, wann sie eingreifen und wie sie die Hand für die Übergabe halten sollen. Dies könnte eine Erklärung für das größere Vertrauen und Sicherheitsgefühl gegenüber dem Roboter sein. Andererseits könnte auch argumentiert werden, dass die Absicht des Roboters für die Versuchspersonen bei der adaptiven Transportmethode klarer ist, da der Roboter die Hand der Versuchspersonen eindeutig ansteuert, während die nicht-adaptive Transportmethode stumpf dieselbe Bewegungsbahn mit derselben Zielposition verfolgt. Das frühere Eingreifen der adaptiven Gruppe in die Transportbewegung im Verlauf der Durchgänge könnte durch ein größeres Vertrauen in den Roboter erklärt werden. Dem widerspricht jedoch das deutlich geringer bewertete Vertrauens- und Sicherheitsempfinden.

5.5.2 Anpassung an den Roboter im Verlauf der Durchgänge

Ein genauerer Blick auf die Studien, die im Bereich der Mensch-Mensch-, Roboter-Mensch- und Mensch-Roboter-Übergaben durchgeführt wurden, zeigt, dass sie entweder kleine Stichprobengrößen aufweisen, nur eine geringe Anzahl an Übergabewiederholungen durchgeführt haben oder beides in Kombination (Aleotti et al., 2012; Basili et al., 2009; Becchio et al., 2008; Dehais et al., 2011; Huber et al., 2008; Pan et al., 2018). Je nach Zielsetzung der Studie waren die kleinen Stichprobengrößen und die geringe Anzahl an Wiederholungen ausreichend, um die jeweilige Forschungsfrage zu beantworten bzw. die jeweilige technische Entwicklung zu bewerten und voranzutreiben. In Übereinstimmung mit Leichtmann et al. (2022) besteht ein großes Potenzial darin, Studien mit größeren Stichprobengrößen und auch höheren Wiederholungszahlen durchzuführen, um mehr Details des menschlichen Verhaltens in der Kooperation mit Robotern aufzudecken und für die weitere Forschung und Entwicklung nutzbar zu machen.

Durch die vier Durchgänge mit jeweils zehn Übergaben konnte gezeigt werden, dass bei beiden Transportmethoden die mittlere physische Übergabezeit vom ersten zum zweiten Durchgang deutlich reduziert wird. Der Anteil der Übergaben mit einer Übergabezeit zwischen 0,1 s und 0,2 s nimmt in beiden Versuchsgruppen im Verlauf der vier Durchgänge unabhängig von der Transportmethode stark zu. In der Klasse der Übergaben mit Übergabezeiten $> 0,5$ s führt der Verlauf der vier Durchgänge zu einem starken Rückgang der Anteile. Anhand der physischen Übergabezeit lassen sich zwei zentrale Anpassungstendenzen im Verlauf der Durchgänge identifizieren. Erstens versuchen die Versuchspersonen, Übergaben mit sehr langen Interaktionszeiten zu reduzieren. Zweitens versuchen die Versuchspersonen, den größten Teil der Übergaben mit Interaktionszeiten zwischen 0,1 s und 0,2 s durchzuführen. Aus neurowissenschaftlicher Sicht benötigt visuelles Feedback etwa 100 ms (Wolpert et al., 2013), um von der Netzhaut verarbeitet und an den visuellen Kortex weitergeleitet zu werden. Döhring et al. (2020) vermuten, dass taktile sensorische Rückmeldungen über ein Objekt innerhalb der ersten 80-100 ms verarbeitet werden können. Weitere Verzögerungen treten bei der

weiteren Verarbeitung auf. Die kombinierte Verzögerung der sensomotorischen Schleife beträgt ca. 200 ms (Wolpert et al., 2013) bis zur Reaktion auf einen visuellen oder taktilen Reiz. Das bedeutet, dass bei schnellen Bewegungen kein sensorisches Feedback genutzt werden kann. Daher muss Feedforward-Kontrolle verwendet werden, um eine Bewegung zu initiieren (Wolpert et al., 2013). In den meisten motorischen Systemen wird die motorische Kontrolle durch beide Prozesse, Feedforward und Feedback, erreicht. Da für den ersten Teil einer Bewegung kein sensorisches Feedback zur Verfügung steht, werden die ersten motorischen Befehle allein durch Feedforward-Prozesse erzeugt. Mit fortschreitender Bewegung werden Informationen über die Bewegung verfügbar, die zu einer Feedback-Kontrolle führen, um in die Bewegungsausführung einzugreifen (Wolpert et al., 2013). Bezüglich des Anstiegs des Prozentsatzes der Übergaben zwischen 0,1 und 0,2 s könnte spekuliert werden, dass der Anstieg der Prozentsätze aus einer Abnahme der Feedback-Kontrolle und einer Zunahme der Feedforward-Kontrolle resultiert. In einer früheren Studie zu Übergaben von Mensch zu Mensch wurde eine hohe Anzahl von Übergaben mit einem Kunststoffbecher durchgeführt (Käppler et al., 2021). Diese Übergaben wurden mit einem markerbasierten Bewegungserfassungssystem aufgezeichnet und auf ihre physische Übergabezeit hin analysiert. Die mittlere Übergabezeit des leeren Kunststoffbechers von Mensch zu Mensch betrug in dieser Studie $\sim 0,16$ s, was zwischen 0,1 s und 0,2 s liegt und darauf hindeutet, dass es hier eine Art Optimum für die physische Übergabezeit gibt. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu prüfen, ob die Daten aus der Bewegungserfassung mit denen der kapazitiven Näherungssensoren vergleichbar sind.

Da die Versuchspersonen in ihrem Leben schon viele Objektübergaben mit anderen Personen durchgeführt haben, haben sie eine gewisse Vorstellung davon, wie schnell und reibungslos eine Objektübergabe ablaufen sollte. Die Veränderungen der aufgeführten Werte lassen sich im Kontext von error-based learning erklären. Durch den Prozess des error-based learnings passt sich das menschliche motorische Verhalten ständig an. Wenn das motorische System auf einen Fehler stößt, ändert sich seine Einschätzung des Körpers und der Umgebung, und die nächste Bewegung wird sofort modifiziert, um dem zugrunde liegenden Fehler entgegenzuwirken (Diedrichsen et al., 2010).

Betrachtet man die Probleme, die bei Übergaben mit dem Roboter auftreten, als Störungen, so lassen sich die Veränderungen in den Daten auf die motorische Adaptation zurückführen. Diese beschreibt die Fähigkeit des motorischen Systems, unter veränderten äußeren oder inneren Bedingungen seine vorherige Leistung wiederzuerlangen (Krakauer & Mazzoni, 2011).

Bei beiden Transportmethoden neigen die Versuchspersonen dazu, den Abstand zwischen der Übersichtsposition des Roboters und der Greifposition des Objekts zu verringern. Bei der nicht-adaptiven Transportmethode ist diese Verringerung nicht signifikant. Für die adaptive Transportmethode konnte gezeigt werden, dass sich der Abstand zwischen der Übersichtsposition des Roboters und der Greifposition des Objekts im Verlauf der Durchgänge signifikant verringert. Eine Hypothese von Izawa et al. (2008) geht davon aus, dass es das Ziel des Nervensystems ist, die Leistung in einer neuen Umgebung zu maximieren. Interne Modelle werden verwendet, um einen besseren Bewegungsplan zu finden, der den motorischen Aufwand minimiert und den Ertrag der Bewegung maximiert. Die Fähigkeit, den Ertrag der Bewegung zu maximieren, kann erklären, warum die Versuchspersonen dazu neigen, vorzeitig in die Bewegung des Roboters einzugreifen. Die Versuchspersonen versuchen, den gesamten Übergabeprozess durch vorzeitiges Eingreifen zu beschleunigen. Gleichzeitig wird dadurch der Umfang der erforderlichen Informationsverarbeitung reduziert. Während der Bewegung des Roboters findet eine kontinuierliche Beobachtung des Roboterarms statt. Basierend auf der Beobachtung der Roboterbewegung werden kontinuierlich Schätzungen für den bestmöglichen Eingriffsort und -zeitpunkt berechnet. Durch eine vorzeitigere Intervention in die Roboterbewegung, werden die Kosten vom Beobachtungsaufwand auf den Vorhersageaufwand verlagert. Ob dadurch tatsächlich Kosten eingespart werden, ist unklar. Auf jeden Fall ist der Ertrag durch die schnellere Objektübergabe höher. Die Gesamtbilanz ist also positiv. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob das frühzeitige Eingreifen bei der Übergabe ein generelles menschliches Verhalten ist oder ob es auftritt, weil der Gesamtprozess zu langsam ist. Es wäre interessant, weitere Untersuchungen zur vorzeitigen Übergabe-Intervention mit unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten durchzuführen, um zu

prüfen, wann die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters optimal an die Reichgeschwindigkeit von Menschen angepasst ist.

5.5.3 Limitationen

Leichtmann et al. (2022) zeigen in ihrem Artikel, dass HRI-Nutzerstudien mit ähnlichen Problemen der Replizierbarkeit konfrontiert sind, wie andere verhaltenswissenschaftliche Disziplinen. Dementsprechend werden in diesem Abschnitt die wichtigsten Einschränkungen dieser Studie aufgezeigt.

Die Stichprobe der Studie stammt aus dem Umfeld des KIT. Es ist durchaus denkbar, dass die untersuchte Stichprobe eine höhere Technikaffinität aufweist und weniger Hemmungen hat, mit einem Roboter zu interagieren als die Grundgesamtheit aller Menschen. In dieser Studie wurde zwar ein handelsüblicher Franka Panda Roboter inklusive Greifer verwendet. Die kapazitive Näherungssensorik, die zur Auslösung der Objektübergabe und zur Erfassung der physischen Übergabezeit verwendet wurde, ist allerdings eine Prototypentwicklung, die beim IPR zur Replikation oder Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus angefordert werden kann. Hinsichtlich der verwendeten Hardware ist zu beachten, dass die kapazitiven Näherungssensoren am besten mit Materialien mit hoher elektrischer Permittivität funktionieren. Daher ist diese Art der Abtastung nicht für alle Objekteigenschaften gleichermaßen geeignet. Der Schwellenwert für die kapazitiven Näherungssensoren zur Freigabe des Objekts wurde auf einen festen Wert eingestellt. Der Schwellenwert ist jedoch von mehreren Faktoren abhängig. Die Oberfläche des zu greifenden Objekts und damit die Größe der Hand der Versuchsperson sowie der Hautleitwert und die Umgebungsfeuchtigkeit können die Funktionsfähigkeit des Sensors beeinflussen. Für zukünftige Untersuchungen könnte eine Kalibrierung des Sensors auf die jeweilige Versuchsperson entwickelt werden. Die Kalibrierung führt aber auch zu einer ersten Gewöhnung. Mit Vorwissen und Gewöhnung ist es nicht möglich zu untersuchen, wie sich Versuchspersonen intuitiv an den Roboter anpassen.

Die Bewegungsgeschwindigkeit der Versuchspersonen wurde in dieser Studie nicht erfasst. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Durch-

führung der Studie mit der integrierten Sensorik des Roboters. Die detaillierte Erfassung der Bewegungsgeschwindigkeit der Versuchspersonen sowie ihres Beschleunigungs- und Abbremsverhaltens könnte wichtige zusätzliche Informationen für die Auswertung und Interpretation des Verhaltens der Versuchspersonen liefern. Die physische Übergabezeit und die vorzeitige Übergabe-Intervention haben das Potenzial, als standardisierte Leistungsparameter über eine Vielzahl verschiedener Messsysteme, wie markerbasierte Bewegungserfassungssysteme oder kapazitive Näherungssensoren, erfasst zu werden. Wie von Steinfeld et al. (2006) und Aly et al. (2017) gefordert, sollen die beiden Messparameter zu einem einfacheren und faireren Vergleich verschiedener technischer Lösungen beitragen. In diesem Zusammenhang sind entsprechende Vergleichsstudien zu den jeweiligen Messsystemen durchzuführen.

In der vorliegenden Studie war der Roboterarm statisch auf dem Tisch montiert, auf dem die Übergabe stattfand. Die Versuchspersonen waren voll und ganz auf das Entgegennehmen des Objekts vom Roboter konzentriert. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Studie sollte in einem praktischen Kontext getestet werden. Die Art des verwendeten Roboteraufbaus ist in einer Montageumgebung gut vorstellbar, jedoch wird der Fokus eher auf der Montageaufgabe liegen, weshalb in Zukunft weitere Studien zu Übergaben ohne Fokus auf das Übergabeobjekt bei gleichzeitiger Ausführung einer Nebenaufgabe durchgeführt werden sollten. Im Kontext von sozialen Pflege Robotern ist zu berücksichtigen, dass der physischen Übergabe des Objekts eine Annäherung an die Person durch die mobile Plattform des Roboters vorausgeht. Daher sollte in Zukunft untersucht werden, ob die Ergebnisse dieser Studie auch dann gültig sind, wenn der physischen Übergabe eine Annäherung des Roboters an die Person vorausgeht.

5.6 Implikationen

Im Verlauf dieser Studie hat sich gezeigt, dass sich die erfassten Daten während der Durchgänge erheblich verändern können. Diese Veränderungen in den Daten können auf die Anpassung der Versuchspersonen an den Roboter und an die Übergabeaufgabe zurückgeführt werden. Daher wird empfoh-

len, bei Studien zur Mensch-Roboter-Interaktion immer eine ausreichende Anzahl von Wiederholungen einer Bewegung und mindestens zwei, besser drei oder mehr Durchgänge pro Testbedingung durchzuführen.

Basierend auf dieser Studie wird empfohlen, bei der Konzeption von Mensch-Roboter- oder Roboter-Mensch-Übergabestudien vergleichbare Metriken zu verwenden, um Studien mit ähnlichem Schwerpunkt vergleichbar zu machen. Die Metriken der physischen Übergabezeit und der vorzeitigen Übergabe-Intervention können mit einer Vielzahl unterschiedlicher Messsysteme erfasst werden, z. B. mit markerbasierter Bewegungserfassung (wie VICON, ARTTRACK etc.) oder mit kapazitiven und anderen in den Roboter integrierten Sensoren. Die Messparameter können mit geeigneten Berechnungsroutinen leicht in Robotersysteme integriert werden und bieten einen großen wissenschaftlichen Mehrwert für Mensch-Roboter-Studien.

Es ist außerdem wichtig, den Nutzungskontext und die Ziele des Benutzers bei der Verwendung eines Roboters mit entsprechenden Fähigkeiten zu verstehen. Wenn eine Person aktiv wünscht, dass ihr ein Gegenstand übergeben wird, sollte der letzte Impuls vom Nehmer ausgehen. Wenn die Aufmerksamkeit des Nehmers auf das zu übergebende Objekt gerichtet ist, sollte die Übergabe so gestaltet werden, dass der Benutzer das Objekt aktiv greift, anstatt es vollständig in die Hand zu befördern. Besteht das Ziel hingegen darin, das Objekt blind zu greifen, ohne dass die visuelle Aufmerksamkeit des Nehmers darauf gerichtet ist, so erfordert dies eine Anpassung an die Hand des Nehmers. Wenn die Aufmerksamkeit des Nehmers nicht auf das zu übergebende Objekt gerichtet ist, sollte das Objekt zur Hand transportiert werden, um physischen Kontakt herzustellen, auf den der Nehmer reagieren kann.

Die Studie hat gezeigt, dass eine adaptive Transportmethode nicht zu schnelleren physischen Übergaben führt als eine nicht-adaptive Transportmethode. Je weiter die technische Entwicklung im Bereich der Roboter-Mensch- oder Mensch-Roboter-Übergabe voranschreitet, desto wichtiger wird es, dem Forschungsgebiet der menschlichen Motorik und insbesondere der Forschung auf dem Gebiet der motorischen Adaptation mehr Aufmerksamkeit zu schenken. In der Vergangenheit wurde viel Forschung im Bereich der motorischen

Adaptation durchgeführt und veröffentlicht (Krakauer et al. 2019). Die Theorien, die hinter motorischen Adaptationsprozessen stehen, müssen auf gemeinsame Handlungen zwischen Menschen und auf Mensch-Roboter-Interaktionen angewendet werden. Es ist wichtig, dieses Wissen zu nutzen, um die Funktionsweise von Robotern an die Anpassungsmechanismen der Menschen anzupassen, die den Roboter nutzen werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Untersuchung wertvolle Erkenntnisse über die Faktoren geliefert hat, die den Erfolg von Objektübergaben zwischen Robotern und Menschen beeinflussen. Insgesamt leistet diese Studie einen wichtigen Beitrag zum Gebiet der Mensch-Roboter-Interaktion, indem sie ein tieferes Verständnis für die Gestaltung effektiver Objektübergaben vermittelt.

6 Experiment III: Bewertung der Roboter-Mensch Interaktionsleistung in Experiment II

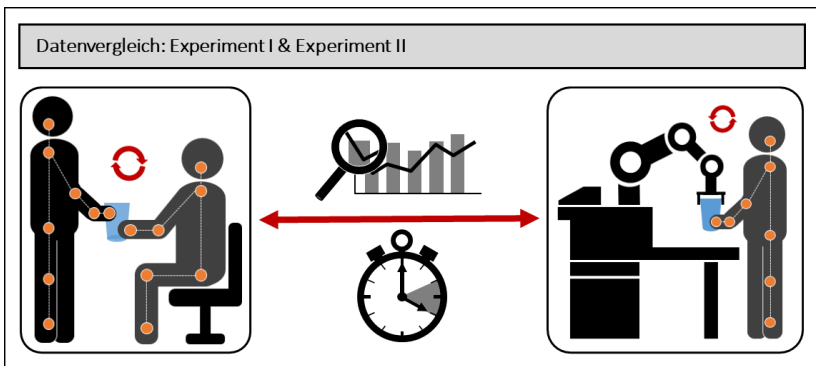


Abbildung 31: Schematischer Überblick des Datenvergleichs von Experiment I und Experiment II.

6.1 Einleitung

In diesem abschließenden Kapitel werden die aufgezeichneten physischen Übergabezeiten aus den Roboter-Mensch Objektübergaben aus Experiment II mit den physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Objektübergaben aus Experiment I verglichen und in ein Verhältnis zueinander gesetzt (Abbildung 31). Der Vergleich dient dazu, die Interaktionsleistung des Roboters in Experiment II, die Gewöhnung an den Roboter und den Einfluss der Objekteigenschaften übergreifend zu diskutieren. Hierfür werden die physischen Übergabezeiten, die sich bei Mensch-Mensch Übergaben aufgrund der unterschiedlichen Objekteigenschaften ergeben, mit den Durchgängen 1-4 der Roboter-Mensch Übergaben verglichen. Wie von Steinfeld et al. (2006) und Aly et al. (2017) gefordert, trägt der Messparameter der

physischen Übergabezeit somit zu einem einfacheren und faireren Vergleich unterschiedlicher technischer Lösungen bei.

Die beiden Experimente weisen einige Gemeinsamkeiten auf, die einen Vergleich der Daten ermöglichen. In einem ersten Schritt werden sowohl der Versuchsaufbau als auch die Ergebnisse der beiden Studien analysiert, um ein klares Verständnis darüber zu erlangen, welche Daten aus welchen Gründen miteinander vergleichbar sind. Um die Interaktionsleistung der Roboter-Mensch Übergaben in Experiment II in einem größeren Kontext zu betrachten, wird zunächst diskutiert, welche Durchgänge für einen Vergleich mit Experiment I und den Untersuchungsergebnissen anderer Autoren in Frage kommen. Anschließend werden die Interaktionsleistungen aus Experiment II mit den Interaktionsleistungen aus Experiment I verglichen. Abschließend werden die Interaktionsleistungen aus Experiment II mit den Interaktionsleistungen aus anderen Mensch-Mensch Untersuchungen verglichen und eingeordnet.

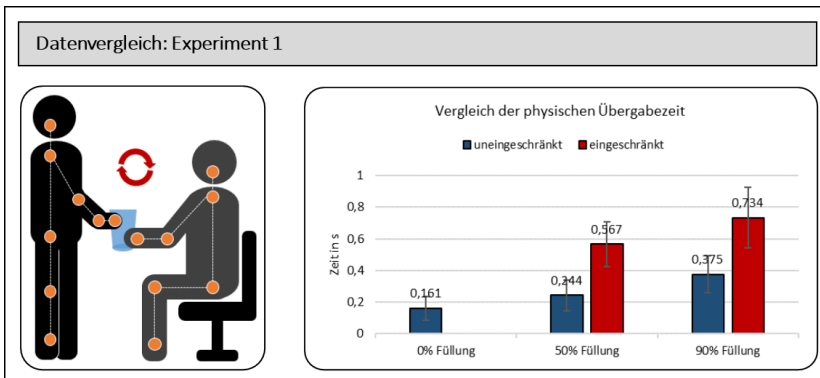


Abbildung 32: Datenvergleich: Physische Übergabezeit Experiment I.

In Experiment I wurden Objektübergaben von Mensch zu Mensch durchgeführt (Abbildung 32). Ziel war es herauszufinden, wie sich verschiedene Objekteigenschaften sowie visuelle und auditive Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers auf die physische Übergabezeit und die Objektführung als abhängige Variablen auswirken. Für Experiment I führten 20 Versuchspersonen Objektübergaben mit einer standardisierten Übergabeperson durch.

Jede Versuchsperson führte insgesamt 30 Übergaben durch. Die Übergaben wurden in 5 Durchgängen mit jeweils 6 Übergaben pro Durchgang durchgeführt. Die Durchgänge unterschieden sich sowohl in der Becherfüllung als auch in den Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers. Bei den Übergabeobjekten handelte es sich um Kunststoffbecher die ohne Füllung 36 g, zu 50 % mit Wasser gefüllt 276 g und zu 90 % mit Wasser gefüllt 468 g wogen. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Objekteigenschaften einen signifikanten Einfluss auf die Übergabezeit und die Objektführung haben. Je höher die Becherfüllung mit Wasser, desto höher die physische Übergabezeit und desto länger die Objektführung während der physischen Übergabe. Die Einschränkung der visuellen und auditiven Wahrnehmung des Nehmers führte zu signifikant höheren Übergabezeiten bei gleichzeitig signifikant geringerer Objektführung während der physischen Übergabe.

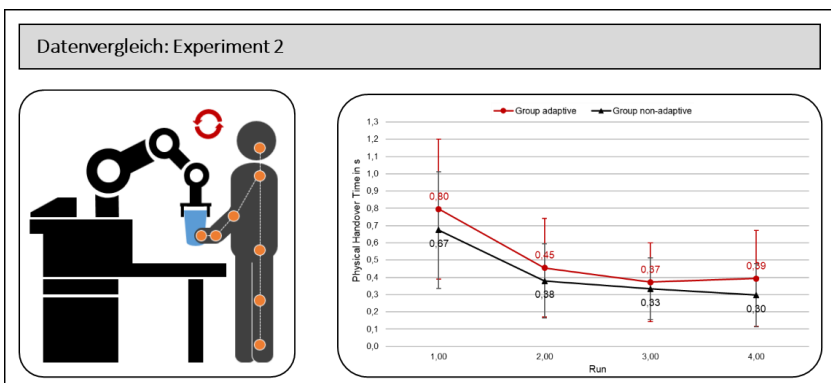


Abbildung 33: Datenvergleich: Physische Übergabezeit Experiment II.

In Experiment II wurden Objektübergaben vom Roboter an den Menschen durchgeführt (Abbildung 33). Ziel des Experiments war es, die Auswirkungen von adaptivem und nicht-adaptivem Roboterverhalten auf die physische Übergabezeit, die vorzeitige Übergabe-Intervention und das subjektive Empfinden als abhängige Variablen zu untersuchen. Ein weiteres Ziel bestand darin, die Auswirkungen mehrerer aufeinanderfolgender Durchgänge mit derselben Übergabemethode auf die abhängigen Variablen zu untersuchen. Es handelte sich um ein Zwei-Gruppen Design mit jeweils 20 Versuchspersonen pro Gruppe. Die Versuchspersonen führten in 4 Durchgängen

10 Übergaben pro Durchgang durch. Somit führte jede Versuchsperson insgesamt 40 Objektübergaben durch. Gruppe A führte alle Objektübergaben mit der adaptiven Übergabemethode durch, während Gruppe B alle Objektübergaben mit der nicht-adaptiven Übergabemethode durchführte. Das Übergabeobjekt war eine Keramiktaße mit einem Gewicht von 290 g. Die adaptive Transportmethode führt nicht zu signifikant höheren mittleren physischen Übergabezeiten als die nicht-adaptive Transportmethode. Die nicht-adaptive Transportmethode führt zu einem signifikant früheren Eingreifen in den Übergabeprozess als die adaptive Transportmethode. Die physische Übergabezeit verringert sich bei beiden Versuchsgruppen innerhalb der ersten beiden Durchgänge signifikant. Die vorzeitige Übergabe-Intervention nimmt in der Gruppe mit der nicht-adaptiven Transportmethode im Verlauf der Durchgänge signifikant zu.

6.2 Ziele Experiment III

Die Ziele von Experiment III sind es,

- a) zu untersuchen wie nahe die Übergabezeiten der Roboter-Mensch Übergaben in Experiment II, den Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben in Experiment I kommen.
- b) zu untersuchen, wie stark sich die Übergabezeiten der Roboter-Mensch Übergaben durch Gewöhnung an den Roboter, den Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben annähern.
- c) zu untersuchen, mit welchen Objekteigenschaften der Mensch-Mensch Übergaben die Übergabezeiten der Roboter-Mensch Übergaben vergleichbar sind.

6.3 Datenverarbeitung und Statistik

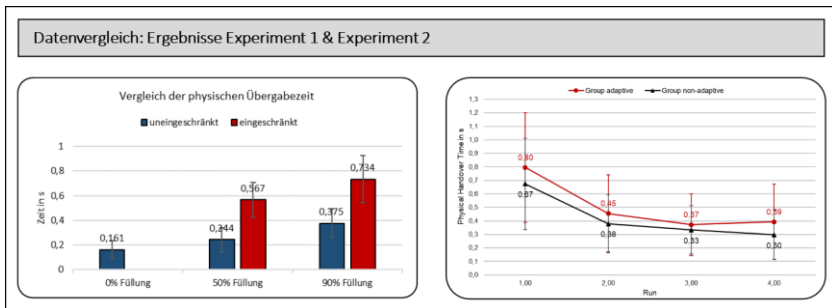


Abbildung 34: Datenvergleich der physischen Übergabezeiten in Experiment I und Experiment II.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in beiden Experimenten die physische Übergabezeit als abhängige Variable betrachtet wurde. Die untersuchten Stichproben bestanden sowohl in Experiment I als auch in der adaptiven und nicht-adaptiven Gruppe in Experiment II aus jeweils 20 Versuchspersonen. In Experiment I führten die Versuchspersonen jeweils 30 Übergaben durch, in Experiment II führten die Versuchspersonen jeweils 40 Übergaben aus. In Experiment I wurde als Übergabeobjekt ein Kunststoffbecher mit matter Oberfläche und einem Leergewicht von 36 g verwendet. Der Kunststoffbecher wurde sowohl ohne Füllung als auch mit 50 % und 90 % Wasserfüllung übergeben. Bei 50 % Füllung wog der Becher 276 g, bei 90 % Füllung 468 g. Der Becher hatte eine konische Form und konnte von allen Seiten gleichermaßen gegriffen werden. In Experiment II wurde eine Keramiktafel mit einem Gewicht von 290 g als Übergabeobjekt verwendet, die ebenfalls eine konische Form aufwies und eine glatte, glasierte Oberfläche hatte.

Um die Datensätze der beiden Experimente statistisch vergleichen zu können, werden die Ergebnisse der physischen Übergabezeiten der verschiedenen Becherfüllungen (0 %, 50 %, 90 %) ohne Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers aus Experiment I mit den physischen Übergabezeiten der vier Durchgänge der beiden Untersuchungsgruppen aus Experiment II verwendet (Abbildung 34). Die physischen Übergabezeiten aufgrund von Wahrnehmung

mungseinschränkungen werden nicht betrachtet, da in Experiment II keine Wahrnehmungseinschränkungen untersucht wurden.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Untersuchungsbedingungen in Experiment I und Experiment II.

	Experiment I	Experiment II
Art der Übergabe	Mensch-Mensch	Roboter-Mensch
Übergabebedingungen	verschiedene Becherfüllung, Einschränkung der Wahrnehmung	adaptives/nicht-adaptives Roboterverhalten
Art des Behältnisses	Kunststoffbecher	Keramiktasse
Inhalt	kein Inhalt/Wasser	kein Inhalt
Objektgewicht	36 g (leer); 276 g (50 %); 468 g (90 %)	290 g
Stichprobe	20 VP	20 VP adaptiv; 20 VP nicht-adaptiv
Wiederholungen	30 Wdh. (5 x 6)	40 Wdh. (4 x 10)

Die Daten wurden mit dem Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung und mit dem Brown-Forsythe Test auf Varianzhomogenität geprüft. Da sowohl die Normalverteilung als auch die Varianzhomogenität unter bestimmten Bedingungen verletzt sind, wird für den statistischen Vergleich der Daten der Mann-Whitney U-Test verwendet. Die Effektstärke wird durch die Rangbise-rialkorrelation angegeben. Das Signifikanzniveau wird a priori auf $p = 0,05$ festgelegt.

6.4 Ergebnisse

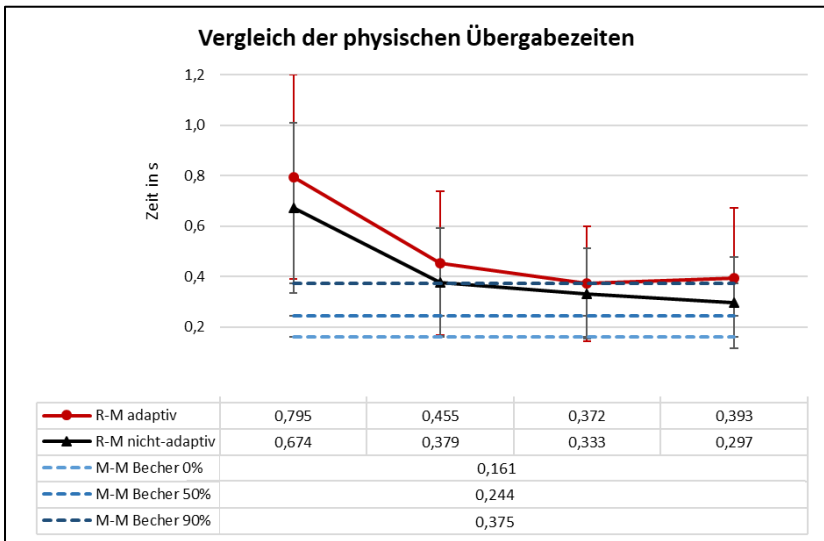


Abbildung 35: Vergleich der physischen Übergabezeiten in Experiment II mit den physischen Übergabezeiten aus Experiment I.

Zur Veranschaulichung des Datenvergleichs wurden die physischen Übergabezeiten für die verschiedenen Becherfüllungen in Experiment I, in das Diagramm, das die physischen Übergabezeiten im Verlauf der 4 Durchgänge aus Experiment II zeigt, integriert (Abbildung 35). Die Übergabezeiten jedes Durchgangs mit dem Roboter, können mit den durchschnittlichen Übergabezeiten der Becher verglichen werden.

Durchgang 1

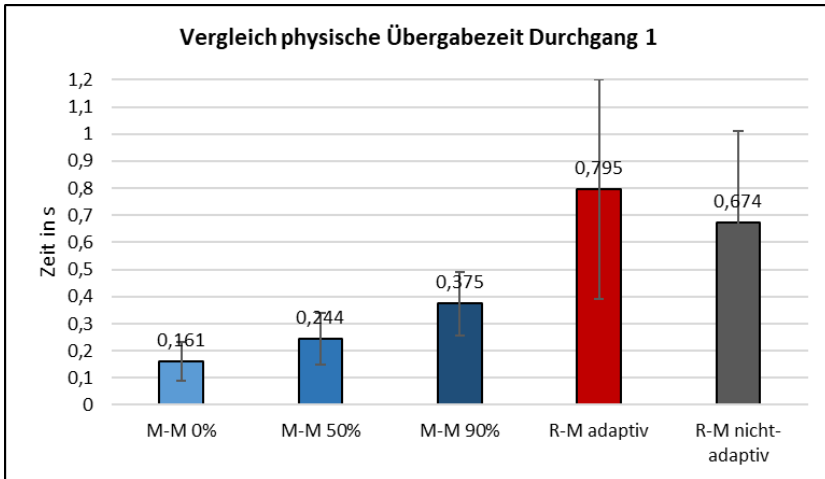


Abbildung 36: Vergleich der physischen Übergabezeiten der Roboter-Mensch Übergaben im ersten Durchgang mit den physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben mit 0 %, 50 % und 90 % Becherfüllung.

Zwischen den Übergabezeiten des ersten Durchgangs der Roboter-Mensch Übergaben und den Übergabezeiten für die drei verschiedenen Objekteigenschaften der Mensch-Mensch Übergaben in Experiment I ergeben sich für alle Bedingungen signifikante Unterschiede (Tabelle 6). Demnach weisen die Roboter-Mensch Übergaben sowohl bei der adaptiven als auch bei der nicht-adaptiven Übergabemethode im ersten Durchgang signifikant höhere Übergabezeiten auf.

Tabelle 6: Mann-Whitney U Test Durchgang 1 Roboter-Mensch Übergaben verglichen mit Mensch-Mensch Übergaben 0 %, 50 % und 90 % Becherfüllung.

Independent Samples Mann-Whitney U

	W	p	Rank-Biserial Correlation	SE Rank-Biserial Correlation
0 % Becher				
run1_adaptiv	3.000	< .001	-0.985	0.183
run1_nicht-adaptiv	8.000	< .001	-0.960	0.183
50 % Becher				
run1_adaptiv	20.000	< .001	-0.900	0.183
run1_nicht-adaptiv	38.000	< .001	-0.810	0.183
90 % Becher				
run1_adaptiv	54.000	< .001	-0.730	0.183
run1_nicht-adaptiv	87.500	0.002	-0.563	0.183

Note. For the Mann-Whitney test, effect size is given by the rank biserial correlation.

Durchgang 2

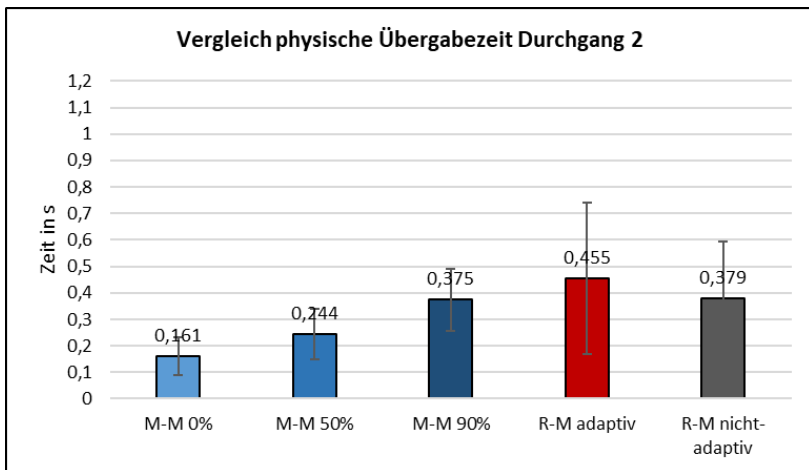


Abbildung 37: Vergleich der physischen Übergabezeiten der Roboter-Mensch Übergaben im zweiten Durchgang mit den physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben mit 0 %, 50 % und 90 % Becherfüllung.

Zwischen den Übergabezeiten des zweiten Durchgangs der Roboter-Mensch Übergaben und den Übergabezeiten der verschiedenen Objekteigenschaften der Mensch-Mensch Übergaben zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den beiden Roboter-Mensch Übergabemethoden und dem Becher mit 0 % Füllung sowie dem Becher mit 50 % Füllung. Zwischen den Roboter-Mensch Übergaben und den Mensch-Mensch Übergaben des Bechers mit 90 % Füllung ergeben sich keine signifikanten Unterschiede, bei gleichzeitig geringer Effektstärke (Tabelle 7).

Tabelle 7: Mann-Whitney U Test Durchgang 2 Roboter-Mensch Übergaben verglichen mit Mensch-Mensch Übergaben 0 %, 50 % und 90 % Becherfüllung.

Independent Samples Mann-Whitney U

	W	p	Rank-Biserial Correlation	SE Rank-Biserial Correlation
0 % Becher				
run2_adaptiv	45.000	< .001	-0.775	0.183
run2_nicht-adaptiv	42.000	< .001	-0.790	0.183
50 % Becher				
run2_adaptiv	103.500	0.009	-0.483	0.183
run2_nicht-adaptiv	115.000	0.021	-0.425	0.183
90 % Becher				
run2_adaptiv	176.500	0.534	-0.118	0.183
run2_nicht-adaptiv	213.000	0.735	0.065	0.183

Note. For the Mann-Whitney test, effect size is given by the rank biserial correlation.

Durchgang 3

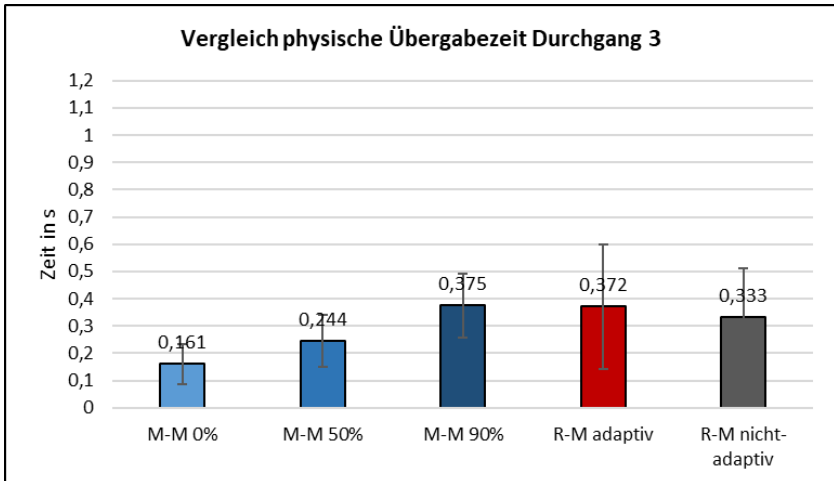


Abbildung 38: Vergleich der physischen Übergabezeiten der Roboter-Mensch Übergaben im dritten Durchgang mit den physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben mit 0 %, 50 % und 90 % Becherfüllung.

Zwischen den Übergabezeiten des dritten Durchgangs der Roboter-Mensch Übergaben und den Übergabezeiten der verschiedenen Objekteigenschaften der Mensch-Mensch Übergaben zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den beiden Roboter-Mensch Übergabemethoden und dem Becher mit 0 % Füllung. Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Roboter-Mensch Übergaben und den Mensch-Mensch Übergaben der Becher mit 50 % und 90 % (Tabelle 8).

Tabelle 8: Mann-Whitney U Test Durchgang 3 Roboter-Mensch Übergaben verglichen mit Mensch-Mensch Übergaben 0 %, 50 % und 90 % Becherfüllung.

Independent Samples Mann-Whitney U

	W	P	Rank-Biserial Correlation	SE Rank-Biserial Correlation
0 % Becher				
run3_adaptiv	63.000	< .001	-0.685	0.183
run3_nicht-adaptiv	53.000	< .001	-0.735	0.183
50 % Becher				
run3_adaptiv	138.000	0.096	-0.310	0.183
run3_nicht-adaptiv	146.000	0.149	-0.270	0.183
90 % Becher				
run3_adaptiv	221.000	0.579	0.105	0.183
run3_nicht-adaptiv	239.500	0.291	0.198	0.183

Note. For the Mann-Whitney test, effect size is given by the rank biserial correlation.

Durchgang 4

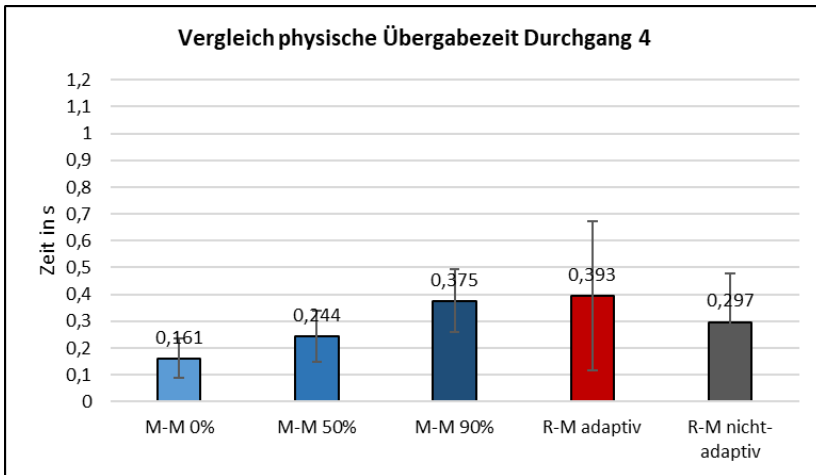


Abbildung 39: Vergleich der physischen Übergabezeiten der Roboter-Mensch Übergaben im vierten Durchgang mit den physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben mit 0 %, 50 % und 90 % Becherfüllung.

Zwischen den Übergabezeiten des vierten Durchgangs der Roboter-Mensch Übergaben und den Übergabezeiten der verschiedenen Objekteigenschaften der Mensch-Mensch Übergaben zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den beiden Roboter-Mensch Übergabemethoden und dem Becher mit 0 % Füllung. Zwischen den Roboter-Mensch Übergaben und den Mensch-Mensch Übergaben des Bechers mit 50 % Füllung zeigen sich keine signifikanten Unterschiede, bei gleichzeitig geringer Effektstärke. Die adaptive Übergabemethode zeigt keinen signifikanten Unterschied zur Übergabe des zu 90 % gefüllten Bechers. Die nicht-adaptive Gruppe weist im vierten Durchgang eine signifikant kürzere physische Übergabezeit auf (Tabelle 9).

Tabelle 9: Mann-Whitney U Test Durchgang 4 Roboter-Mensch Übergaben verglichen mit Mensch-Mensch Übergaben 0 %, 50 % und 90 % Becherfüllung.

Independent Samples Mann-Whitney U

	W	p	Rank-Biserial Correlation	SE Rank-Biserial Correlation
0 % Becher				
run4_adaptiv	58.000	< .001	-0.710	0.183
run4_nicht-adaptiv	72.000	< .001	-0.640	0.183
50 % Becher				
run4_adaptiv	143.000	0.127	-0.285	0.183
run4_nicht-adaptiv	183.500	0.665	-0.083	0.183
90 % Becher				
run4_adaptiv	231.000	0.409	0.155	0.183
run4_nicht-adaptiv	297.000	0.009	0.485	0.183

Note. For the Mann-Whitney test, effect size is given by the rank biserial correlation.

Zusammenfassung

Die physischen Übergabezeiten der Roboter-Mensch Übergaben sind im ersten Durchgang sowohl für die adaptive (795 ms \pm 405 ms) als auch für die nicht-adaptive Untersuchungsgruppe (674 ms \pm 337 ms) signifikant höher im Vergleich zu den Mensch-Mensch Übergabezeiten der unterschiedlich gefüllten Becher in Experiment I (0 %: 161 ms \pm 73 ms; 50 %: 244 ms \pm 96 ms; 90 %: 375 ms \pm 117 ms). Im zweiten Durchgang der Roboter-Mensch Übergaben erreichen die physischen Übergabezeiten beider Untersuchungsgruppen adaptiv 455 ms (\pm 285 ms) und nicht-adaptiv 379 ms (\pm 215 ms), das Niveau der physischen Übergabezeiten des zu 90 % gefüllten Bechers

(375 ms \pm 117 ms). Im dritten Durchgang der Roboter-Mensch Übergaben liegen die physischen Übergabezeiten beider Untersuchungsgruppen (adaptiv: 372 ms \pm 229 ms; nicht-adaptiv: 333 ms \pm 179 ms) ebenfalls auf dem Niveau des zu 90 % gefüllten Bechers (375 ms \pm 117 ms). Im vierten Durchgang unterschreiten die physischen Übergabezeiten der nicht-adaptiven Untersuchungsgruppe 297 ms (\pm 182 ms) die Übergabezeiten des 90 % gefüllten Bechers (375 ms \pm 117 ms) und nähern sich den Werten des 50 % gefüllten Bechers (244 ms \pm 96 ms) an. Die Übergabezeiten der adaptiven Gruppe 393 ms (\pm 278 ms) bleiben auf dem Niveau des 90 % gefüllten Bechers.

6.5 Diskussion

Durch den Vergleich der physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben aus Experiment I mit den Roboter-Mensch Übergaben aus Experiment II kann gezeigt werden, dass sich die physische Übergabezeit der Roboter-Mensch Übergaben bereits nach 10 bis 20 Wiederholungen, verteilt auf zwei Übungsdurchgänge, den Mensch-Mensch Übergaben eines mit Wasser gefüllten Bechers angeglichen hat. Dies deutet darauf hin, dass sich die Versuchspersonen gut auf das Verhalten des Roboters einstellen und das Objekt entsprechend vom Roboter entgegennehmen konnten. Im ersten Durchgang der Roboter-Mensch Übergaben beider Untersuchungsgruppen unterscheiden sich die physischen Übergabezeiten noch deutlich von den physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben. In Experiment I führten alle Versuchsteilnehmer eine Gewöhnung mit 12 Übergaben durch. In Experiment II wurde keine Gewöhnung durchgeführt. Bei einer Betrachtung der Ergebnisse von Experiment II wird deutlich, dass sich die Versuchspersonen vom ersten zum zweiten Durchgang deutlich verbessert haben. Die Übergabezeiten verkürzen sich durch motorisches Lernen innerhalb von zwei bis drei Durchgängen signifikant. Die ersten 10 Übergaben des ersten Durchgangs in Experiment II sollten daher als Gewöhnungsphase angesehen werden. Von Durchgang 2 zu Durchgang 3 fand eine weitere Verringerung der Übergabezeit statt, jedoch ohne signifikanten Unterschied. Zwischen den Durchgängen 3 und 4 gibt es weder signifikante noch deskriptive Unterschiede.

de. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich ab Durchgang 3 eine Stabilisierung der Übergabezeiten eingestellt hat.

Entsprechend dieser Erkenntnis ist es für Roboter-Mensch oder Mensch-Roboter Studien wichtig, eine hohe Zahl an Wiederholungen und Durchgängen durchzuführen. Es wäre ein Fehler, die Übergabezeiten einer Studie, bei der nur ein Durchgang durchgeführt wurde, mit den Benchmarkzeiten von Mensch-Mensch Übergaben zu vergleichen, die auf einer hohen Anzahl von Wiederholungen beruhen. In diesem Fall würden die Daten der Roboter-Mensch Übergaben nur die Initialgewöhnung des Menschen an ein fremdes Gerät mit fremdem Bewegungsverhalten, sprich den Roboter, widerspiegeln. Ein Vergleich der Daten von Mensch-Mensch Übergaben, denen ein hohes Maß an Erfahrung und Übung zugrunde liegt, mit der Interaktionsleistung von Roboter-Mensch Übergaben würde zu einer zu negativen Bewertung der Roboter-Mensch-Interaktionsleistung führen. Durch die Durchführung mehrerer Wiederholungen und Durchgänge kann die Vergleichbarkeit der Daten auf zwei Arten verbessert werden. Der Vergleich der Übergabezeiten der ersten 10 Wiederholungen ermöglicht einen Vergleich, wie intuitiv es ist, ohne Gewöhnung mit dem Robotersetup zu interagieren. Die Durchführung mehrerer Durchgänge liefert Ergebnisse darüber, wie schnell bzw. einfach sich der Mensch an den Roboter adaptieren kann. Beide Leistungsparameter, die Initialgewöhnung sowie die Gewöhnung über mehrere Durchgänge und Wiederholungen liefern wichtige Bewertungsgrundlagen und Entwicklungsimpulse für Roboterssetups.

Wie bereits in Experiment I diskutiert, ist eine offene Frage, ob die physischen Übergabezeiten in Experiment I auf das höhere Objektgewicht zurückzuführen sind oder auch auf die erhöhte Unsicherheit, die durch die erhöhte Wasserfüllmenge für die Interaktionspartner entsteht. Aus der Untersuchung von Chan et al. (2012) kann geschlossen werden, dass unterschiedliche Objektgewichte zu unterschiedlichen Schwierigkeiten bei der Übergabe führen. Ein höheres Objektgewicht führt bei Chan et al. zu höheren Übergabezeiten. Die Übergabezeit für das leichteste Objekt (483 g) beträgt $470 \text{ ms} \pm 159 \text{ ms}$, für das mittelschwere Objekt (577 g) $500 \text{ ms} \pm 182 \text{ ms}$ und für das schwerste Objekt (678 g) $523 \text{ ms} \pm 201 \text{ ms}$. Bei Mason und Mackenzie

(2005) wurde ein Objekt von 90 g in horizontaler Ausrichtung zwischen Geber und Nehmer in durchschnittlich 500 ms übergeben. Endo et al. (2012) berichten eine physische Übergabezeit von $323,1 \text{ ms} \pm 24,1 \text{ ms}$ für ein Objekt von 150 g, das in horizontaler Ausrichtung übergeben wurde. Brand et al. (2022) berichten eine physische Übergabezeit von $352,76 \text{ ms} \pm 71,51 \text{ ms}$ für Soloübergaben und $515,08 \text{ ms} \pm 87,22 \text{ ms}$ für Partnerübergaben mit einem 450 g schweren Übergabeobjekt in vertikaler Ausrichtung. Döhring et al. (2020) berichten eine Übergabezeit von $643 \text{ ms} \pm 71 \text{ ms}$ für ein Objekt mit einem Gewicht von 1800 g, das in vertikaler Ausrichtung übergeben wurde. Wird davon ausgegangen, dass sich die physische Übergabezeit allein durch das Objektgewicht erhöht, wäre der Vergleich der Keramiktasche mit einem zu 50 % gefüllten Becher am aussagekräftigsten. Um bei zukünftigen Untersuchungen eine optimale Vergleichbarkeit der Daten zu erreichen, wäre es sinnvoll, identische Objekte für die Untersuchungen zu verwenden. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen der Messsysteme und Forschungsdesigns an die Objekteigenschaften stellt die Standardisierung von Übergabeobjekten eine große Herausforderung für zukünftige Untersuchungen dar.

In den aufgeführten Untersuchungen wurden jeweils hohe Wiederholungszahlen der Objektübergaben zur Berechnung der Mittelwerte der physischen Übergabezeit durchgeführt. Aufgrund der hohen Wiederholungszahlen muss in diesen Untersuchungen eine Gewöhnung sowohl an die Übergabeaufgabe als auch an den Interaktionspartner und das Übergabeobjekt stattgefunden haben. Eine zusammenfassende Betrachtung der diskutierten Literatur zeigt, dass die physischen Übergabezeiten in Experiment II im dritten Durchgang teilweise unter den in den diskutierten Untersuchungen ermittelten Werten liegen (Chan et al., 2012; Döhring et al., 2020; Mason & Mackenzie, 2005). Im Vergleich zu den Übergabezeiten von Endo et al. (2012) mit einem 150 g schweren Objekt und den Übergabezeiten der Soloübergaben von Brand et al. (2022) mit einem 450 g schweren Objekt liegen die Übergabezeiten in Experiment II mit einer 290 g schweren Keramiktasche auf einem ähnlichen Niveau. Der Vergleich der physischen Übergabezeiten der Roboter-Mensch Übergaben mit den Übergabezeiten aus den Mensch-Mensch Untersuchungen von Chan et al. (2012), Mason und Mackenzie (2005), Endo et al. (2012), Döhring et al. (2020) und Brand et al. (2022) unterstützt die Einschätzung,

dass die Versuchspersonen in Experiment II sehr gut mit dem Robotersetup interagieren konnten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein theoretisches Verständnis der ablaufenden Prozesse bei Objektüberhaben zwischen Menschen zu schaffen, den Einfluss verschiedener Objekteigenschaften auf die Übergabeleistung bei Mensch-Mensch Übergaben sowie den Einfluss von Wahrnehmungseinschränkungen des Nehmers auf die Übergabeleistung bei Mensch-Mensch Übergaben zu untersuchen. Die Untersuchung von Mensch-Mensch Übergaben diente der Generierung von Benchmarkdaten zur Bewertung von Objektübergaben zwischen Roboter und Mensch. Diese Benchmarkdaten sollten zur Bewertung des in Experiment II eingesetzten Robotersystems herangezogen werden. Das Ziel von Experiment II war es, im Rahmen von Roboter-Mensch Übergaben den Einfluss eines adaptiven Roboterverhaltens im Vergleich zu einem nicht-adaptiven Roboterverhalten auf die Übergabeleistung und die subjektive Wahrnehmung sowie den Einfluss einer hohen Anzahl von Wiederholungen von Objektübergaben über mehrere Durchgänge auf die Übergabeleistung bei Roboter-Mensch Übergaben zu untersuchen. Das Ziel von Experiment III war es, die physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben aus Experiment I mit den Roboter-Mensch Übergaben aus Experiment II zu vergleichen und dadurch eine Einordnung der Interaktionsleistung des Robotersetups aus Experiment II zu ermöglichen.

Im Rahmen der durchgeführten Experimente und der diskutierten Literatur kann festgehalten werden, dass die physische Übergabezeit bei Objektübergaben zwischen zwei menschlichen Partnern, aber auch zwischen Roboter und Mensch, von verschiedenen Faktoren abhängt. Das Objektgewicht, die Objektform, der Griff, der zum Greifen des Objekts angewandt werden muss, das explizite Wissen über die Fragilität des Objekts bzw. seines Inhalts, die Reichgeschwindigkeit bzw. der Kollisionsimpuls durch den Nehmer und die Gewöhnung an einen Roboter sind allesamt Faktoren, die einen Einfluss auf die Übergabezeit bei Objektübergaben haben. Entsprechend wichtig ist es, bei der Bewertung von Robotersetups all dieses Wissen in die Interpretation

der Leistungsdaten einfließen zu lassen, um ein Robotersetup weder zu früh zu gut, noch zu früh zu schlecht zu bewerten.

In Experiment I konnte gezeigt werden, dass die Objekteigenschaften einen signifikanten Einfluss auf die Übergabezeit und die Objektführung haben. Je höher die Becherfüllung mit Wasser, desto länger die physische Übergabezeit und desto länger die Objektführung während der physischen Übergabe. Die Einschränkung der visuellen und auditiven Wahrnehmung der Nehmerperson führte zu signifikant höheren Übergabezeiten bei gleichzeitig signifikant geringerer Objektführung während der physischen Übergabe. In Experiment II konnte gezeigt werden, dass die adaptive Transportmethode nicht zu signifikant höheren physischen Übergabezeiten führt als die nicht-adaptive Transportmethode. Die nicht-adaptive Transportmethode führt nicht zu einer signifikant vorzeitigeren Übergabe-Intervention als die adaptive Transportmethode. Die adaptive Transportmethode führt zu signifikant niedrigeren Bewertungen des Vertrauens und der wahrgenommenen Sicherheit als die nicht-adaptive Transportmethode. Die physische Übergabezeit nimmt bei beiden Versuchsgruppen innerhalb der ersten beiden Durchgänge signifikant ab. Die vorzeitige Übergabe-Intervention nimmt in der adaptiven Transportgruppe im Verlauf der Durchgänge signifikant zu. Die adaptive Transportgruppe zeigt einen signifikanten Rückgang der Bewertung des Sicherheitsempfindens im Verlauf der Durchgänge. In Experiment III konnte, durch den Vergleich der physischen Übergabezeiten der Mensch-Mensch Übergaben aus Experiment I mit den Roboter-Mensch Übergaben aus Experiment II gezeigt werden, dass sich die physische Übergabezeit der Roboter-Mensch Übergaben bereits nach 10 bis 20 Wiederholungen, verteilt auf zwei Übungsdurchgänge, den Mensch-Mensch Übergaben eines mit Wasser gefüllten Bechers angeglichen hat. Dies deutet darauf hin, dass sich die Versuchspersonen gut auf das Verhalten des Roboters einstellen und das Objekt entsprechend gut vom Roboter entgegennehmen konnten.

Basierend auf den Ergebnissen von Experiment I kann davon ausgegangen werden, dass die Objektführung zur Aushandlung der Objektübergabe genutzt wird. Ohne Wahrnehmungseinschränkungen kann eine Kombination aus visuellen und taktilen Informationen genutzt werden, um eine möglichst

schnelle, flüssige und gleichzeitig sichere Übergabe des Objekts zu realisieren. Ohne Wahrnehmungseinschränkungen ist eine kürzere physische Übergabezeit erforderlich, gleichzeitig wird eine längere Objektführung genutzt. Einschränkungen der Wahrnehmung des Nehmers führen zu einer längeren physischen Übergabezeit, dafür zu einer kürzeren Objektführung. Bei eingeschränkter Wahrnehmung kann die Objektführung nicht zum Austausch visueller Signale genutzt werden, da nur die taktile Wahrnehmung zur Verfügung steht. Entsprechend kann geschlussfolgert werden, dass die Wahrnehmungseinschränkungen zu größeren Unsicherheiten bei der Aushandlung der Objektübergabe führen. Bei der weiteren Entwicklung von Hard- und Software muss immer die Frage gestellt werden, wie Unsicherheiten des Menschen bei der Interaktion mit Robotern so weit wie möglich reduziert bzw. vermieden werden können.

Die Weiterentwicklung von Hard- und Software wird es in naher Zukunft ermöglichen, über die in die Roboter integrierte Sensorik noch präzisere Daten zu erfassen. Dadurch werden immer genauere Vergleiche zwischen Roboter-Mensch und Mensch-Mensch Übergaben möglich. Darüber hinaus sollte es möglich sein, durch eine geschickte Integration von einfachen Kameras in Robotersysteme ein Tracking der physischen Übergabezeit zu realisieren. Die Kameras können entweder in den Roboter integriert oder zur einfachen Evaluierung bestehender Systeme extern angebracht werden. Für die zukünftige Forschung und die Bewertung von Robotersetups zur Objektübergabe wäre es hilfreich, eine groß angelegte Studie durchzuführen, in der mit einer großen Anzahl von Versuchspersonen und einem standardisierten Versuchsprotokoll Übergaben mit unterschiedlichen Objekten durchgeführt werden, die als Referenz für weitere Übergabestudien dienen können. Aufbauend auf den Ergebnissen einer solchen groß angelegten Studie könnte eine Datenbank mit verschiedenen Objekteigenschaften und Übergabesituationen als Referenz für die Bewertung von Robotersetups genutzt werden. In dieser Datenbank müssen relevante Objekteigenschaften berücksichtigt werden. Beispiele hierfür sind das Objektgewicht, die greifbare Oberfläche (ist z. B. ein Henkel im Weg, wie bei einer Tasse, oder kann das Objekt aus jeder Richtung gleich gut gegriffen werden, wie bei einem Glas oder einer Wasserflasche), der Reibungskoeffizient (besteht die Möglichkeit, dass das Objekt

wegrutscht? Beispiel: glasierte Keramiktaße vs. matter Kunststoffbecher), die Fragilität des Objekts (besteht die Gefahr, dass das Objekt bei mangelnder Vorsicht zu Bruch geht?), der Inhalt des Objekts (kann der Inhalt des Objekts verschüttet werden?), die Gefährlichkeit des Objekts (besteht durch Fallenlassen des Objekts eine erhöhte Gefahr für den Übergabepartner?). Es kann und muss davon ausgegangen werden, dass der Mensch diese und weitere Faktoren in die Planung und Durchführung von Objektübergaben einbezieht und sich dies entsprechend auf Leistungsparameter wie die physische Übergabezeit, die Objektführung, das frühzeitige Eingreifen in die Objektübergabe, den Krafteinsatz und weitere mögliche Parameter auswirkt. Dementsprechend sollten weitere Forschungsanstrengungen unternommen werden, um ein detaillierteres Wissen über Objektübergaben sowohl zwischen menschlichen Partnern als auch zwischen Mensch und Roboter zu schaffen. Nur so kann eine Grundlage geschaffen werden, um technische Lösungen adäquat zu bewerten und auch entsprechende Standards für die technische Gestaltung festzulegen.

Die Kombination der Erkenntnisse aus Experiment II und der Literatur von Controzzi et al. (2018), Mason und Mackenzie (2005) sowie Chan et al. (2012) kann genutzt werden, um eine neuartige Sensorkombination mit dahinterliegender Software zu entwickeln, die noch natürlichere Objektübergaben ermöglicht. Nach Controzzi et al. (2018) führen schnellere Reichbewegung des Nehmers zu einer intensiveren Kollision mit dem Objekt und damit zu einem stärkeren haptischen Feedback, was zu einem schnelleren Loslassen des Gebers und damit in Summe zu einer kürzeren Übergabezeit führt. Nach den Theorien von Mason und Mackenzie (2005) sowie Chan et al. (2012) ist der Geber für die Sicherheit des Objekts verantwortlich, während der Nehmer die Effizienz des Objektaustauschs moduliert. Um eine Rollenverteilung in einem Robotersetup zu implementieren, bei der der Mensch die Effizienz des Austauschs gemäß Mason und Mackenzie (2005) und Chan et al. (2012) moduliert, könnten entweder Kameras eingesetzt werden, um die Geschwindigkeit der Reichbewegung zu erfassen und damit die Zeit bis zum Loslassen des Objekts zu steuern, wie es beim Menschen der Fall ist. Sollte eine kamerabasierte Geschwindigkeitserfassung nicht praktikabel sein, könnten Sensoren zur Kollisionsdetektion in den Roboter inte-

griert werden. Sensoren zur Kollisionsdetektion in Kombination mit kapazitiven Näherungssensoren bieten das Potenzial, sichere, schnelle und vom menschlichen Partner kontrollierte Übergaben durchzuführen. Der Kollisionsimpuls wird zur Steuerung der Loslasszeit genutzt, gleichzeitig muss der Schwellenwert der kapazitiven Näherungssensoren überschritten werden. Durch die Kombination dieser beiden Mechanismen, steuert der Mensch die Geschwindigkeit der Objektübergabe. Durch eine stärkere Kollision wird die Übergabe schneller ausgelöst, gleichzeitig gewährleistet die kapazitive Sensorik die Sicherheit der Übergabe und damit das sichere Greifen des Übergabeobjektes.

Das Forschungsfeld der direkten Objektübergabe wird in naher Zukunft weiter an Bedeutung für Forschung, Industrie und Gesellschaft gewinnen. Je weiter die Entwicklung von Hardware- und Software voranschreitet, um eine stärkere Durchdringung des Alltags durch Roboter zu realisieren, desto wichtiger werden Leitlinien für die Funktionsweise und den Betrieb von Robotern. Diese Arbeit trägt dazu bei, die funktionale Bewertung von Roboterverhalten voranzutreiben und damit eine Grundlage für ein harmonisches Miteinander von Mensch und Roboter zu schaffen.

8 Literaturverzeichnis

- Admoni, H., Dragan, A., Srinivasa, S. S. & Scassellati, B. (2014). Deliberate delays during robot-to-human handovers improve compliance with gaze communication. In G. Sagerer, M. Imai, T. Belpaeme & A. Thomaz (Hrsg.), *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction* (S. 49–56). ACM.
<https://doi.org/10.1145/2559636.2559682>
- Aglioti, S. M., Cesari, P., Romani, M. & Urgesi, C. (2008). Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature neuroscience*, *11*(9), 1109–1116. <https://doi.org/10.1038/nn.2182>
- Alagi, H., Navarro, S. E., Mende, M. & Hein, B. (2016). A versatile and modular capacitive tactile proximity sensor. In *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)* (S. 290–296). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2016.7463192>
- Aleotti, J., Micelli, V. & Caselli, S. (2012). Comfortable robot to human object hand-over. In *2012 IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (S. 771–776). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2012.6343845>
- Aly, A., Griffiths, S. & Stramandinoli, F. (2017). Metrics and benchmarks in human-robot interaction: Recent advances in cognitive robotics. *Cognitive Systems Research*, *43*, 313–323.
<https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2016.06.002>
- Aronson, R. M., Santini, T., Kübler, T. C., Kasneci, E., Srinivasa, S. S. & Admoni, H. (2018). Eye-Hand Behavior in Human-Robot Shared Manipulation. In T. Kanda, S. Šabanović, G. Hoffman & A. Tapus (Hrsg.), *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (S. 4–13). ACM.
<https://doi.org/10.1145/3171221.3171287>
- Ashby, W. R. (1956). *An introduction to cybernetics*. J. Wiley.
<https://doi.org/10.5962/bhl.title.5851>

- Atmaca, S., Sebanz, N., Prinz, W. & Knoblich, G. (2008). Action co-representation: the joint SNARC effect. *Social neuroscience*, 3(3-4), 410–420. <https://doi.org/10.1080/17470910801900908>
- Barker, S., Craik, R., Freedman, W., Herrmann, N. & Hillstrom, H. (2006). Accuracy, reliability, and validity of a spatiotemporal gait analysis system. *Medical engineering & physics*, 28(5), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2005.07.017>
- Barosz, P., Gołda, G. & Kampa, A. (2020). Efficiency Analysis of Manufacturing Line with Industrial Robots and Human Operators. *Applied Sciences*, 10(8), 2862. <https://doi.org/10.3390/app10082862>
- Basili, P., Huber, M., Brandt, T., Hirche, S. & Glasauer, S. (2009). Investigating Human-Human Approach and Hand-Over. In R. Dillmann, D. Vernon, Y. Nakamura, S. Schaal, H. Ritter, G. Sagerer & M. Buss (Hrsg.), *Cognitive Systems Monographs. Human Centered Robot Systems* (Bd. 6, S. 151–160). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10403-9_16
- Bayliss, A. P. & Tipper, S. P. (2005). Gaze and arrow cueing of attention reveals individual differences along the autism spectrum as a function of target context. *British journal of psychology (London, England : 1953)*, 96(Pt 1), 95–114. <https://doi.org/10.1348/000712604X15626>
- Becchio, C., Manera, V., Sartori, L., Cavallo, A. & Castiello, U. (2012). Grasping intentions: from thought experiments to empirical evidence. *Frontiers in human neuroscience*, 6, 117. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00117>
- Becchio, C., Sartori, L., Bulgheroni, M. & Castiello, U. (2008). The case of Dr. Jekyll and Mr. Hyde: a kinematic study on social intention. *Consciousness and cognition*, 17(3), 557–564. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.03.003>
- Belhassein, K., Fernández-Castro, V., Mayima, A., Clodic, A [Aurélien], Pacherie, E., Guidetti, M., Alami, R. & Cochet, H. (2022). Addressing joint action challenges in HRI: Insights from psychology and philosophy. *Acta psychologica*, 222, 103476. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2021.103476>

- Blakemore, S. J. & Decety, J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature reviews. Neuroscience*, 2(8), 561–567. <https://doi.org/10.1038/35086023>
- Böckler, A., Knoblich, G. & Sebanz, N. (2012). Effects of a coactor's focus of attention on task performance. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 38(6), 1404–1415. <https://doi.org/10.1037/a0027523>
- Bonci, A., Pirani, M. & Longhi, S. (2017). Robotics 4.0: Performance improvement made easy. In *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (S. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247682>
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S. & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological review*, 108(3), 624–652. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.108.3.624>
- Brand, T. K., Maurer, L. K., Müller, H., Döhring, F. R. & Joch, M. (2022). Predictability shapes movement kinematics and grip force regulation in human object handovers. *Human movement science*, 85, 102976. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2022.102976>
- Bratman, M. E. (1989). Intention and Personal Policies. *Philosophical Perspectives*, 3, 443. <https://doi.org/10.2307/2214277>
- Bratman, M. E. (1993). Shared Intention. *Ethics*, 104(1), 97–113. <https://doi.org/10.1086/293577>
- Brennan, S. E. & Hanna, J. E. (2009). Partner-specific adaptation in dialog. *Topics in cognitive science*, 1(2), 274–291. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01019.x>
- Bruijn, E. R. A. de, Lange, F. P. de, Cramon, D. Y. von & Ullsperger, M. (2009). When errors are rewarding. *The Journal of Neuroscience*, 29(39), 12183–12186. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1751-09.2009>
- Cakmak, M., Srinivasa, S. S., Lee, M. K., Kiesler, S. & Forlizzi, J. L. (2011). Using spatial and temporal contrast for fluent robot-human handovers. In A. Billard, P. Kahn, J. A. Adams & G. Trafton (Hrsg.), *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction* (S. 489–496). ACM. <https://doi.org/10.1145/1957656.1957823>

- Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grèzes, J., Passingham, R. E. & Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 15(8), 1243–1249. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi007>
- Capozzi, F., Becchio, C., Garbarini, F., Savazzi, S. & Pia, L. (2016). Temporal perception in joint action: This is MY action. *Consciousness and cognition*, 40, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.12.004>
- Carpenter, M. (2009). Just how joint is joint action in infancy? *Topics in cognitive science*, 1(2), 380–392. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01026.x>
- Carse, B., Meadows, B., Bowers, R. & Rowe, P. (2013). Affordable clinical gait analysis: an assessment of the marker tracking accuracy of a new low-cost optical 3D motion analysis system. *Physiotherapy*, 99(4), 347–351. <https://doi.org/10.1016/j.physio.2013.03.001>
- Castiello, U. (2003). Understanding other people's actions: intention and attention. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 29(2), 416–430. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.2.416>
- Chan, W. P., Parker, C. A. C., van der Loos, H. F. M. & Croft, E. A. (2012). Grip forces and load forces in handovers. In H. Yanco, A. Steinfeld, V. Evers & O. C. Jenkins (Hrsg.), *Proceedings of the seventh annual ACM/IEEE international conference on Human-Robot Interaction* (S. 9–16). ACM. <https://doi.org/10.1145/2157689.2157692>
- Chan, W. P., Parker, C. A. C., van der Loos, H. F. M. & Croft, E. A. (2013). A human-inspired object handover controller. *The International Journal of Robotics Research*, 32(8), 971–983. <https://doi.org/10.1177/0278364913488806>
- Ciardo, F., Lugli, L., Nicoletti, R., Rubichi, S. & Iani, C. (2016). Action-space coding in social contexts. *Scientific reports*, 6, 22673. <https://doi.org/10.1038/srep22673>
- Clark, H. H. (1996). *Using language* (9th printing). Cambridge University Press.

- Clark, H. H. & Krych, M. A. (2004). Speaking while monitoring addressees for understanding. *Journal of Memory and Language*, 50(1), 62–81. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2003.08.004>
- Controzzi, M., Singh, H., Cini, F., Cecchini, T., Wing, A. M. & Cipriani, C. (2018). Humans adjust their grip force when passing an object according to the observed speed of the partner's reaching out movement. *Experimental brain research*, 236(12), 3363–3377. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5381-5>
- Cosgun, A., Trevor, A. J. B. & Christensen, H. I. (2015). Did you Mean this Object? Detecting Ambiguity in Pointing Gesture Targets. In *Proceedings ACM/IEEE Int. Conf. Human-Robot Interact.: Workshop Towards Framework Joint Action*.
- Cross, E. S., Hamilton, A. F. d. C. & Grafton, S. T. (2006). Building a motor simulation de novo: observation of dance by dancers. *NeuroImage*, 31(3), 1257–1267. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.01.033>
- Davidson, P. R. & Wolpert, D. M. (2005). Widespread access to predictive models in the motor system: a short review. *Journal of neural engineering*, 2(3), S313–9. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/2/3/S11>
- De Jaegher, H., Di Paolo, E. & Gallagher, S. (2010). Can social interaction constitute social cognition? *Trends in cognitive sciences*, 14(10), 441–447. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.06.009>
- Decety, J. & Grèzes, J. (2006). The power of simulation: imagining one's own and other's behavior. *Brain research*, 1079(1), 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.12.115>
- Dehais, F., Sisbot, E. A., Alami, R. & Causse, M. (2011). Physiological and subjective evaluation of a human-robot object hand-over task. *Applied ergonomics*, 42(6), 785–791. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.12.005>
- Diedrichsen, J., White, O., Newman, D. & Lally, N. (2010). Use-dependent and error-based learning of motor behaviors. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 30(15), 5159–5166. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5406-09.2010>
- DIN EN ISO 14738. *DIN EN ISO 14738:2009-07, Sicherheit von Maschinen - Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschi-*

nenarbeitsplätzen (ISO_14738:2002_+ Cor._1:2003_+ Cor._2:2005); Deutsche Fassung EN_ISO_14738:2008. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

- Döhring, F. R., Müller, H. & Joch, M. (2020). Grip-force modulation in human-to-human object handovers: effects of sensory and kinematic manipulations. *Scientific reports*, *10*(1), 22381. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79129-w>
- Emery, N. J. (2000). The eyes have it: the neuroethology, function and evolution of social gaze. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, *24*(6), 581–604. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(00\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(00)00025-7)
- Endo, S., Pegman, G., Burgin, M., Toumi, T. & Wing, A. M. (2012). Haptics in Between-Person Object Transfer. In D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, P. Isokoski & J. Springare (Hrsg.), *Lecture Notes in Computer Science. Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication* (Bd. 7282, S. 103–111). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31401-8_10
- Ernst, M. O. & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, *415*(6870), 429–433. <https://doi.org/10.1038/415429a>
- Faisal, A. A., Selen, L. P. J. & Wolpert, D. M. (2008). Noise in the nervous system. *Nature reviews. Neuroscience*, *9*(4), 292–303. <https://doi.org/10.1038/nrn2258>
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S. & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological psychology*, *51*(2-3), 87–107. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(99\)00031-9](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(99)00031-9)
- Fiebich, A. & Gallagher, S. (2013). Joint attention in joint action. *Philosophical Psychology*, *26*(4), 571–587. <https://doi.org/10.1080/09515089.2012.690176>
- Field, A., Miles, J. & Field, Z. (2014). *Discovering statistics using R* (Repr). SAGE Publ.

- Flanagan, J. R. & Johansson, R. S. (2003). Action plans used in action observation. *Nature*, 424(6950), 769–771.
<https://doi.org/10.1038/nature01861>
- Fogassi, L. & Luppino, G. (2005). Motor functions of the parietal lobe. *Current opinion in neurobiology*, 15(6), 626–631.
<https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.10.015>
- Forsa. Politik- und Sozialforschung GmbH. (2016). *Service-Robotik: Mensch-Technik-Interaktion im Alltag: Ergebnisse einer repräsentativen Befragung*.
https://www.bmbf.de/files/BMBF_forsa_Robotik_FINAL2016.pdf.
- Franklin, D. W. & Wolpert, D. M. (2011). Computational mechanisms of sensorimotor control. *Neuron*, 72(3), 425–442.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.006>
- Frischen, A. & Tipper, S. P. (2004). Orienting attention via observed gaze shift evokes longer term inhibitory effects: implications for social interactions, attention, and memory. *Journal of experimental psychology. General*, 133(4), 516–533. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.4.516>
- Gallese, V., Keysers, C. & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in cognitive sciences*, 8(9), 396–403.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.07.002>
- Gharbi, M., Paubel, P.-V., Clodic, A [Aurelie], Carreras, O., Alami, R. & Cellier, J.-M. (2015). Toward a better understanding of the communication cues involved in a human-robot object transfer. In *2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)* (S. 319–324). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ROMAN.2015.7333626>
- Gilbert, M. (1989). *On Social Facts*. Princeton University Press.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv10vm20z>
- Glasauer, S., Huber, M., Basili, P., Knoll, A. & Brandt, T. (2010). Interacting in time and space: Investigating human-human and human-robot joint action. In *19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication* (S. 252–257). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ROMAN.2010.5598638>

- Glaser, A. (2009). *Industrial robotics: Practical applications for implementing robotic automation*. Industrial Press.
- Gonzalez, D. A., Studenka, B. E., Glazebrook, C. M. & Lyons, J. L. (2011). Extending end-state comfort effect: do we consider the beginning state comfort of another? *Acta psychologica*, 136(3), 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.12.009>
- Goodrich, M. A. & Schultz, A. C. (2007). Human-Robot Interaction: A Survey. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 1(3), 203–275. <https://doi.org/10.1561/1100000005>
- Graf, M., Reitzner, B., Corves, C., Casile, A., Giese, M. & Prinz, W. (2007). Predicting point-light actions in real-time. *NeuroImage*, 36 Suppl 2, T22–32. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.017>
- Grigore, E. C., Eder, K., Pipe, A. G., Melhuish, C. & Leonards, U. (2013). Joint action understanding improves robot-to-human object handover. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (S. 4622–4629). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6697021>
- Grush, R. (2004). The emulation theory of representation: motor control, imagery, and perception. *The Behavioral and brain sciences*, 27(3), 377–96; discussion 396–442. <https://doi.org/10.1017/s0140525x04000093>
- Harrison, S. J. & Richardson, M. J. (2009). Horsing around: spontaneous four-legged coordination. *Journal of motor behavior*, 41(6), 519–524. <https://doi.org/10.3200/35-08-014>
- Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological research*, 73(4), 512–526. <https://doi.org/10.1007/s00426-009-0234-2>
- Hommel, B. (2019). Theory of Event Coding (TEC) V2.0: Representing and controlling perception and action. *Attention, perception & psychophysics*, 81(7), 2139–2154. <https://doi.org/10.3758/s13414-019-01779-4>
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G. & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a framework for perception and action planning. *The Behavioral and brain sciences*, 24(5), 849–78; discussion 878–937. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01000103>

- Hossner, E.-J., Müller, H. & Voelcker-Rehage, C. (2013). Koordination sportlicher Bewegungen - Sportmotorik. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Sport: Das Lehrbuch für das Sportstudium* (S. 211–267). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37546-0_8
- Huber, M., Knoll, A., Brandt, T. & Glasauer, S. (2009). Handing over a cube: spatial features of physical joint-action. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1164, 380–382. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2008.03743.x>
- Huber, M., Rickert, M., Knoll, A., Brandt, T. & Glasauer, S. (2008). Human-robot interaction in handing-over tasks. In *RO-MAN 2008 - The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (S. 107–112). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2008.4600651>
- Iacoboni, M., Molnar-Szakacs, I., Gallese, V., Buccino, G., Mazziotta, J. C. & Rizzolatti, G. (2005). Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS biology*, 3(3), e79. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0030079>
- Ikegami, T. & Ganesh, G. (2017). Shared Mechanisms in the Estimation of Self-Generated Actions and the Prediction of Other's Actions by Humans. *eNeuro*, 4(6). <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0341-17.2017>
- Innocenti, A., Stefani, E. de, Bernardi, N. F., Campione, G. C. & Gentilucci, M. (2012). Gaze direction and request gesture in social interactions. *PloS one*, 7(5), e36390. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036390>
- Izawa, J., Rane, T., Donchin, O. & Shadmehr, R. (2008). Motor adaptation as a process of reoptimization. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 28(11), 2883–2891. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5359-07.2008>
- Jeannerod, M. (2004). Actions from within. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 2(4), 376–402. <https://doi.org/10.1080/1612197X.2004.9671752>

- Jeannerod, M. & Frak, V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current opinion in neurobiology*, 9(6), 735–739.
[https://doi.org/10.1016/s0959-4388\(99\)00038-0](https://doi.org/10.1016/s0959-4388(99)00038-0)
- Johansson, R. S., Häger, C. & Riso, R. (1992). Somatosensory control of precision grip during unpredictable pulling loads. II. Changes in load force rate. *Experimental brain research*, 89(1), 192–203.
<https://doi.org/10.1007/BF00229016>
- Johansson, R. S., Westling, G., Bäckström, A. & Flanagan, J. R. (2001). Eye-hand coordination in object manipulation. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 21(17), 6917–6932. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.21-17-06917.2001>
- Jordan, M. I. & Rumelhart, D. E. (1992). Forward models: Supervised learning with a distal teacher. *Cognitive Science*, 16(3), 307–354.
[https://doi.org/10.1016/0364-0213\(92\)90036-T](https://doi.org/10.1016/0364-0213(92)90036-T)
- Käppler, M., Deml, B., Stein, T., Nagl, J. & Steingrebe, H. (2021). The Importance of Feedback for Object Hand-Overes Between Human and Robot. In T. Ahram, R. Taiar, K. Langlois & A. Choplin (Hrsg.), *Advances in Intelligent Systems and Computing. Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications III* (Bd. 1253, S. 29–35). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-55307-4_5
- Kato, S., Yamanobe, N., Venture, G., Yoshida, E. & Ganesh, G. (2019). The where of handovers by humans: Effect of partner characteristics, distance and visual feedback. *PloS one*, 14(6), e0217129.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217129>
- Kawai, S., Mackenzie, C. L., Ivens, C. J. & Yamamoto, T. (2001). Worst-case prediction strategy in force programming when visual information is obstructed. *Perceptual and motor skills*, 92(3 Pt 2), 1099–1108. <https://doi.org/10.2466/pms.2001.92.3c.1099>
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current opinion in neurobiology*, 9(6), 718–727.
[https://doi.org/10.1016/s0959-4388\(99\)00028-8](https://doi.org/10.1016/s0959-4388(99)00028-8)
- Knoblich, G., Butterfill, S. & Sebanz, N. (2011). Psychological Research on Joint Action. In *Psychology of Learning and Motivation. Advances*

- in *Research and Theory* (Bd. 54, S. 59–101). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385527-5.00003-6>
- Knoblich, G. & Flach, R. (2003). Action identity: evidence from self-recognition, prediction, and coordination. *Consciousness and cognition*, 12(4), 620–632. [https://doi.org/10.1016/S1053-8100\(03\)00070-9](https://doi.org/10.1016/S1053-8100(03)00070-9)
- Knoblich, G. & Jordan, J. S. (2002). The mirror system and joint action. In M. I. Stamenov & V. Gallese (Hrsg.), *Advances in Consciousness Research. Mirror Neurons and the Evolution of Brain and Language* (Bd. 42, S. 115–124). John Benjamins Publishing Company.
<https://doi.org/10.1075/aicr.42.10kno>
- Knoblich, G. & Jordan, J. S. (2003). Action coordination in groups and individuals: learning anticipatory control. *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, 29(5), 1006–1016.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393.29.5.1006>
- Knoblich, G. & Sebanz, N. (2008). Evolving intentions for social interaction: from entrainment to joint action. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 363(1499), 2021–2031. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0006>
- Koene, A., Remazeilles, A., Prada, M., Garzo, A., Puerto, M., Endo, S. & Wing, A. M. (2014). Relative importance of spatial and temporal precision for user satisfaction in Human-Robot object handover Interactions. *AISB 2014 - 50th Annual Convention of the AISB*.
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M. A., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science (New York, N.Y.)*, 297(5582), 846–848. <https://doi.org/10.1126/science.1070311>
- Konczak, J. (2003). Neurophysiologische Grundlagen der Motorik. In J. Munzert, H. Mechling & K. Blischke (Hrsg.), *Beiträge zur Lehre und Forschung im Sport: Bd. 141. Handbuch Bewegungswissenschaft - Bewegungslehre* (S. 81–104). Hofmann.
- Kourtis, D., Knoblich, G., Woźniak, M. & Sebanz, N. (2014). Attention allocation and task representation during joint action planning. *Journal of cognitive neuroscience*, 26(10), 2275–2286.
https://doi.org/10.1162/jocn_a_00634

- Krakauer, J. W., Hadjiosif, A. M., Xu, J., Wong, A. L. & Haith, A. M. (2019). Motor Learning. *Comprehensive Physiology*, 9(2), 613–663. <https://doi.org/10.1002/cphy.c170043>
- Krakauer, J. W. & Mazzoni, P. (2011). Human sensorimotor learning: adaptation, skill, and beyond. *Current opinion in neurobiology*, 21(4), 636–644. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2011.06.012>
- Lalazar, H. & Vaadia, E. (2008). Neural basis of sensorimotor learning: modifying internal models. *Current opinion in neurobiology*, 18(6), 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.11.003>
- Lee, M. K., Forlizzi, J. L., Kiesler, S., Cakmak, M. & Srinivasa, S. S. (2011). Predictability or adaptivity? In A. Billard, P. Kahn, J. A. Adams & G. Trafton (Hrsg.), *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction* (S. 179–180). ACM. <https://doi.org/10.1145/1957656.1957720>
- Leichtmann, B., Nitsch, V. & Mara, M. (2022). Crisis Ahead? Why Human-Robot Interaction User Studies May Have Replicability Problems and Directions for Improvement. *Frontiers in robotics and AI*, 9, 838116. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.838116>
- Loula, F., Prasad, S., Harber, K. & Shiffrar, M. (2005). Recognizing people from their movement. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 31(1), 210–220. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.1.210>
- Mackenzie, C. L. & Iberall, T. (1994). *The grasping hand. Advances in psychology: Bd. 104*. North-Holland.
- Magill, R. A. (2007). *Motor learning and control: Concepts and applications* (8th ed.). *McGraw-Hill International Edition*. McGraw-Hill.
- Malfait, N., Valyear, K. F., Culham, J. C., Anton, J.-L., Brown, L. E. & Gribble, P. L. (2010). fMRI activation during observation of others' reach errors. *Journal of cognitive neuroscience*, 22(7), 1493–1503. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21281>
- Mamaev, I., Kretsch, D., Alagi, H. & Hein, B. (2021). Grasp Detection for Robot to Human Handovers Using Capacitive Sensors. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (S. 12552–12558). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9560970>

- Marsh, K. L., Richardson, M. J. & Schmidt, R. C. (2009). Social connection through joint action and interpersonal coordination. *Topics in cognitive science*, 1(2), 320–339. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01022.x>
- Mason, A. H. & Mackenzie, C. L. (2005). Grip forces when passing an object to a partner. *Experimental brain research*, 163(2), 173–187. <https://doi.org/10.1007/s00221-004-2157-x>
- Masumoto, J. & Inui, N. (2014). Effects of speech on both complementary and synchronous strategies in joint action. *Experimental brain research*, 232(7), 2421–2429. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-3941-x>
- Merten, K. (1977). *Kommunikation: Eine Begriffs- und Prozeßanalyse. Studien zur Sozialwissenschaft*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Meyer, M., van der Wel, R. P. R. D. & Hunnius, S. (2013). Higher-order action planning for individual and joint object manipulations. *Experimental brain research*, 225(4), 579–588. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3398-8>
- Moon, A., Troniak, D. M., Gleeson, B., Pan, M. K., Zheng, M., Blumer, B. A., MacLean, K. & Croft, E. A. (2014). Meet me where i'm gazing. In G. Sagerer, M. Imai, T. Belpaeme & A. Thomaz (Hrsg.), *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction* (S. 334–341). ACM. <https://doi.org/10.1145/2559636.2559656>
- Mutlu, B. (2009). *Designing Gaze Behavior for Humanlike Robots*. Carnegie Mellon University.
- Neal, A. & Kilner, J. M. (2010). What is simulated in the action observation network when we observe actions? *The European journal of neuroscience*, 32(10), 1765–1770. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2010.07435.x>
- Néda, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Vicsek, T. & Barabási, A. L. (2000). The sound of many hands clapping. *Nature*, 403(6772), 849–850. <https://doi.org/10.1038/35002660>
- Newman-Norlund, R. D., Ganesh, S., van Schie, H. T., Bruijn, E. R. A. de & Bekkering, H. (2009). Self-identification and empathy modulate error-related brain activity during the observation of penalty shots be-

- tween friend and foe. *Social cognitive and affective neuroscience*, 4(1), 10–22. <https://doi.org/10.1093/scan/nsn028>
- Ogenyi, U. E., Liu, J., Yang, C., Ju, Z. & Liu, H. (2021). Physical Human-Robot Collaboration: Robotic Systems, Learning Methods, Collaborative Strategies, Sensors, and Actuators. *IEEE transactions on cybernetics*, 51(4), 1888–1901. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2019.2947532>
- Ortenzi, V., Cosgun, A., Pardi, T., Chan, W. P., Croft, E. A. & Kulic, D. (2021). Object Handovers: A Review for Robotics. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(6), 1855–1873. <https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3075365>
- Oullier, O., Guzman, G. C. de, Jantzen, K. J., Lagarde, J. & Kelso, J. A. S. (2008). Social coordination dynamics: measuring human bonding. *Social neuroscience*, 3(2), 178–192. <https://doi.org/10.1080/17470910701563392>
- Pacherie, E. & Dokic, J. (2006). From mirror neurons to joint actions. *Cognitive Systems Research*, 7(2-3), 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2005.11.012>
- Pan, M. K., Croft, E. A. & Niemeyer, G. (2018). Evaluating Social Perception of Human-to-Robot Handovers Using the Robot Social Attributes Scale (RoSAS). In T. Kanda, S. Šabanović, G. Hoffman & A. Tapus (Hrsg.), *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (S. 443–451). ACM. <https://doi.org/10.1145/3171221.3171257>
- Pezzulo, G. & Dindo, H. (2011). What should I do next? Using shared representations to solve interaction problems. *Experimental brain research*, 211(3-4), 613–630. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2712-1>
- Pezzulo, G. & Dindo, H. (2013). Intentional strategies that make co-actors more predictable: the case of signaling. *The Behavioral and brain sciences*, 36(4), 371–372. <https://doi.org/10.1017/S0140525X12002816>
- Pezzulo, G., Donnarumma, F. & Dindo, H. (2013). Human sensorimotor communication: a theory of signaling in online social interactions.

- PloS one*, 8(11), e79876.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079876>
- Powers, W. T. (1973). *Behavior: The control of perception*. Aldine.
- Prinz, W. (1997). Perception and Action Planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(2), 129–154.
<https://doi.org/10.1080/713752551>
- Rabbitt, P. M. (1966). Errors and error correction in choice-response tasks. *Journal of experimental psychology*, 71(2), 264–272.
<https://doi.org/10.1037/h0022853>
- Ray, M. & Welsh, T. N. (2011). Response selection during a joint action task. *Journal of motor behavior*, 43(4), 329–332.
<https://doi.org/10.1080/00222895.2011.592871>
- Ray, M. & Welsh, T. N. (2018). Multiple Frames of Reference Are Used During the Selection and Planning of a Sequential Joint Action. *Frontiers in psychology*, 9, 542.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00542>
- Repp, B. H. & Knoblich, G. (2004). Perceiving action identity: how pianists recognize their own performances. *Psychological science*, 15(9), 604–609. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00727.x>
- Richards, J. G. (1999). The measurement of human motion: A comparison of commercially available systems. *Human movement science*, 18(5), 589–602. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(99\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(99)00023-8)
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R. L. & Schmidt, R. C. (2007). Rocking together: dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human movement science*, 26(6), 867–891. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.07.002>
- Rizzolatti, G. & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual review of neuroscience*, 27, 169–192.
<https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>
- Rizzolatti, G., Fogassi, L. & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature reviews. Neuroscience*, 2(9), 661–670.
<https://doi.org/10.1038/35090060>
- Rizzolatti, G. & Sinigaglia, C. (2010). The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. *Nature*

- reviews. *Neuroscience*, 11(4), 264–274.
<https://doi.org/10.1038/nrn2805>
- Robertson, D. G. E., Caldwell, G. E., Hamill, J., Kamen, G. & Whittlesey, S. N. (2013). *Research methods in biomechanics* (2nd ed.). Human Kinetics.
- Rosenbaum, D. A. (1991). *Human motor control* [Nachdr.]. Acad. Press.
- Rosenbaum, D. A., Chapman, K. M., Weigelt, M., Weiss, D. J. & van der Wel, R. P. R. D. (2012). Cognition, action, and object manipulation. *Psychological bulletin*, 138(5), 924–946.
<https://doi.org/10.1037/a0027839>
- Sacheli, L. M., Arcangeli, E. & Paulesu, E. (2018). Evidence for a dyadic motor plan in joint action. *Scientific reports*, 8(1), 5027.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-23275-9>
- Sacheli, L. M., Tidoni, E., Pavone, E. F., Aglioti, S. M. & Candidi, M. (2013). Kinematics fingerprints of leader and follower role-taking during cooperative joint actions. *Experimental brain research*, 226(4), 473–486. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3459-7>
- Samson, D., Apperly, I. A., Braithwaite, J. J., Andrews, B. J. & Bodley Scott, S. E. (2010). Seeing it their way: evidence for rapid and involuntary computation of what other people see. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 36(5), 1255–1266. <https://doi.org/10.1037/a0018729>
- Sartori, L., Becchio, C., Bara, B. G. & Castiello, U. (2009). Does the intention to communicate affect action kinematics? *Consciousness and cognition*, 18(3), 766–772.
<https://doi.org/10.1016/j.concog.2009.06.004>
- Sartori, L., Straulino, E. & Castiello, U. (2011). How objects are grasped: the interplay between affordances and end-goals. *PloS one*, 6(9), e25203. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025203>
- Schmider, E., Ziegler, M., Danay, E., Beyer, L. & Böhner, M. (2010). Is It Really Robust? *Methodology*, 6(4), 147–151.
<https://doi.org/10.1027/1614-2241/a000016>
- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (2011). *Motor control and learning: A behavioral emphasis* (5. ed.). Human Kinetics.

- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (2014). *Motor learning and performance: From principles to application* (5. ed.). Human Kinetics.
- Schmidt, R. C., Fitzpatrick, P., Caron, R. & Mergeche, J. (2011). Understanding social motor coordination. *Human movement science*, 30(5), 834–845. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.014>
- Schmidt, R. C. & Richardson, M. J. (2008). Dynamics of Interpersonal Coordination. In A. Fuchs & V. K. Jirsa (Hrsg.), *Understanding Complex Systems. Coordination: Neural, Behavioral and Social Dynamics* (S. 281–308). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74479-5_14
- Schuch, S. & Tipper, S. P. (2007). On observing another person's actions: influences of observed inhibition and errors. *Perception & psychophysics*, 69(5), 828–837. <https://doi.org/10.3758/bf03193782>
- Scorolli, C., Miatton, M., Wheaton, L. A. & Borghi, A. M. (2014). I give you a cup, I get a cup: a kinematic study on social intention. *Neuropsychologia*, 57, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.03.006>
- Scott, S. H. (2004). Optimal feedback control and the neural basis of volitional motor control. *Nature reviews. Neuroscience*, 5(7), 532–546. <https://doi.org/10.1038/nrn1427>
- Searle, J. R. (1990). Collective Intentions and Actions. In Philip R. Cohen Jerry Morgan & M. Pollack (Hrsg.), *Intentions in Communication* (S. 401–415). MIT Press.
- Searle, J. R. (1995). *The construction of social reality* (3. printing). Free Press.
- Sebanz, N., Bekkering, H. & Knoblich, G. (2006). Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in cognitive sciences*, 10(2), 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.12.009>
- Sebanz, N. & Knoblich, G. (2009). Prediction in joint action: what, when, and where. *Topics in cognitive science*, 1(2), 353–367. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01024.x>
- Sebanz, N., Knoblich, G. & Prinz, W. (2003). Representing others' actions: just like one's own? *Cognition*, 88(3), B11–21. [https://doi.org/10.1016/s0010-0277\(03\)00043-x](https://doi.org/10.1016/s0010-0277(03)00043-x)

- Sebanz, N., Knoblich, G. & Prinz, W. (2005). How two share a task: corepresenting stimulus-response mappings. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 31(6), 1234–1246. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.6.1234>
- Shadmehr, R. & Wise, S. P. (2005). *The computational neurobiology of reaching and pointing: A foundation for motor learning*. Computational neuroscience. Mass.; MIT Press.
- Shibata, S., Tanaka, K. & Shimizu, A. (1995). Experimental analysis of handing over. In *Proceedings 4th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication* (S. 53–58). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.1995.531934>
- Shintel, H. & Keysar, B. (2009). Less is more: a minimalist account of joint action in communication. *Topics in cognitive science*, 1(2), 260–273. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01018.x>
- Shockley, K. & Riley, M. A. (2015). Interpersonal Couplings in Human Interactions. In Webber, Jr., Charles L. & N. Marwan (Hrsg.), *Recurrence Quantification Analysis: Theory and Best Practices* (S. 399–421). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07155-8_14
- Shockley, K., Santana, M.-V. & Fowler, C. A. (2003). Mutual interpersonal postural constraints are involved in cooperative conversation. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 29(2), 326–332. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.2.326>
- Short, M. W. & Cauraugh, J. H. (1999). Precision hypothesis and the end-state comfort effect. *Acta psychologica*, 100(3), 243–252. [https://doi.org/10.1016/s0001-6918\(98\)00020-1](https://doi.org/10.1016/s0001-6918(98)00020-1)
- Shumway-Cook, A. & Woollacott, M. H. (2017). *Motor control: Translating research into clinical practice* (Fifth edition). Wolters Kluwer.
- Spivey, M. (2007). *The continuity of mind*. Oxford University Press.
- Steinfeld, A., Fong, T., Kaber, D., Lewis, M., Scholtz, J., Schultz, A. C. & Goodrich, M. A. (2006). Common metrics for human-robot interaction. In M. A. Goodrich, A. C. Schultz & D. J. Bruemmer (Hrsg.), *Proceeding of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction - HRI '06* (S. 33). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1121241.1121249>

- Strabala, K. W., Lee, M. K., Dragan, A. D., Forlizzi, J. L. & Srinivasa, S. S. (2012). Learning the communication of intent prior to physical collaboration. In *2012 IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (S. 968–973). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2012.6343875>
- Strabala, K. W., Lee, M. K., Dragan, A. D., Forlizzi, J. L., Srinivasa, S. S., Cakmak, M. & Micelli, V. (2013). Towards Seamless Human-Robot Handovers. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2(1), 112–132. <https://doi.org/10.5898/JHRI.2.1.Strabala>
- Tollefsen, D. (2005). Let's Pretend! *Philosophy of the Social Sciences*, 35(1), 75–97. <https://doi.org/10.1177/0048393104271925>
- Tomasello, M. (1995). Joint attention as social cognition. In C. Moore & P. J. Dunham (Hrsg.), *Joint attention: Its origins and role in development*. Psychology Press.
- Tomasello, M., Carpenter, M., Call, J., Behne, T. & Moll, H. (2005). Understanding and sharing intentions: the origins of cultural cognition. *The Behavioral and brain sciences*, 28(5), 675-91; discussion 691-735. <https://doi.org/10.1017/S0140525X05000129>
- Tsai, C.-C., Kuo, W.-J., Jing, J.-T., Hung, D. L. & Tzeng, O. J.-L. (2006). A common coding framework in self-other interaction: evidence from joint action task. *Experimental brain research*, 175(2), 353–362. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0557-9>
- Tuomela, R. (1996). *The importance of us: A philosophical study of basic social notions*. *Stanford series in philosophy*. Stanford University Press.
- Umiltà, M. A., Kohler, E., Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., Keysers, C. & Rizzolatti, G. (2001). I know what you are doing. a neurophysiological study. *Neuron*, 31(1), 155–165. [https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(01\)00337-3](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(01)00337-3)
- van der Wel, R. P. R. D., Becchio, C., Curioni, A. & Wolf, T. (2021). Understanding joint action: Current theoretical and empirical approaches. *Acta psychologica*, 215, 103285. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2021.103285>
- van Schie, H. T., Mars, R. B., Coles, M. G. H. & Bekkering, H. (2004). Modulation of activity in medial frontal and motor cortices during

- error observation. *Nature neuroscience*, 7(5), 549–554.
<https://doi.org/10.1038/nn1239>
- Verfaillie, K. & Daems, A. (2002). Representing and anticipating human actions in vision. *Visual Cognition*, 9(1-2), 217–232.
<https://doi.org/10.1080/13506280143000403>
- Vesper, C. (2020). Interpersonale Koordination. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit* (S. 1–19). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53386-4_65-1
- Vesper, C., Butterfill, S., Knoblich, G. & Sebanz, N. (2010). A minimal architecture for joint action. *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, 23(8-9), 998–1003.
<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2010.06.002>
- Vesper, C. & Richardson, M. J. (2014). Strategic communication and behavioral coupling in asymmetric joint action. *Experimental brain research*, 232(9), 2945–2956. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-3982-1>
- Vesper, C., van der Wel, R. P. R. D., Knoblich, G. & Sebanz, N. (2011). Making oneself predictable: reduced temporal variability facilitates joint action coordination. *Experimental brain research*, 211(3-4), 517–530. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2706-z>
- Wahn, B. & König, P. (2015). Vision and Haptics Share Spatial Attentional Resources and Visuotactile Integration Is Not Affected by High Attentional Load. *Multisensory research*, 28(3-4), 371–392.
<https://doi.org/10.1163/22134808-00002482>
- Wahn, B. & König, P. (2016). Attentional Resource Allocation in Visuotactile Processing Depends on the Task, But Optimal Visuotactile Integration Does Not Depend on Attentional Resources. *Frontiers in integrative neuroscience*, 10, 13.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2016.00013>
- Wiener, N. (1948). CYBERNETICS. *Scientific American*, 179(5), 14–19.
<http://www.jstor.org/stable/24945913>
- Wilcox, R. (2012). Introduction. In *Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing* (S. 1–22). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386983-8.00001-9>

- Wilson, M. & Knoblich, G. (2005). The case for motor involvement in perceiving conspecifics. *Psychological bulletin*, 131(3), 460–473. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.3.460>
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470549148>
- Wolpert, D. M., Diedrichsen, J. & Flanagan, J. R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nature reviews. Neuroscience*, 12(12), 739–751. <https://doi.org/10.1038/nrn3112>
- Wolpert, D. M., Doya, K. & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 358(1431), 593–602. <https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1238>
- Wolpert, D. M. & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature neuroscience*, 3 Suppl, 1212–1217. <https://doi.org/10.1038/81497>
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z. & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science (New York, N.Y.)*, 269(5232), 1880–1882. <https://doi.org/10.1126/science.7569931>
- Wolpert, D. M., Keir, G. & Ghez, C. (2013). The organization and planning of movement. In E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell, S. A. Siegelbaum, Hudspeth & A. J. (Hrsg.), *Principles of Neural Science* (5th Edition, S. 743–767). McGraw-Hill Education.
- Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C.-L. & Grundmann, M. (2020, 18. Juni). *MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking*. <http://arxiv.org/pdf/2006.10214v1>

Roboter, die sichere, schnelle und flüssige Objektübergaben mit Menschen durchführen, sind zentral für die Zukunft von Industrie und Gesundheitswesen. Ein tiefes Verständnis der zugrunde liegenden motorischen und kognitiven Prozesse ist notwendig, um Metriken zur objektiven Bewertung der Übergabeleistung zu entwickeln. In dieser Arbeit werden Objektübergaben zwischen Menschen sowie zwischen Robotern und Menschen untersucht, um eine fundierte Bewertungsgrundlage zu schaffen. Analysiert werden die physische Übergabezeit sowie der Einfluss von Objekteigenschaften und menschlichen Wahrnehmungseinschränkungen. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Faktoren einen signifikanten Einfluss auf die Übergabezeit und -qualität haben. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen die Entwicklung von sichereren und effizienteren Mensch-Roboter-Interaktionen unterstützen und die Anpassungsfähigkeit von Robotersystemen an menschliche Bedürfnisse verbessern, was für die Zukunft der kollaborativen Robotik entscheidend ist.