ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Langer, Dorothea et al.

Article — Published Version

Greif zu – Entwicklung einer Greifstrategie für robotergestützte Objektübergaben mit und ohne Sichtkontakt

Zeitschrift für Arbeitswissenschaft

Provided in Cooperation with:
Springer Nature

Suggested Citation: Langer, Dorothea et al. (2023) : Greif zu – Entwicklung einer Greifstrategie für robotergestützte Objektübergaben mit und ohne Sichtkontakt, Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, ISSN 2366-4681, Springer, Berlin, Heidelberg, Vol. 77, Iss. 2, pp. 297-316, https://doi.org/10.1007/s41449-023-00366-6

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/309861

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (2023) 77:297–316
https://doi.org/10.1007/s41449-023-00366-6

WISSENSCHAFTLICHE BEITRÄGE

Greif zu – Entwicklung einer Greifstrategie für robotergestützte Objektübergaben mit und ohne Sichtkontakt

Dorothea Langer[1] · Franziska Legler[1] · Sebastian Krusche[2] · Mohamad Bdiwi[2] · Selina Palige[1] · Angelika C. Bullinger[1]

Angenommen: 14. April 2023 / Online publiziert: 30. Mai 2023
© Der/die Autor(en) 2023

Zusammenfassung

Robotergestützte Objektübergaben setzen derzeit Sichtkontakt des Roboters mit dem menschlichen Interaktionspartner voraus. Barrierefreie Anwendungsszenarien, z. B. bei Sichtverdeckung im Fertigungsprozess, erfordern jedoch Lösungen ohne Sichtkontakt. In der vorliegenden Studie wurden dazu zwei Ansätze zur Entwicklung einer sicheren Greifstrategie für die Übergabe von Alltagsobjekten (mit und ohne potenziellem Verletzungsrisiko) erarbeitet und in einer Nutzerstudie mit sehenden sowie verblindeten Probanden überprüft. Die entwickelten Greifstrategien ermöglichten über alle Objekte hinweg in 97–99 % der Fälle eine erfolgreiche und sichere Objektübernahme durch den Menschen. Der Erfolg der Objektrückgabe an den Roboter war geringer und stark abhängig vom überreichten Objekt. Einfachheit, Komfort und Sicherheit wurden positiv wahrgenommen, wobei die Bewertung sehender Probanden signifikant positiver war. Die Studie erlaubt die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen für die barrierefreie robotergestützte Objektübergabe ohne Sichtkontakt.

Praktische Relevanz: Die vorgestellte Studie stellt ein Vorgehen zur Entwicklung von Greifstrategien für die barrierefreie robotergestützte Objektübergabe, auch für Objekte mit potenziellem Verletzungsrisiko, ohne Sichtkontakt vor. Die positiven Ergebnisse in deren anschließender Bewertung durch Nutzer mit und ohne Sichtkontakt bekräftigen die sichere Anwendbarkeit der Greifstrategie in der Praxis. Die Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Entwicklung barrierefreier Assistenzrobotik, die Objektübergaben bei Sichtverdeckung im Fertigungsprozess erlaubt, sowie potenziell als Unterstützung sichtbeeinträchtigter Personen einsetzbar ist.

Schlüsselwörter Assistenzrobotik · Mensch-Roboter-Kollaboration · Objektübergabe · User-Centered Design · Barrierefreiheit

Grasp it—development of a grasping strategy for robot object handover with obstructed sight

Abstract

Current grasping strategies for robot object handover require eye contact with the user. However, universal application scenarios that allow for obstructed sight in the production process additionally require solutions that are independent of eye contact. In this study, grasping strategies for robot handover of objects were developed using combined empirical and simulation-based approaches, and both for objects with and without risk of injury. Applied grasping strategies were evaluated in a user study with sighted and blinded users. In handover direction robot to human, the grasping strategies were successful and safe in 97–99% of all cases, across all objects. Handover direction human to robot was less successful and sucess depended highly on the object. Participants rated handover as easy, comfortable and safe, with sighted participants rating significantly more positive. Recommendations for the design of universal robot object handover with obstructed sight are derived from results.

✉ Dorothea Langer
dorothea.langer@mb.tu-chemnitz.de

[1] Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement, TU Chemnitz, 09107 Chemnitz, Deutschland

[2] Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz, Deutschland

Practical Relevance: This paper presents an approach for the development of grasping strategies for robot object handover with obstructed sight, both for objects with and without risk of injury to the users. The subsequently shown positive evaluation results of these strategies by sighted and blinded users substantiate safe applicability in practice. Thus, results contribute to the development of universal robot object handover that allows for obstructed sight scenarios in production or potentially even support impaired persons.

Keywords Robot assistants · Human robot collaboration · Object handover · User-centered design · Accessibility

1 Motivation und Zielstellung

Robotergestützte Objektübergaben setzen derzeit Sichtkontakt des Roboters mit dem menschlichen Interaktionspartner voraus. Als Voraussetzung effektiver Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) gilt aktives, koordinierendes Blickverhalten (Cochet und Guidetti 2018). Für eine nahtlose robotergestützte Objektübergabe wird daher empfohlen, dass der Roboter während der Annäherung den Blickkontakt der Person prüft (Strabala et al. 2013). Technische Sensorkonzepte detektieren entsprechend die menschliche Blickzuwendung als Voraussetzung zum Start der Interaktion, um eine sichere MRK zu gewährleisten (z. B. Bdiwi 2014).

Jedoch ist Sichtkontakt zum Roboter nicht immer möglich. Beispielsweise kann im Produktionsprozess durch die Arbeitshaltung eine Sichteinschränkung entstehen (Koene et al. 2014). Zudem können Menschen mit Sehbehinderung keinen Sichtkontakt zum Roboter herstellen und fallen daher als mögliche Nutzer aus. Daher sollte eine robotergestützte Objektübergabe auch ohne Sichtkontakt möglich sein und die Bedürfnisse entsprechender Nutzergruppen bei der Entwicklung dieser Roboterfunktion berücksichtigt werden. Dies kann über einen nutzerzentrierten Entwicklungsprozess (DIN 2019) erreicht werden. Über die genannte Studie von Koene et al. (2014) hinaus sind jedoch keine Arbeiten bekannt, die dies adressieren.

Da sehende Personen stark auf optische Sinneseindrücke fokussiert sind, kann nicht davon ausgegangen werden, dass diese unter Sichteinschränkung über erlernte Strategien für eine solche Objektübergabe verfügen. Die Studie von Koene et al. (2014) untersuchte mit sehenden Probanden Szenarien aus dem Handwerkskontext, die mit unterschiedlichen Körperhaltungen und teils fehlender Sicht auf den Roboter einhergingen. Erwartungskonform wurden ohne Sichteinschränkung mit zunehmender Geschwindigkeit der robotischen Übergabe Einfachheit, Zufriedenheit und Komfort höher eingeschätzt, es sank jedoch das Sicherheitsempfinden. Bei eingeschränkter Sicht zeigte sich hingegen kein Zusammenhang zwischen zunehmender Übergabegeschwindigkeit und der Einschätzung von Einfachheit, Zufriedenheit, Komfort und Sicherheitsempfinden. Dies kann in einer eingeschränkten Wahrnehmung der Situation begründet sein.

Es liegt nahe, Objektübergaben unter Sichteinschränkung von Mensch zu Mensch zu analysieren, um daraus Ableitungen für Objektübergaben von Roboter zu Mensch (oder umgekehrt) zu ziehen. Blinde Personen nutzen bei Objektübergaben besondere Strategien: (1) verbale Kommunikation der Art, Ausrichtung und Position des überreichten Objekts, (2) Bewegung nur eines Interaktionspartners zu einem Zeitpunkt, und (3) aktives Greifen nach dem Objekt durch die blinde Person (Walde et al. 2019). Zudem erwarten blinde Personen an kritischen Punkten der Objektübergabe präzise verbale Informationen zur Situation und möchten den Prozess an diesen Punkten selbst steuern, z. B. erst bestätigen, dass sie das Objekt sicher gegriffen haben, bevor der Roboter den Greifer öffnet (Langer et al. 2022).

Eine barrierefreie robotische Objektübergabe, die diese Übergabestrategien blinder Personen anwendet, könnte entsprechend auch die Wahrnehmung und damit allgemein die Interaktion sehender Personen unter Sichteinschränkung unterstützen. Des Weiteren schließen Koene et al. (2014) aus ihren Ergebnissen, dass subjektive Übergabequalität auch von anderen Faktoren als der Robotergeschwindigkeit abhängig sein kann. So könnte beispielsweise die Gefährlichkeit der überreichten Objekte ein Einflussfaktor sein, wenn ein Kontakt mit den entgegengereichten Objektflächen unabhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit eine Verletzungsgefahr birgt, z. B. weil diese spitz, scharfkantig oder heiß sind. Es konnte gezeigt werden, dass Menschen bei robotischer Objektübergabe eine Orientierung des Objekts bevorzugen, die den Konventionen menschlicher Objektübergaben entspricht (Cakmak et al. 2011). Beispielhaft geben diese Konventionen vor, dass eine Tasse waagerecht und mit dem Henkel voran gereicht wird. Auch bei gefährlichen Objekten existieren derartige Konventionen, z. B. werden gefährliche Flächen verdeckt und vom Anderen abgewandt überreicht. Dies wurde in bisherigen Studien zu robotischer Übergabe jedoch noch nicht adressiert.

Eine Greifstrategie ist eine Vorgehensweise, über die ein Roboter mit seinem Greifer eine bestimmte Greifpose generieren kann. Dabei folgt dieser Beitrag der Definition menschlicher Greifposen von Feix et al. (2016): Als Greifpose wird jede statische Handhaltung betrachtet, die ein Objekt sicher in Ruhe halten kann, unabhängig von der Orientierung der Hand. Damit ein Roboter ein Objekt greifen

kann, müssen die Kontaktpunkte definiert werden, an denen der Greifer das Objekt anfahren soll. Die mögliche Anzahl der Kontaktpunkte von Greiferstützfläche und Greiferfingern sowie deren räumliche Anordnung zueinander, ergibt eine Vielzahl möglicher robotischer Greifposen. Die Generierung einer Greifpose hängt von folgenden Faktoren ab (Bohg et al. 2014): der Kinematik des Endeffektors, dem Vorwissen über das Objekt, der Sensorik zur Umgebungserfassung und dem Kontext der Aufgabe. Dabei hat das Vorwissen einen entscheidenden Einfluss darauf, welche Greifpose genutzt werden kann. Im Rahmen dieses Beitrags werden ausschließlich Objekte betrachtet, zu deren Form und Struktur der Roboter Vorwissen hat. Um aus der Menge möglicher Greifposen diejenige mit dem stabilsten Griff des Objekts zu ermitteln, bedarf es einer Greifstrategie.

Es gibt vielfältige Lösungsansätze, die sich mit der Entwicklung robotischer Greifstrategien auseinandersetzen. Jedoch stellt die Entwicklung einer Greifstrategie zur Übergabe von gefährlichen Gegenständen zwischen Roboter und Menschen unter Sichteinschränkung eine besondere Herausforderung dar. Zusätzlich zu den beschriebenen Nutzeranforderungen gilt es hierbei insbesondere zu berücksichtigen: die Stabilität des Objekts im Greifer durch die Greifpose, die Übergabemöglichkeiten an den Menschen und die Reduzierung der Verletzungsgefahr durch scharfe Objektkanten oder heiße Objektflächen. Bestehende Arbeiten lösen dies aber nur teilweise oder betrachten nicht alle Anforderungen. In der Arbeit von Cakmak et al. (2011) erlernt der Roboter die Greifposen durch Beobachtung der menschlichen Greif- und Übergabestrategie, um valide Greifposen für die untersuchten Gegenstände zu ermitteln. Der Ansatz erfordert jedoch eine wiederholte Demonstration auf möglichst exakt gleiche Art und Weise durch mehrere Menschen, um die entsprechende Greifpose anzulernen. Dies ist auf sehende Personen ohne eine erlernte menschliche Übergabestrategie unter Sichteinschränkung nicht anwendbar. Dagegen verfolgen Zaidi et al. (2020) den Ansatz mithilfe von Simulationen valide Greifposen für einen flexiblen Dreifingergreifer zu ermitteln. Dabei werden potenzielle Greifposen durch die Berechnung von Kontaktpunkten bestimmt. Jedoch beschränkt sich die Arbeit von Zaidi et al. (2020) auf das Greifen von Gegenständen und berücksichtigt weder den Übergabeprozess noch mögliche Greifflächen für den Menschen. Der Ansatz von Yang et al. (2021) beschreibt eine Methode zur Bestimmung von Greifposen mittels 3D Sensorik im Onlinebetrieb. Dabei wird aber nur die Objektübergabe von Menschen an den Roboter betrachtet. Aufgrund der speziellen Anforderungen reichen die beschriebenen Ansätze nicht für die Objektübergabe unter Sichteinschränkung aus. Eine Kombination aus simulativem und empirischem Ansatz könnte die Entwicklung valider kraftschlüssiger Greifposen ermöglichen, die den Anforderungen von Nutzern unter Sichteinschränkung entsprechen.

Auf der Grundlage der besprochenen Literatur lassen sich folgende Fragestellungen ableiten: (1) Wie können Greifstrategien blinder Personen, die den menschlichen Konventionen entsprechen, technisch auf einen Roboter übertragen werden, um eine Objektübergabe bei Sichteinschränkung zu ermöglichen? Daher sollen im Rahmen einer iterativen Entwicklung nach dem nutzerzentrierten Entwicklungsprozess (DIN 2019) Greifstrategien des Roboters entwickelt werden, die sichere Greifposen für die Aufnahme von unterschiedlichen Objekten (mit und ohne potenzielles Verletzungsrisiko) durch den Roboter gewährleisten und gleichzeitig Übergabestrategien blinder Personen entsprechen. Zudem stellt sich die Frage: (2) Inwieweit ermöglichen diese übertragenen Greifstrategien für sehende Personen mit und ohne Sichteinschränkung tatsächlich eine sichere und angenehme robotische Objektübergabe. Daher soll anschließend unter Einbezug von Nutzern objektiv beobachtet werden, welche Flächen des Objekts die Probanden bei Anwendung der entwickelten Greifstrategien berühren sowie das subjektive Erleben der robotischen Übergabe von Personen mit und ohne Sichteinschränkung untersucht werden. In Anlehnung an Koene et al. (2014) stellen Sicherheit, Einfachheit und Komfort dabei die Erfolgsfaktoren dar.

2 Vorgehen

2.1 Entwicklung Greifstrategie

2.1.1 Roboter-Prototyp

Für die Objektübergabe wurde ein kollaborativer Roboterarm vom Typ UR10 der Marke Universal Robots (Universal Robots 2016) verwendet, der während der Studie auf einer mobilen Plattform installiert war. Am Endeffektor des Roboters wurde ein flexibler Dreifingergreifer vom Typ BH8-280 der Marke BarrettHand™ befestigt, der es ermöglicht, Objekte unterschiedlichster Form und Beschaffenheit taktil zu ertasten und feinfühlig zu greifen (Abb. 1). Die drei Finger des Greifers gestatten durch flexible Orientierung und Kombination die Realisierung unterschiedlichster Greifposen. Zusätzlich sind taktile Sensoren in den Fingerflächen und der Greiferstützfläche verbaut, die eine sensorische Überwachung des Griffes ermöglichen.

2.1.2 Ablauf der Greifstrategieentwicklung

Eine robotische Greifstrategie benötigt eine Anzahl möglicher Greifposen für ein Objekt sowie ein festgelegtes Vorgehen zu deren Bewertung, um die geeignetste Greifpose für

Abb. 1 BarrettHand™ mit taktiler Sensorik (Barrett Technology o.J.)
Fig. 1 BarrettHand™ with tactile sensors (Barrett Technology n.d.)

das Objekt auszuwählen. Um zu untersuchen, wie eine solche robotische Greifstrategie entwickelt werden kann, wurden exemplarisch für die Objekte ‚Messer' und ‚Tasse' eine Anzahl möglicher Greifposen mithilfe einer simulativen und einer anschließenden empirischen Herangehensweise erzeugt, sowie die Ergebnisse der beiden Herangehensweisen verglichen. Außerdem wurde die Kraftschlüssigkeit je Greifpose sowohl für verschiedene Messer als auch Tassen in der Simulation rechnerisch bewertet sowie empirisch ermittelt.

Auf Basis des simulativen und empirischen Ansatzes konnten Planungsexperten für Greifapplikation bewerten, inwiefern die ermittelten Greifposen den Sicherheitsanforderungen sowie den menschlichen Konventionen der Übergabe gefährlicher Objekte entsprechen, um daraus eine Greifstrategie des Roboters ableiten zu können. Die Definition eines „sicheren Griffs" als solches existiert nicht, weil der Begriff „sicher" immer relativ zu betrachten ist. Daher definierten für diese Arbeit zwei interne und ein externer Sicherheitsexperte für Maschinensicherheit nach DIN EN ISO 12100 (2010) folgende Kriterien, welche nach absteigender Relevanz für den Schutz des Menschen geordnet wurden:

1. **Stabilität**: Die Greifpose muss kraftschlüssig und stabil sein. Der Greifer des Roboters soll den auftretenden Kräften der Roboterbewegung standhalten, die im Falle des UR10 bis zu 4 N betragen können.
2. **Sicherheit**: Die Greifpose soll so gewählt werden, dass gefährliche Objektflächen bzw. Objektbereiche (z. B. Klinge des Messers, heiße Mantelfläche der Tasse) von der Person weg zeigen oder größtenteils durch den Roboter verdeckt werden. Es soll verhindert werden, dass die Person direkt an die gefährlichen Objektbereiche (z. B. Klinge des Messers) greifen kann oder der Roboter die Person während seiner Bewegung durch den Raum verletzen kann. Weiterhin soll gewährleistet sein, dass die sicheren Greifflächen für den Menschen am Objekt nicht vollständig durch den Roboter verdeckt werden. Für eine sichere Entgegennahme durch den Menschen sollte genügend freie Fläche am Objekt vorhanden sein.
3. **Generalisierbarkeit**: Die Greifpose soll sicherstellen, dass verschiedene Objekte der gleichen Art (z. B. Messer) damit gegriffen werden können.

Entsprechend der Einhaltung aller drei Kriterien können unterschiedliche Greifposen für ein und dasselbe Objekt nach ihrer Schutzwirkung für den Menschen geordnet werden. Daher wurde die Bewertung herangezogen, um pro Objekt eine Greifstrategie für den Roboter festzulegen, die es ermöglicht die Greifpose mit der größten Schutzwirkung auszuwählen. Diese Greifpose wird nachfolgend als Standardgreifpose bezeichnet. Zuletzt wurden anhand des mit Messer und Tasse exemplarisch entwickelten Vorgehens Greifstrategien für folgende weitere Objekte entwickelt: Schere, Teppichmesser, Taschentuchpackung, Hammer, Nierenschale, Zange, Schraubendreher und Schraubenschlüssel. Diese wurden in der darauffolgenden Nutzerstudie evaluiert (siehe Abschn. 3). Die Schritte der Greifposenermittlung sowie der Kraftschlüssigkeitsbewertung werden im Folgenden näher erläutert.

2.1.3 Simulativer Ansatz zur Greifposenermittlung

Die Simulationssoftware GraspIt (2023) wurde dazu verwendet, um Greifposen zu generieren. Dafür wurden die zu greifenden Objekte durch bereits vorher definierte Objekt-Primitive abstrahiert (siehe Abb. 2).

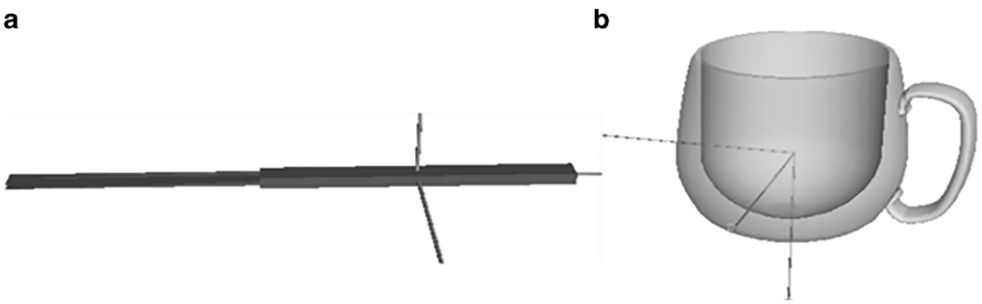


Abb. 2 Abstrahierte Objekt-primitive für Messer (**a**) und Tasse (**b**)
Fig. 2 Abstracted geometric primitive of knife (**a**) and cup (**b**)

Die Simulationssoftware GraspIt generiert automatisch auf Basis des Greifermodells und abstrakter Primitive die optimalen Greifposen für ein Objekt. Nach Definition der Initialpose, der Simulationsparameter und Bewertungsparameter ermittelt GraspIt alle möglichen Greifflächen, welche mittels virtueller Kraftsimulation geprüft werden. Als Ergebnis gibt die Simulationssoftware die kraftschlüssigsten Greifposen eines Objektes zurück.

2.1.4 Empirischer Ansatz zur Greifposenermittlung

Die Bestimmung aller möglichen Greifposen des Robotergreifers BarrettHand™ an den Objekten Messer und Tasse erfolgte systematisch über ein stufenweises Vorgehen (siehe Abb. 3). Dabei wurde sukzessive die eingesetzte Fingeranzahl erhöht bzw. die Greiferstützfläche als zusätzliche Stützfläche eingesetzt, um die Kraftschlüssigkeit für komplexe Objekte zu erhöhen. Dafür positionierten der Softwareentwickler für die Greifapplikationen und der Konstrukteur der Greifervorrichtung die Objekte entsprechend des festgelegten Vorgehens (siehe Abb. 3) in der BarrettHand™ und prüften die Stabilität nach den folgenden Kriterien:

1. Ist das Objekt mit der Greifpose greifbar?
2. Liegt ein stabiler Griff am Objekt vor?
3. In welchen Freiheitsgraden lässt sich das Objekt bewegen?

Das Ergebnis dieser Prüfung wurde dokumentiert. Im Falle, dass Kriterium 1 und 2 vollständig erfüllt waren sowie die Bewegung des Objekts in maximal 3 Freiheitsgraden im Greifer möglich war, wurde die Greifpose als valide, kraftschlüssige Greifpose deklariert. Greifposen, bei denen sich kein stabiler Griff ergab, wurden direkt ausgeschlossen. Mithilfe des dritten Kriteriums wurden zudem Zug- und Drehrichtung für die nachfolgende empirische Kraftschlüssigkeitsbewertung festgelegt.

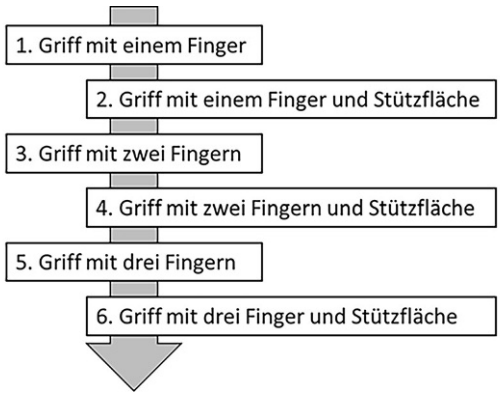


Abb. 3 Vorgehensweise zur empirischen Ermittlung der möglichen Greifposen
Fig. 3 Approach for empirically determining every possible grasp

2.1.5 Simulativer Ansatz zur Kraftschlüssigkeitsbewertung

Die Kraftschlüssigkeit wurde simulativ ebenfalls mithilfe der Simulationssoftware GraspIt ermittelt. Greifposen für Messer und Tassen, die mit der empirischen Herangehensweise zusätzlich zur vorherigen GraspIt-Simulation erzeugt werden konnten, wurden in der Simulation ergänzt. Anschließend wurden alle Greifposen zehnmal mit jeweils einer kleinen Abweichung in der initialen Positionierung simuliert und die Software berechnete jeweils den Bewertungsparameter ε (Ferrari und Canny 1992). Dieser Bewertungsparameter ε stellt den kleinsten Abstand zum Ursprung der Griffschlüsselweite (GWS – Grasp Wrench Space) dar und erlaubt eine Aussage zur Kraftschlüssigkeit der Greifpose. Der Bewertungsparameter ε kann Werte zwischen −1 und 1 annehmen. Bei Werten zwischen 0 und 1 handelt es sich grundsätzlich um einen kraftschlüssigen Griff, wobei der Wert 1 die Aufnahme von großen Kräften und Drehmomenten aus allen Richtung indiziert. Je kleiner ε ist, desto kleiner sind die Kräfte und Momente, die die Greifpose aufnehmen kann. Beträgt ε −1, kann die Greifpose keine Kräfte bzw. Drehmomente aufnehmen und es kommt kein kraftschlüssiger Griff zustande.

Durch diese Berechnung wurde ein direkter Vergleich der Kraftschlüssigkeit gegenüber den nachfolgenden realen Messversuchen möglich. Jedoch normiert die Simulationssoftware GraspIt die Kräfte und nimmt für jeden Kontakt die gleiche Kraft an. Somit enthält die Simulation nur ein ungefähres Abbild der wirkenden Kräfte und es können lediglich qualitative Aussagen zur Kraftschlüssigkeit einer Greifpose getroffen werden.

2.1.6 Empirischer Ansatz zur Kraftschlüssigkeitsbewertung

Empirisch wurde die Kraftschlüssigkeit mittels Federkraftmessgerät (siehe Abb. 4a) gemessen. Hierfür wurde ein Versuchsaufbau entwickelt (siehe Abb. 4c), der die Umsetzungen der ermittelten Greifposen für Messer und Tassen, sowie die äquivalente Wiederholung der Messungen erlaubt. Die Kraftschlüssigkeit der Greifpose wurde durch die Messung der Zugkraft und des Drehmoments ermittelt. Für einen Vergleich der Messreihe zu jeder Greifpose wurden die maximal auftretenden Kräfte und Momente dokumentiert und gemittelt. Das Federkraftmessgerät ist für eine maximale Kraft von 100 N und eine Auflösung von 0,5 N ausgelegt. Dieses wurde mittels einer Schnur am Griff des Messers befestigt, welche durch ein Loch in der Schutzabdeckung geführt wurde. Für den unwahrscheinlichen Fall, dass das Messer bei großen Zugkräften aus dem Greifer rutschen könnte, wurde zur Sicherheit der Versuchsleitung eine zusätzliche Abdeckung zwischen Greifer und Federkraftmessgerät installiert. Die Ermittlung des Drehmoments M erfolgte indirekt mit der Methode der Reakti-

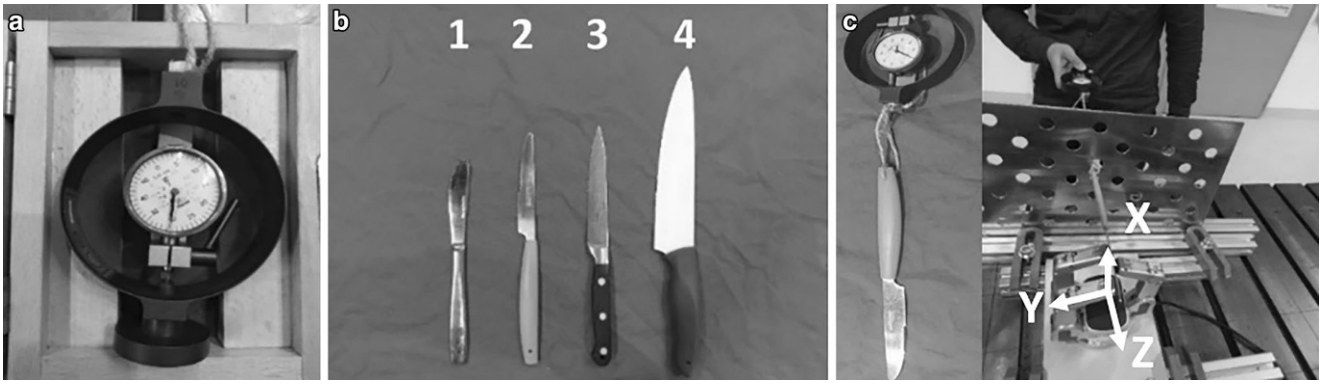


Abb. 4 **a** Federkraftmessgerät, **b** verwendete Messerauswahl, **c** Versuchsaufbau Barrett-Hand™ mit Schutzvorrichtung sowie Bezugskoordinatensystem für Messungen
Fig. 4 **a** Spring Scale Dynamometer, **b** selection of knives used, **c** experimental setup of BarrettHand™ with protective device and visualization of reference coordinate system for measurement of forces

onskraftmessung mit der Formel M = F * r. Dabei wird die am Ende des Hebelarms (Länge r = 10 cm) wirkende Kraft F mit dem Federkraftmessgerät erfasst. Das verwendete Bezugskoordinatensystem für die durchgeführten Messungen ist in Abb. 4c dargestellt.

Zur Messung der Kraftschlüssigkeit wurden vier verschiedene Messer (siehe Abb. 4b) mit jeder Greifpose jeweils 20-mal gegriffen. Dabei wurde jede Pose 10-mal auf Zug und 10-mal mit Drehmoment beansprucht.

2.2 Nutzerstudie zur Überprüfung der Greifstrategie

2.2.1 Studiendesign und Versuchsablauf

Die experimentelle Studie folgte einem Mixed-Subject Design. Nach zufälliger Zuteilung zu den Gruppen ‚sehend' und ‚verblindet' (between) wurden jedem Probanden vom Roboter 10 Objekte in randomisierter Reihenfolge übergeben (within):

1. Schere,
2. Messer,
3. Teppichmesser,
4. Taschentuchpackung,
5. Hammer,
6. Nierenschale,
7. Tasse,
8. Zange,
9. Schraubendreher und
10. Schraubenschlüssel.

Nach einer Einwilligungs- und Datenschutzerklärung folgte eine demographische Vorbefragung mit personenbezogenen Daten zu Alter, Sehfähigkeit und Händigkeit sowie einer Messung der Armlänge. Die Gruppe ‚verblindet' erhielt eine Schlafbrille und die Probanden wurden verblindet in den Versuchsraum geführt. Der Versuch wurde aus drei Perspektiven auf Video aufgezeichnet. Die Probanden saßen auf einem Hocker in einem ihrer Armlänge entsprechenden Abstand zum Roboter, um eine standardisierte Entfernung zur Übergabeposition zu ermöglichen. Der Roboter kündigte jedes Objekt verbal an. Nach Erreichen der festen Übergabeposition bewegte sich der Roboterarm nicht mehr und die Probanden konnten aktiv danach greifen. Der Versuchsleiter instruierte die Probanden, zur Entnahme des Objekts aus dem Robotergreifer den Befehl „Öffnen" zu geben. Der technische Versuchsleiter steuerte die Ankündigung der Objekte sowie die Sprachverarbeitung des „Öffnen"-Befehls als Wizard-of-Oz. Auf jede der 10 Objektübergaben durch den Roboter folgte ein verbales Rating der subjektiven Wahrnehmung von Einfachheit, Komfort und Sicherheit. Anschließend erfolgte die Rückgabe des Objekts. Sehende Probanden gaben das Objekt in den Greifer des Roboters zurück. Verblindete Probanden hielten das Objekt dem Roboter entgegen, von wo es der technische Versuchsleiter entnahm, damit keine Gefahr einer Quetschung beim Schließen des Greifers entstehen konnte. Auch nach den Rückgaben erfolgten in beiden Gruppen die subjektiven Ratings von Einfachheit, Komfort und Sicherheit. Alle Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung.

Ein Ethikvotum konnte für die Studie nicht eingeholt werden, da zur Zeit der Studiendurchführung keine zuständige Ethikkommission bestand. Aufgrund der Anwendung der Wizard-of-Oz Methodik, bei der die Objekte durch die Versuchsleitung manuell im Robotergreifer positioniert wurden, bestand während des Versuchs kein Gefährdungspotential für die Probanden.

2.2.2 Stichprobe, Messinstrumente und Datenanalyse

Am Versuch nahmen 9 sehende sowie 6 verblindete Probanden teil. Eine größere Stichprobe war nicht möglich, da die Datenerhebung mit Probanden aufgrund der COVID19-Pandemie vorzeitig beendet werden musste. Das Alter der Probanden war in beiden Gruppen vergleichbar ($M_{sehend} = 25{,}2$; $SD_{sehend} = 3{,}76$; $M_{verblindet} = 23{,}0$; $SD_{verblindet} = 2{,}16$). Innerhalb der Gruppe ‚sehend' benötigten zwei Personen eine Sehhilfe. Insgesamt waren 14 Personen Rechtshänder.

Die 10 Objekte wurden einzeln ausgewertet sowie expertenbasiert anhand ihrer potenziellen Gefährlichkeit den Gruppen ‚gefährlich' (1–3), ‚ungefährlich' (4–6) und ‚neutral' (7–10) zugeordnet. Als ‚gefährlich' wurden Objekte eingestuft, von denen unabhängig von der Robotergeschwindigkeit eine Verletzungsgefahr (z. B. durch eine Schnittbewegung) ausgeht. Als ‚neutral' wurden Objekte eingestuft, bei denen nur unter bestimmten Umständen eine Verletzungsgefahr besteht (z. B. Tasse mit heißem Inhalt).

Als objektive Maße wurden die vom Probanden berührten Greifflächen und das erfolgreiche Greifen durch den Robotergreifer untersucht. Die Greifflächen der Probanden wurden mithilfe der Videodaten in der Kodier-Software ELAN (2019) kodiert und analysiert. Dazu wurde jede mögliche Greiffläche segmentiert und nach Gefahrenpotential eingestuft. Bei der Objektübernahme des Menschen vom Roboter wurde diese als erfolgreich gewertet, wenn die Probanden bei der Übergabe keine als gefährlich oder unter Umständen gefährlich eingestuften Flächen berührten. Eine Objektrückgabe wurde bei sehenden Probanden als erfolgreich gewertet, wenn der Robotergreifer das Objekt erfolgreich greifen konnte. Für verblindete Probanden konnte der Erfolg der Rückgabe nur hypothetisch bewertet werden, da diese Gruppe das Objekt dem Roboter lediglich entgegenhielt, ohne dass es vom Robotergreifer gefasst wurde. Für die Bewertung dieses hypothetischen Übergabeerfolgs wurde daher kodiert, was der Roboter im Vergleich zu seiner aktuellen Position und der jeweiligen Standardgreifpose hätte anpassen müssen, um das Objekt erfolgreich greifen zu können ohne dabei die Hand des Probanden zu quetschen. Für die Einordnung des hypothetischen Übergabeerfolgs wurden drei Kategorien mit aufsteigendem Grad notwendiger Anpassungen definiert. Die geringste Anpassung, und damit der hypothetisch am einfachsten zu erreichende, hohe Übergabeerfolg wäre eine bloße Veränderung der Roboterarmausrichtung. Diese Kategorie wurde vergeben, wenn die Probanden bei der Rückgabe die Standardobjektorientierung der entwickelten Standardgreifpose für das jeweilige Objekt beibehielt und Standardgreifflächen für den Robotergreifer frei blieben. Eine umfangreichere Anpassung, und damit ein mittlerer hypothetischer Erfolg, wäre die gleichzeitige Änderung von Roboterarm- und Greiferausrichtung. Diese Kategorie wurde vergeben, wenn die Probanden bei der Rückgabe die Objektorientierung veränderten, die Standardgreifflächen jedoch für den Robotergreifer frei blieben. Als kein hypothetischer Erfolg wurde eine notwendige Änderung der Greifpose kodiert. Diese Kategorie wurde vergeben, wenn die Standardgreifflächen bei der Rückgabe teilweise oder ganz durch die Probandenhand verdeckt waren.

Die subjektive Bewertung der Objektübergaben erfolgte anhand von drei Items, die bereits von Koene et al. (2014) eingesetzt wurden: „Es war einfach das Objekt entgegenzunehmen" (Einfachheit), „Die Interaktion war angenehm" (Komfort) und „Ich fühlte mich sicher während der Interaktion" (Sicherheit). Die Bewertung erfolgte auf einer Skala von 1 (starke Ablehnung) bis 10 (starke Zustimmung).

Die Datenauswertung erfolgte mit der Statistik-Software R (R Core Team 2019). Aufgrund geringer Stichprobengröße wurden nonparametrische Verfahren angewendet sowie ein Randomisierungstest (mit $k = 1000$ zufälligen Ziehungen und $\alpha = 0{,}05$) für einen between-Vergleich implementiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ergebnisse Greifstrategieentwicklung

Die Greifstrategieentwicklung hatte zum Ziel mittels Kombination aus einem simulativen und empirischen Ansatz valide kraftschlüssige Greifposen zu entwickeln, die Nutzeranforderungen unter Sichteinschränkung entsprechen.

3.1.1 Simulativ ermittelte Greifposen

Im Rahmen der Simulation wurden die Parameter für das jeweilige Objekt durch den Bediener iterativ angepasst, bis ein belastbares valides Ergebnis vorlag. Für das flache Messermodell (siehe Abb. 3) konnte die Simulationssoftware GraspIt keine validen Greifposen simulieren. Für das größere Tassenmodell wurden sechs valide Greifposen (siehe Abb. 5) generiert.

3.1.2 Empirisch ermittelte Greifposen

Die Bestimmung der Greifposen und ihre Beurteilung erfolgte mittels der in Abschn. 2.1.4 beschriebenen Systematik. Im Ergebnis werden nur die Greifposen berichtet, die nach den in Abschn. 2.1.4 beschriebenen Kriterien als valide und kraftschlüssig deklariert werden konnten. Für die 4 Messer konnten empirisch fünf valide Greifposen (MP1–MP5) ermittelt werden, deren Kontaktpunkte zwischen Messer und Greiferfinger in Abb. 6 durch Pfeile gekennzeichnet sind.

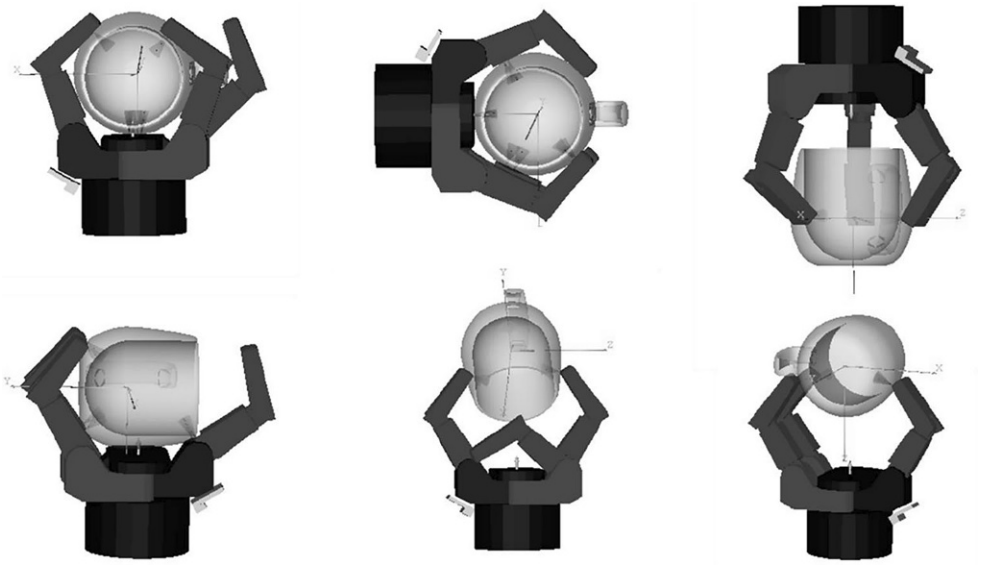


Abb. 5 Simulativ generierte Greifposen für das Objekt Tasse
Fig. 5 Grasps of a cup generated by simulation

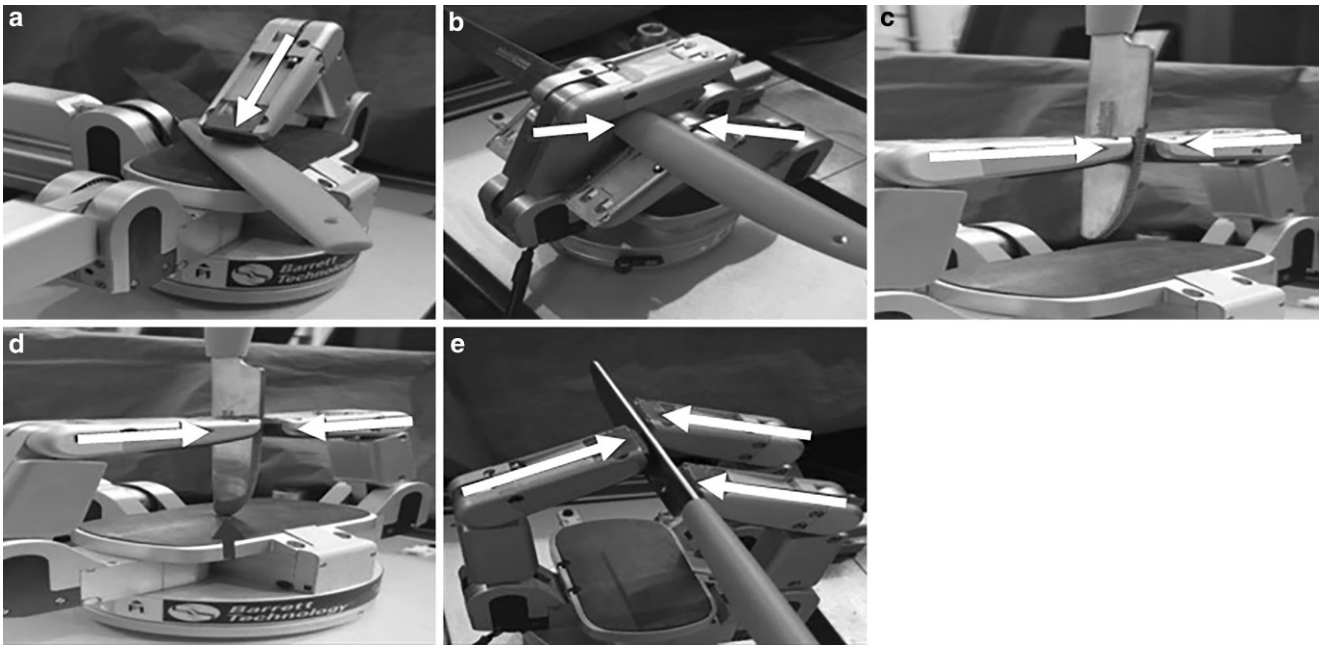


Abb. 6 Empirisch bestimmte Greifposen für das Messer. **a** MP1, **b** MP2, **c** MP3, **d** MP4, **e** MP5 (*Pfeile* = Kontaktpunkte zwischen Greiferfinger der BarrettHand™ und Messer)
Fig. 6 Empirically determined grasps of a knife. **a** MP1, **b** MP2, **c** MP3, **d** MP4, **e** MP5 (*arrows* = contact point of Barrett finger and knife)

Für die Tasse wurden empirisch sechs valide kraftschlüssige Greifposen ermittelt (siehe Abb. 7), vgl. TP1–TP6. Die empirisch bestimmten Greifposen der Tassen stimmten zum Großteil mit denen aus der Simulation überein.

3.1.3 Simulative Kraftschlüssigkeitsbewertung

Zur simulativen Kraftschlüssigkeitsbewertung wurden alle Greifposen wie in Abschn. 2.1.5 beschrieben in GraspIt simuliert und ihre Kraftschlüssigkeit anhand des Bewertungsparameters ε bewertet, der den kleinsten Abstand zum Ursprung der Griffschlüsselweite darstellt (Ferrari und Canny 1992). Der durchschnittliche ε-Wert der 10 Simulationen jeder Greifpose ist in Tab. 1 aufgeführt.

Die Greifposen für Messer MP1 und MP3 weisen einen Wert von −1 auf. Das heißt, sie ergeben keinen kraftschlüssigen Griff. Sie wurden daher nachfolgend nicht in die empirische Kraftschlüssigkeitsbewertung einbezogen. Für MP2, MP4 und MP5 zeigt ε einen sehr kleinen Wert, das heißt es liegt Kraftschlüssigkeit vor, die jedoch nur kleinen Kräften widerstehen kann. Die Ergebnisse der simulativen Kraftschlüssigkeitsbewertung für die Greifposen der Tassen zei-

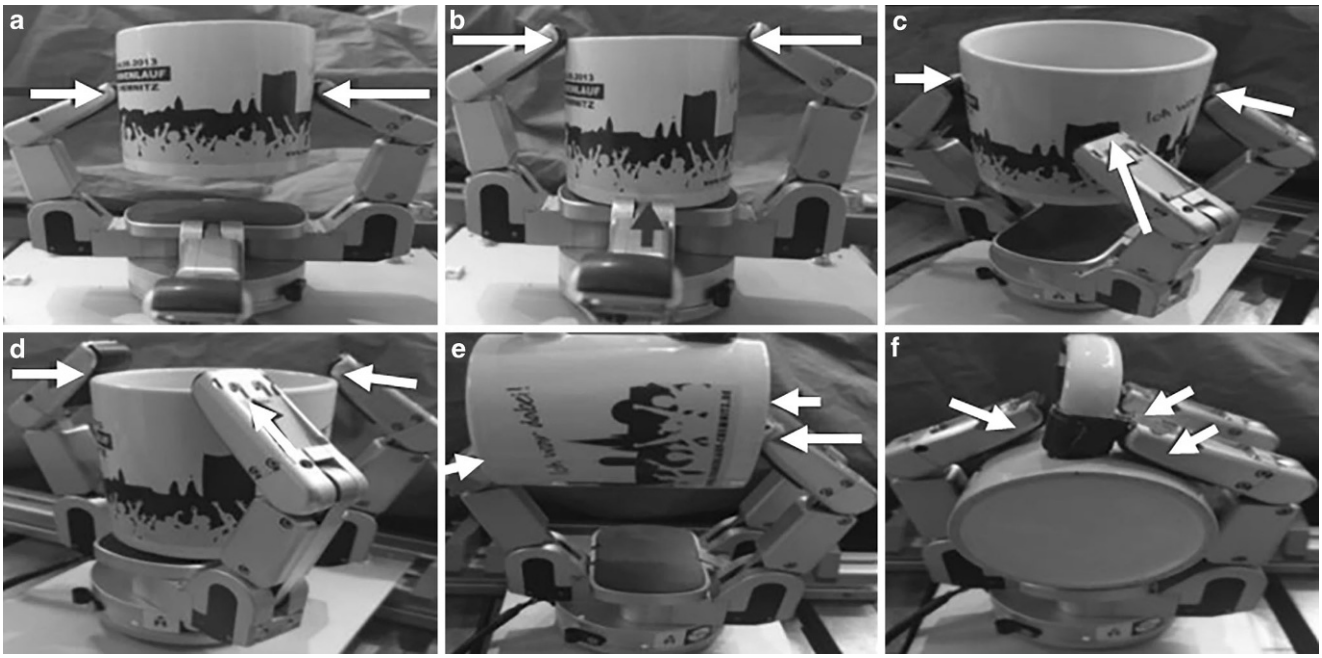


Abb. 7 Empirisch bestimmte Greifposen für die Tasse. **a** TP1, **b** TP2, **c** TP3, **d** TP4, **e** TP5, **f** TP6 (*Pfeile* = Kontaktpunkte zwischen Greiferfinger der BarrettHand™ und Tasse)
Fig. 7 Empirically determined grasps of a cup. **a** TP1, **b** TP2, **c** TP3, **d** TP4, **e** TP5, **f** TP6 (*arrows* = contact point of Barrett finger and cup)

gen wenig Varianz. Wie in Tab. 1 zu erkennen ist, sind die Werte ε aller Greifposen für Tassen im Vergleich zu den Messerposen deutlich größer. Alle Posen für Tassen sind nach den Ergebnissen der Simulation als stabil und robust gegenüber äußeren Kräften einzustufen.

Tab. 1 Mit der Software GraspIt ermittelter durchschnittlicher Qualitätsparameter ε aller Greifposen
Table 1 Mean quality parameter ε for all determined grasps of a cup calculated by software GraspIt

Greifposen Messer		Greifposen Tassen	
Pose	ε	Pose	ε
MP1	–1,000	TP1	0,125
MP2	0,024	TP2	0,33
MP3	–1,000	TP3	0,172
MP4	0,051	TP4	0,272
MP5	0,013	TP5	0,165
–	–	TP6	0,22

3.1.4 Empirische Kraftschlüssigkeitsbewertung

Für die empirische Bewertung der Stabilität des Griffs wurde mittels Federkraftmessgerät die Zugfestigkeit des jeweils gegriffenen Objekts im Greifer gemessen. Dabei wurde jede Pose 10-mal auf Zug und 10-mal mit Drehmoment beansprucht. Die Durchschnittswerte der Messergebnisse für die einzelnen Greifposen der Messer sind in Tab. 2 aufgeführt. Das verwendete Bezugskoordinatensystem für die Interpretation der durchgeführten Messungen ist in Abb. 4c dargestellt. Die Ergebnisse zu MP2 zeigen, dass die Pose robust gegen Drehmomente ist. Jedoch sind die Durchschnittswerte der Zugkräfte gering. Alle Greifversuche konnten mit dieser Greifpose erfolgreich ausgeführt werden. Die Mess-

Tab. 2 Durchschnittswerte der empirisch gemessenen maximalen Zugkraft und des maximalen Drehmoments für verschiedene Greifposen an den Messern, Standhalten der maximal aufgebrachten Kräfte und Drehmomente mit [a] gekennzeichnet
Table 2 Average values of the empirically measured maximum pulling force and torque for different grasps of knives, withstanding to maximum forces and torque marked by [a]

Greifposen	Zugkraft in Newton				Drehmoment in Newtonzentimeter			
	Richtung	Max	∅	Min	Richtung	Max	∅	Min
MP2	Z	15	5,09	1	Y	150[a]		
					X	150[a]		
MP4	X	10	6,34	5	Z	150[a]		
MP5	Z	15	12,2	9	X	25	19,31	16,8
					Y	150[a]		

Tab. 3 Durchschnittswerte der empirisch gemessenen maximalen Zugkraft und des maximalen Drehmoments für verschiedene Greifposen an einer Tasse, Standhalten der maximal aufgebrachten Kraft mit [a]gekennzeichnet

Table 3 Average values of the empirically measured maximum pulling force and torque for different grasps of a cup, withstanding to maximum forces marked by [a]

Greifposen	Zugkraft in Newton			
	Richtung	Max	∅	Min
TP1	X	7,8	7,4	6
	Y	8	7,2	6
TP2	X	5	3,56	2,5
	Y	15	9,65	5
TP3	X	15	7,15	4
	Y	7,5	6,89	6
TP4	X	15[a]		
	Y	15[a]		
TP5	X	15[a]		
	Y	15[a]		
TP6	X	15[a]		
	Z	15[a]		

ergebnisse zu MP4 zeigen, dass sich die durchschnittlichen Werte der Zugkraft im Bereich um die 5,5 N befinden. Ebenso kann diese Pose Drehmomente aufnehmen. Jedoch konnten keine Drehmomente für diese Greifpose gemessen werden, bei der die Klinge auf der Greiferstützfläche aufliegt, denn hierbei hätten die taktilen Sensoren der Greiferstützfläche beschädigt werden können. Alle Greifversuche konnten mit dieser Greifpose erfolgreich ausgeführt werden. Die Ergebnisse von MP5 zeigen, dass die durchschnittlichen Zugkräfte ca. doppelt so groß sind, wie die der anderen Posen. Ebenfalls kann diese Pose Drehmomente in X-Richtung aufnehmen. Nur ein Greifversuch mit dieser Pose schlug fehl.

Die Ergebnisse der Messungen zur Kraftschlüssigkeit der Greifposen für die Tasse sind in Tab. 3 aufgeführt. Für die Greifposen der Tasse zeigen die Ergebnisse, dass diese im Durchschnitt viel robuster gegen externe Kräfte sind als die Greifposen für Messer. Die Greifposen TP4, TP5 und TP6 hielten sogar den maximal aufgebrachten Zugkräften von 15 N in allen 10 Wiederholungen stand. Auch schlugen insgesamt nur 3 Greifversuche der Tasse fehl. Die Durchschnittswerte der Messergebnisse für die einzelnen Greifposen der Tasse sind in Tab. 3 aufgeführt.

3.1.5 Greifstrategie

Um die Greifposen in die Greifstrategie einordnen zu können, wurden relevante Eigenschaften in einer Übersicht zusammengetragen (z. B. ermittelte Kraftschlüssigkeit, vom Greifer verdeckte bzw. offene Objektflächen), die für die nachfolgende Bewertung anhand der festgelegten Kriterien (siehe Abschn. 2.1.2) notwendig sind. Dabei wurde als zusätzliche Eigenschaft die Annäherungsrichtung aufgenommen, mit der die Greifposen realisiert werden können. Sie bestimmt, inwiefern bei der Annäherung an den Menschen gefährliche Flächen von diesem abgewandt sind. Mögliche Annäherungsrichtungen in Bezug auf das Messer sind in Abb. 8 dargestellt.

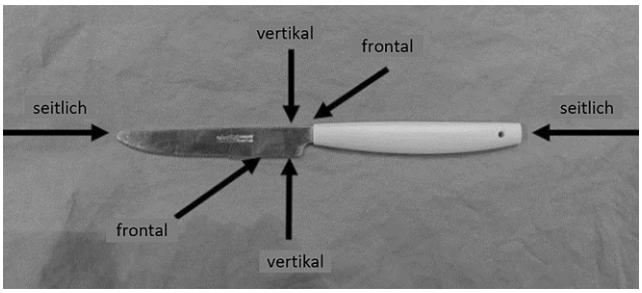


Abb. 8 Mögliche Annäherungsrichtungen für die Realisierung der Greifposen von Messern

Fig. 8 Possible approaching directions for grasps of knives

Tab. 4 zeigt eine Eigenschaftsübersicht exemplarisch für die Messergreifposen. Anschließend wurden diese Eigenschaftsübersichten genutzt, um anhand der vorher festgelegten Kriterien (siehe Abschn. 2.1.2) zu bewerten, inwieweit die Posen Sicherheitsanforderungen sowie den menschlichen Konventionen der Übergabe gefährlicher Objekte entsprechen.

Wie in Abschn. 2.1.2 beschrieben wurden die drei Kriterien für die Bewertung gewichtet: Die Sicherheit sowie Anforderungen des Menschen wurden als am wichtigsten und die Effektivitätskriterien wie die Generalisierbarkeit mit nachgeordneter Wichtigkeit betrachtet. Als relevantestes Kriterium wurden die Kraftschlüssigkeit und Stabilität gewertet, wodurch garantiert wird, dass das Objekt in einer festen Position verbleibt und somit keine unvorhergesehene Gefahr für den Menschen darstellt. Beispielsweise ergab die empirische Kraftschlüssigkeitsbewertung für MP2 und MP5 eine hohe Stabilität gegenüber Zugkraft und Drehmomenten, womit diese Greifposen für Messer hinsichtlich des

Tab. 4 Zusammenfassung der relevanten Eigenschaften der Greifposen für die Messer

Table 4 Overview on relevant characteristics for different grasps of knives

Pose	Eigenschaft
MP2	Robust gegen Drehmomente Hohe Generalisierbarkeit der Greifausführung Greifen nur durch frontale Annährung möglich Benötigte Länge der Greiffläche beträgt 7 cm
MP4	Greifen nur mit seitlicher Annährung realisierbar Für Menschen riskant, weil die Klinge nicht vollständig verdeckt werden kann Benötigte Länge der Greiffläche beträgt 8 cm
MP5	Sehr robust gegen Zugkräfte Greifen nur durch frontale Annährung möglich Benötigte Länge der Greiffläche beträgt 7 cm

Tab. 5 Bewertung der klassifizierten Greifposen für die Messer anhand der definierten Kriterien zum Schutz des Menschen
Table 5 Evaluation of selected grasps for knives based on defined criteria for protectiveness

Pose	Stabilität	Sicherheit (Messerklinge und -spitze können verdeckt werden)	Generalisierbarkeit	Priorität (Gesamturteil)
MP2	Hoch	Ja	Hoch	1
MP4	Mittel	Teilweise	Mittel	3
MP5	Hoch	Ja	Hoch	2

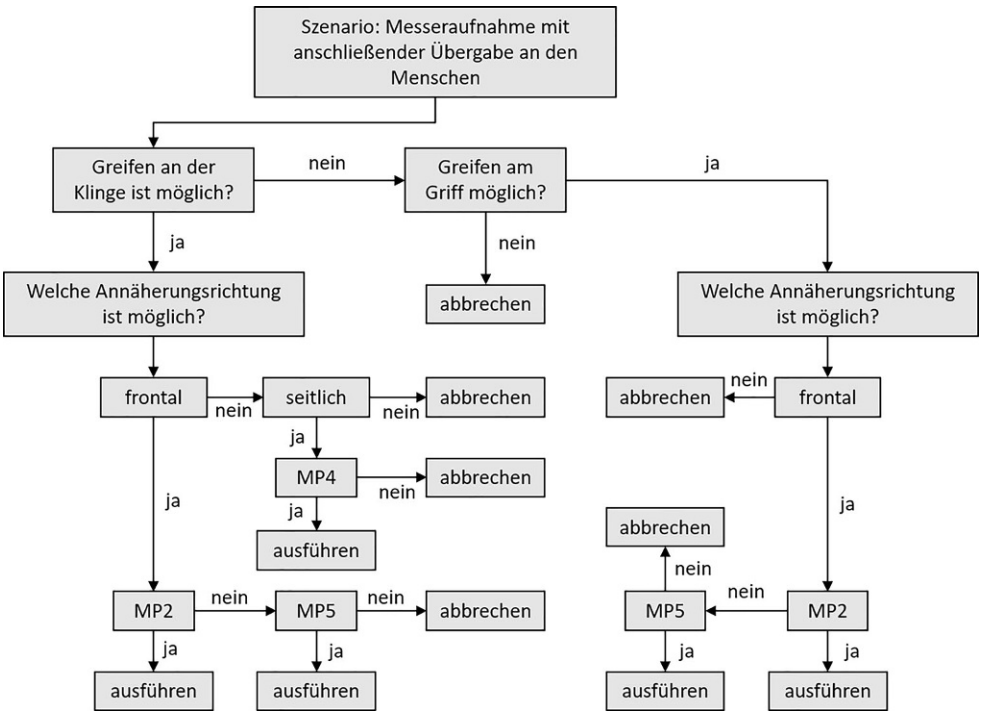


Abb. 9 Entscheidungsbaum für die Greifstrategie für Messer
Fig. 9 Decision tree of the grasping strategy for knives

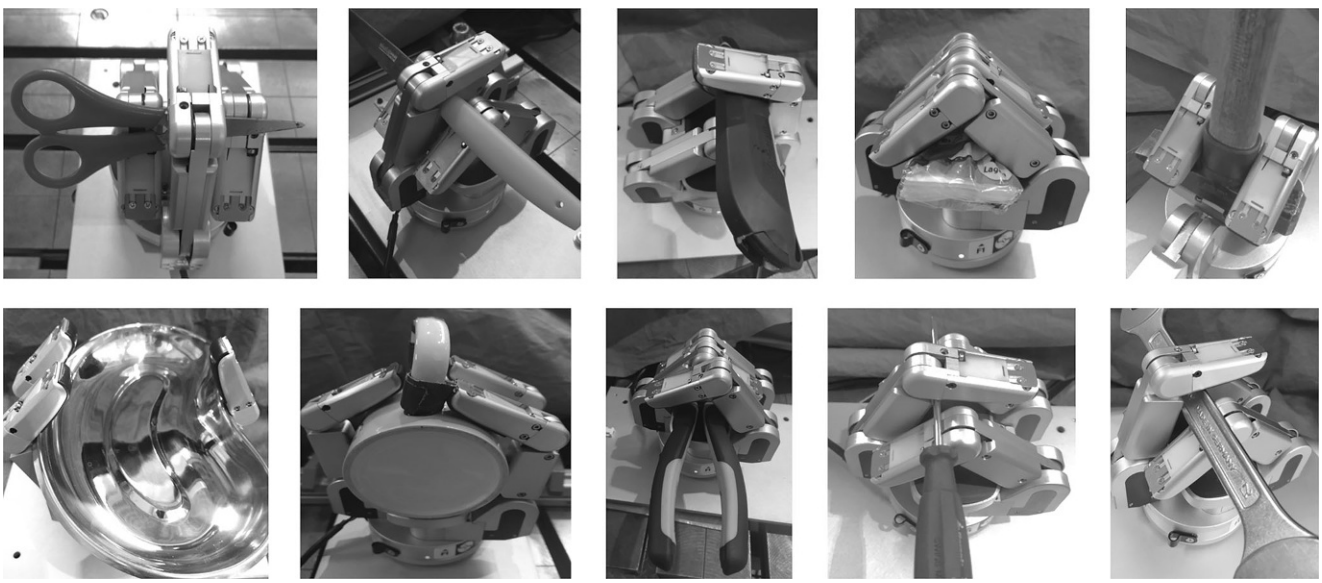


Abb. 10 Standardgreifposen für die in der Nutzerstudie übergebenen Objekte
Fig. 10 Grasping standards for handover objects applied in the user study

wichtigsten Kriteriums die besten Eigenschaften aufwiesen (siehe auch Tab. 2 und 4). Als zweitwichtigstes Kriterium wurde die Sicherheit der Greifpose angesehen. Es gilt, die Verdeckung gefährlicher Flächen wie Messerklinge oder Messerspitze zu prüfen, wie es menschlichen Konventionen entspricht. Dieses Kriterium erfüllten die Greifposen MP2 und MP5 ebenfalls. Das letzte Kriterium ist die Generalisierbarkeit – verschiedene Messer sollten durch diese Greifpose gegriffen werden können. Nur MP2 konnte alle Messer erfolgreich greifen, besitzt somit eine hohe Generalisierbarkeit und wurde damit insgesamt als die am besten geeignete Greifpose für Messer gewertet. Tab. 5 zeigt die gesamte Bewertung der klassifizierten Greifposen für das Objekt Messer anhand dieser Kriterien.

Die Bewertung mündete in einer Greifstrategie, die die Ausführbarkeit einer bevorzugten Standardgreifpose prüft, bei positivem Ergebnis deren Anwendung auslöst oder bei negativem Ergebnis die Ausführbarkeit der Greifpose mit nächsthöherer Priorisierung prüft, bis eine ausführbare Greifpose gefunden ist. Für die Umsetzung einer solchen Greifstrategie wurde ein Entscheidungsbaum (vgl. Abb. 9) entwickelt, der in Analogie zur Mensch-Mensch-Übergabe eine sichere Objektübernahme des Menschen vom Roboter realisieren soll. Darin wird aufgrund der Greifposenbewertung (siehe Tab. 5) MP2 als die sicherste Greifpose und damit als Standardgreifpose des Messers klassifiziert. Aufgrund der Priorisierung der Stabilität wird als nächstes MP5 vor MP4 bevorzugt.

Die vorgestellte Herangehensweise zur Generierung von sicheren Greifposen wurde auf weitere Objekte übertragen, und jeweils Greifstrategien für weitere Objekte entwickelt, die im Rahmen der Nutzerstudie zur Objektübergabe (siehe Abschn. 2.2 und 3.3) angewandt wurden. Dabei wurden die Greifposen mithilfe der empirischen Vorgehensweise je nach Beschaffenheit der Objekte ermittelt und anhand der Bewertungskriterien in eine Greifstrategie eingebettet. Abb. 10 zeigt die am höchsten priorisierten Standardgreifposen für die Übergabe aller 10 in der Nutzerstudie eingesetzten Objekte (siehe Abschn. 2.2.1).

3.2 Diskussion Greifstrategieentwicklung

3.2.1 Eignung des simulativen und empirischen Ansatzes zur Greifposenentwicklung

Durch den Vergleich der Ergebnisse des simulativen und des empirischen Ansatzes ist deren Eignung zur Greifposenentwicklung bewertbar.

Die verwendete **Simulationsumgebung** erlaubte aufgrund mangelnder bzw. zu kleiner Greifflächen keine Erzeugung valider Greifposen für das Messer. Das in der Simulation verwendete Messermodell (siehe Abb. 2a) ist nur 2 cm hoch, d. h., die vertikal verfügbare Greiffläche ist relativ klein. Im Gegensatz dazu konnten mit der **empirischen** Herangehensweise fünf Greifposen für das Messer generiert werden.

Das Beispiel Messer illustriert, dass bei Objekten mit dünnen Strukturen die Berechnung von Greifflächen (noch) sehr schwierig ist, weil die Algorithmen für solche geometrischen Formen derzeit nicht ausgelegt sind. Für die Ermittlung von Greifposen für schmale, flache Objekte ist der simulative Ansatz daher aktuell nicht geeignet.

Für das Objekt Tasse konnten dagegen mit beiden Ansätzen valide Greifposen generiert werden, die zudem größtenteils übereinstimmten. Mit diesem Beispiel konnte gezeigt werden, dass beide Ansätze zur Generierung von Greifposen für sehr einfache Objekte geeignet sind.

Zudem sind die Ergebnisse der Simulation zur Kraftschlüssigkeit mit den empirischen Messergebnissen vergleichbar, indem mittels Simulation alle kraftschlüssigen Griffe als solche identifiziert werden konnten. Jedoch ist es aktuell nicht möglich, anhand der Simulation exakte Kennwerte bzgl. der Kraftaufnahme einer Greifpose zu ermitteln. Somit lässt sich sagen, dass mithilfe der Simulation approximierte qualitative Aussagen über eine Greifpose getroffen werden können. Für eine exakte quantitative Vorhersage ist die Simulation jedoch nicht geeignet. Diese ist im praktischen Einsatz aber notwendig.

3.2.2 Bewertung der Greifposen und Greifstrategie

Mit der vorgestellten Herangehensweise sind valide Greifposen für die Objekte Messer und Tasse exemplarisch entwickelt worden. Mögliche Kombinationen von Greiferfingern konnten durch das schrittweise empirische Vorgehen qualitativ voranalysiert werden und Greifposen, bei denen sich kein kraftschlüssiger Griff ergab, im Vorfeld der umfangreicheren quantitativen Evaluierung ausgeschlossen werden. Anhand der vorab definierten Kriterien ließen sich die Greifposen zudem bewerten und in eine Greifstrategie einbetten.

Diese Vorgehensweise erlaubte darüber hinaus die Generierung sicherer Greifposen für acht weitere Objekte, die auf Basis der Kriterienbewertung direkt in den Entscheidungsbaum einer entsprechenden Greifstrategie integriert wurden. Auf diese Weise können zukünftig auch für weitere Objekte Greifstrategien entwickelt werden.

3.3 Ergebnisse der Nutzerstudie

Die Nutzerstudie hatte die Überprüfung der ermittelten objektspezifischen Standardgreifposen hinsichtlich des objektiven Erfolgs sowie der subjektiven Bewertung von Objektübergaben mit und ohne Sichteinschränkung zum Ziel. Über die konkrete Bewertung einer Standardgreifpose kann ebenfalls eine Bewertung der dahinterstehenden Greifstrategien

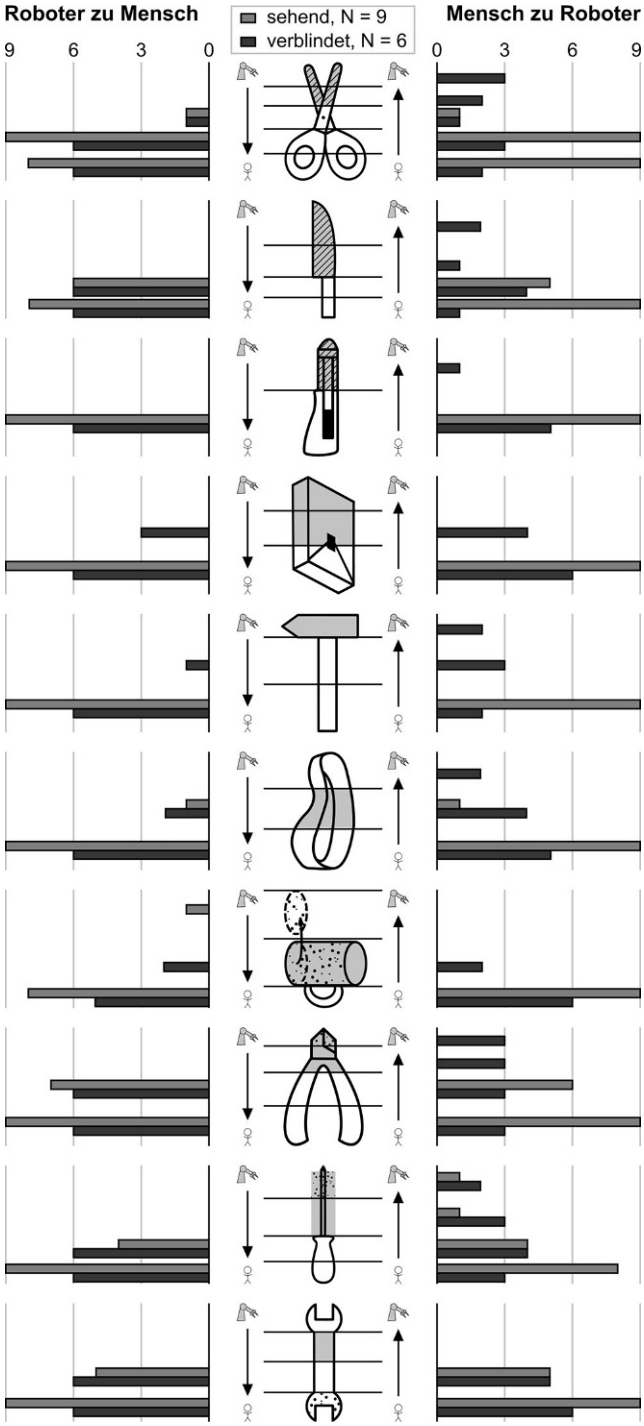


Abb. 11 Häufigkeit der von Probanden berührten Greifflächen getrennt nach Übergaberichtung, Gruppe und Objekt; Berühren mehrerer Flächen gleichzeitig möglich (*schraffiert* = gefährliche Flächen, *gepunktet* = unter bestimmten Umständen gefährliche Flächen, *hellgrau* = bei Standardgreifpose durch Roboterhand verdeckte Greifflächen)

Fig. 11 Frequency of object surfaces which participants touched dependent on handover direction, group and object; touching several surfaces at once was possible (*hatched areas* indicate harmful surfaces, *dotted areas* indicate surfaces that are harmful under some circumstances, *grey areas* are covered by robot hand in grasping standard)

des Roboters für verschiedene Objekte getroffen werden, die in dieser Arbeit gestuft auf Grundlage literaturbasierter Empfehlungen (Walde et al. 2019; Cakmak et al. 2011) sowie empirischer und simulativer Ansätze (siehe Abschn. 2.1 und 3.1) entwickelt wurden.

3.3.1 Objektiv verwendete Greifflächen bei Objektübergaben

Für jedes Objekt wurde die Häufigkeit, mit der die Probanden die Greifflächen bei der Objektübergabe verwendeten, ausgewertet und deren Gefährlichkeit eingestuft. Abb. 11 zeigt die **Häufigkeit der berührten Greifflächen** getrennt nach Übergaberichtung, Gruppe und Objekt.

Bei der *Objektübernahme* des Menschen vom Roboter glichen sich die Muster der verwendeten Greifflächen beider Gruppen sehr. In fast allen Fällen wurden nur als ungefährlich eingestufte Greifflächen berührt.

Bei der *Objektrückgabe* des Menschen zum Roboter ist das Muster uneinheitlicher. Die sehenden Probanden spiegelten in fast allen Fällen die Übergabeweise, in der sie das Objekt zuvor überreicht bekommen hatten, und berührten entsprechend fast durchgängig die identischen Greifflächen wie bei der Objektübernahme. Die Gruppe der verblindeten Probanden griff die Objekte bei der Rückgabe unterschiedlich. Lediglich beim Schraubenschlüssel und Teppichmesser glich sich auch in dieser Gruppe das Muster der Greifflächen mit dem der vorangegangenen gegensätzlichen Übergaberichtung. Einige gefährliche oder potenziell gefährliche Objekte wurde von einem Teil der verblindeten Probanden so gegriffen, dass die gefährlichen Flächen in ihrer Hand verdeckt lagen.

Tab. 6 zeigt den **objektiven Erfolg der Objektübergaben**. Wie in Abb. 11 ersichtlich, gelang die *Objektübernahme* des Menschen vom Roboter in fast allen Fällen erfolgreich. Lediglich zwei Objektübernahmen in der Gruppe ‚verblindet' und eine Objektübernahme in der Gruppe ‚sehend' mussten durch Verwendung potenziell gefährlicher Flächen (Boden und Mantelfläche der Tasse) als nicht erfolgreich eingestuft werden.

Bei der *Objektrückgabe* des Menschen zum Roboter war es in der Gruppe der Sehenden in allen Fällen möglich, das Objekt durch den Robotergreifer zu übernehmen. Jedoch gelang dies nur in 86 % der Fälle stabil. Insbesondere der Hammer konnte in weniger als der Hälfte der Rückgaben vom Robotergreifer stabil gegriffen werden. Auch das Greifen des Messers gelang nur in zwei Dritteln der Fälle stabil. Die Rückgabeerfolge der Objekte in der Gruppe der Verblindeten konnte nur hypothetisch bewertet werden. Ein hoher Erfolg wäre das erfolgreiche Greifen des Gegenstands mit den entwickelten Standardgreifposen durch eine geringfügige Anpassung der Roboterarmausrichtung. Dies wäre nur in einem reichlichen Drittel der Fälle möglich

Tab. 6 Übergabeerfolg beider Übergaberichtungen nach Objekt und Gruppe, Sehend $N=9$; Verblindet $N=6$
Table 6 Handover success for each object and group in both handover directions, Sighted $N=9$, Blinded $N=6$

Objekt	Erfolg Objektübernahme: Roboter → Mensch		Erfolg Objektrückgabe: Mensch → Roboter			
	Sehend = keine Berührung gefährlicher Flächen	Verblindet	Sehend = Objekt stabil in Robotergreifer	Verblindet		
				Greiferfolg wäre möglich durch Anpassung von:		
				Roboterarmausrichtung (hoher Erfolg)	Roboterarm- & Greiferausrichtung (mittlerer Erfolg)	Greifstrategie (kein Erfolg)
1 Schere	9	6	7	0	1	5
2 Messer	9	6	6	2	1	3
3 Teppichmesser	9	6	9	1	2	3
4 Taschentücher	9	6	9	3	1	2
5 Hammer	9	6	4	0	2	4
6 Nierenschale	9	6	7	2	1	3
7 Tasse	8	4	9	5	0	1
8 Zange	9	6	9	1	2	3
9 Schraubendreher	9	6	8	2	1	3
10 Schraubenschlüssel	9	6	9	6	0	0
Gesamt in Prozent	99 %	97 %	86 %	37 %	18 %	45 %

gewesen. Ebenfalls zeigte sich eine starke Objektabhängigkeit: Lediglich der Schraubenschlüssel wäre durch die Anpassung der Roboterarmausrichtung immer greifbar gewesen, die Tasse in fast allen Fällen, Schere und Hammer dagegen nie. Ein mittlerer hypothetischer Erfolg wäre eine zusätzlich notwendige Anpassung der Ausrichtung des Robotergreifers. Durch Anpassung der Roboterarm- und Greiferausrichtung wären die Objekte in etwas mehr als der Hälfte der Rückgaben mit den Standardgreifposen durch den Roboter greifbar gewesen. Jedoch hätte für die restlichen Rückgaben eine andere Greifpose gewählt werden müssen, um das Objekt erfolgreich zu greifen, ohne die Hand des Probanden zu quetschen, was hypothetisch als kein Erfolg der entwickelten Greifstrategie gewertet wurde.

3.3.2 Subjektive Bewertung der Objektübergaben

Die Mittelwerte der subjektiven abhängigen Variablen für alle 10 Objekte sind in Tab. 7 für beide Übergaberichtungen getrennt für die Gruppen ‚sehend' und ‚verblindet' aufgeführt. Sie lagen alle weit oberhalb der theoretischen Skalenmitte. Sehende Probanden vergaben bei der *Objektübernahme* die geringsten Ratings beim Schraubenschlüssel, verblindete dagegen beim Teppichmesser. Bei der *Objektrückgabe* vergaben sehende Probanden die geringsten Ratings beim Hammer und verblindete Probanden bei der Tasse.

Zusätzlich sind in den Abb. 12, 13 und 14 die Verteilung der Ratings für die Kriterien Einfachheit (Abb. 12), Komfort (Abb. 13) und Sicherheit (Abb. 14) als Extremgruppenvergleich getrennt nach gefährlichen und ungefährlichen Objekten sowie objektübergreifend dargestellt. Sie visualisieren ebenfalls die Ergebnisse der Randomisierungstests zwischen den Gruppen.

Bei der *Objektübernahme* des Menschen vom Roboter unterschieden sich die Gruppen hinsichtlich aller Kriterien signifikant, sowohl objektübergreifend als auch getrennt für gefährliche und ungefährliche Objekte. Die Mittelwertsunterschiede zeigten eine Range von $M_{diff}=0{,}99$–$2{,}30$ auf einer einheitlichen Skala von 1–10, wobei verblindete Probanden konsistent geringere Werte aufwiesen. In Abb. 12 und 13 ist ebenfalls erkennbar, dass bei der Objektübernahme in allen Kriterien die Unterschiede der Ratings innerhalb der Gruppe der verblindeten Probanden größer waren als innerhalb der Gruppe sehender Probanden.

Bei der *Objektrückgabe* des Menschen zum Roboter unterschieden sich die Ratings der Gruppen hinsichtlich fast aller Kriterien nicht signifikant. Lediglich hinsichtlich des subjektiven Sicherheitsempfindens bei der Rückgabe gefährlicher Objekte wiesen die Ratings der verblindeten Probanden signifikant geringere Werte auf als die der sehenden Probanden. Der Mittelwertsunterschied lag in diesem Fall bei $M_{diff}=0{,}80$ auf einer Skala von 1–10. Sämtliche anderen Mittelwertsunterschiede zwischen den Gruppen waren bei der Objektrückgabe geringer. In Abb. 12 und 13 ist ebenfalls erkennbar, dass bei der Objektrückgabe in allen Kriterien die Unterschiede der Ratings innerhalb der Gruppe der sehenden Probanden größer waren als innerhalb der Gruppe verblindeter Probanden.

Tab. 8 zeigt die Mittelwertsunterschiede und die Ergebnisse der Randomisierungstests zwischen den Übergaberichtungen. In der Gruppe der Sehenden waren die Mittelwerte in allen Kriterien bei der *Objektrückgabe* des Men-

Tab. 7 Mittelwerte der subjektiven Bewertung beider Übergaberichtungen je Objekt
Table 7 Mean subjective ratings of both handover directions for each object

Objekt	Gruppe	Objektübernahme: Roboter → Mensch			Objektrückgabe: Mensch → Roboter		
		Einfachheit	Komfort	Sicherheit	Einfachheit	Komfort	Sicherheit
1 Schere	Sehend	9,11	9,33	9,89	9,22	8,89	9,33
	Verblindet	7,83	7,67	6,83	8,00	8,67	8,33
2 Messer	Sehend	9,56	9,33	9,89	9,11	8,78	9,56
	Verblindet	8,33	8,17	8,00	9,17	9,00	8,67
3 Teppichmesser	Sehend	9,89	9,44	9,78	9,33	9,11	9,33
	Verblindet	7,00	7,83	7,83	8,50	9,00	8,83
4 Taschentücher	Sehend	9,89	9,89	10,00	8,67	9,44	8,89
	Verblindet	8,67	9,00	9,17	9,33	9,33	9,50
5 Hammer	Sehend	9,67	9,56	9,67	8,00	7,89	8,00
	Verblindet	8,33	8,67	8,83	8,67	9,17	8,67
6 Nierenschale	Sehend	9,78	9,56	9,67	8,22	8,33	8,89
	Verblindet	7,50	8,00	7,67	9,17	9,00	8,50
7 Tasse	Sehend	9,00	9,33	9,33	8,67	8,22	8,22
	Verblindet	7,50	8,17	7,00	7,33	7,50	7,17
8 Zange	Sehend	9,56	9,33	9,89	9,22	9,00	9,11
	Verblindet	8,33	8,67	8,83	9,33	9,33	9,17
9 Schraubendreher	Sehend	9,33	9,44	9,44	9,33	9,44	9,56
	Verblindet	8,83	9,50	9,00	9,50	9,17	9,50
10 Schraubenschlüssel	Sehend	8,67	8,78	9,00	9,00	8,67	8,67
	Verblindet	8,33	8,50	8,50	8,67	8,67	8,83

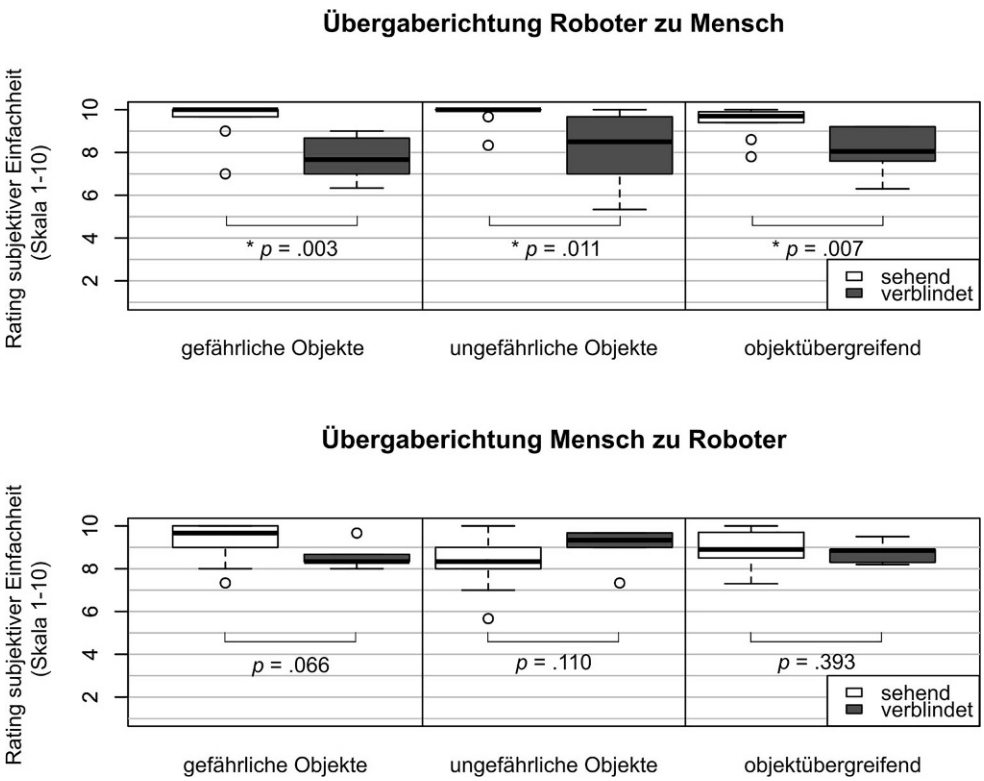
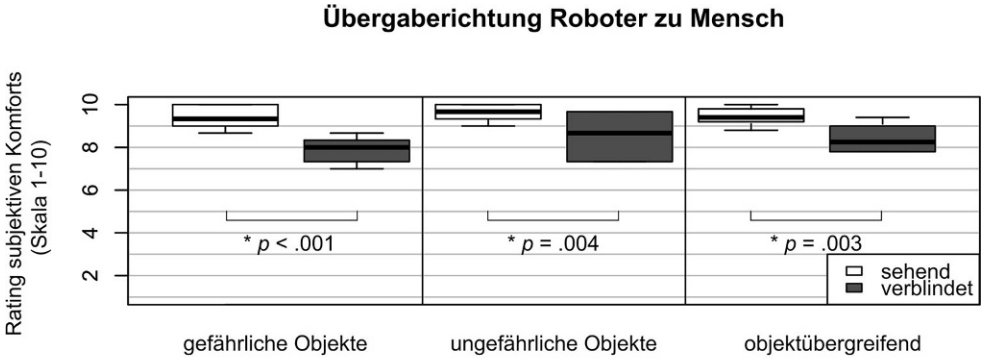


Abb. 12 Verteilung der Ratings sowie Ergebnisse der Randomisierungstests zwischen Gruppen für das Kriterium Einfachheit der Übergabe, visualisiert im Extremgruppenvergleich nach gefährlichen (*links*) und ungefährlichen (*Mitte*) Objekten sowie objektübergreifend (*rechts*)
Fig. 12 Distribution of ratings and results of randomization tests between groups for the criterion easiness of handover, separately shown for harmful (*left*) and harmless (*middle*) objects in extreme group comparison as well as across all objects (*right*)



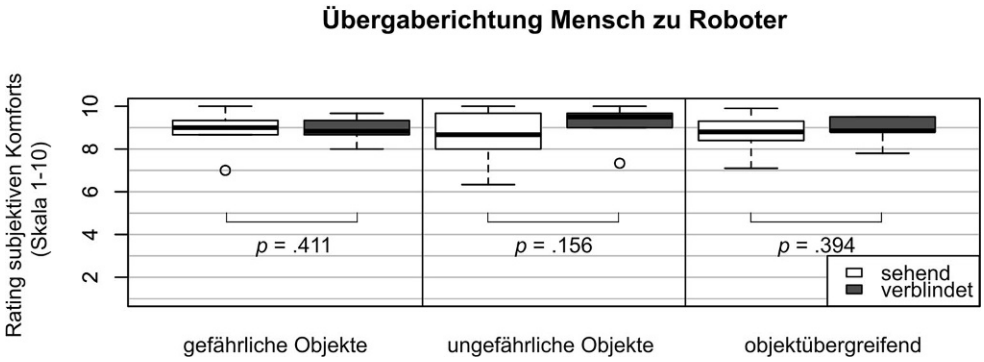
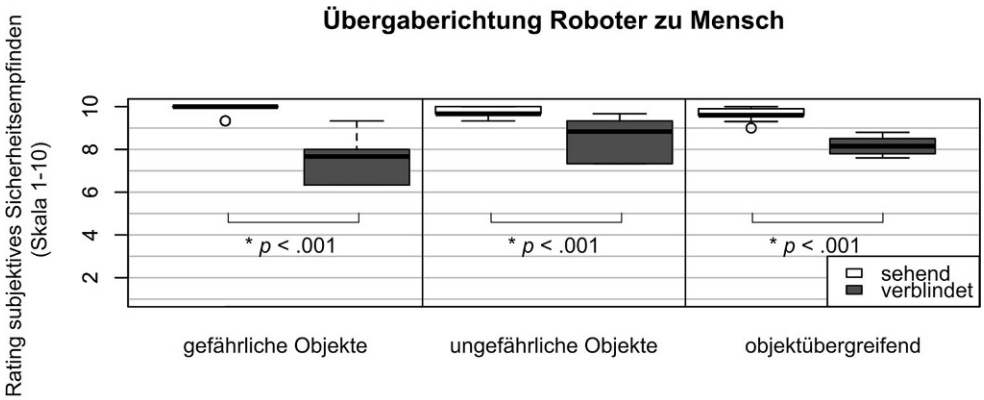


Abb. 13 Verteilung der Ratings sowie Ergebnisse der Randomisierungstests zwischen Gruppen für das Kriterium Komfort der Übergabe, visualisiert im Extremgruppenvergleich nach gefährlichen (*links*) und ungefährlichen (*Mitte*) Objekten sowie objektübergreifend (*rechts*)

Fig. 13 Distribution of ratings and results of randomization tests between groups for the criterion comfort of handover, separately shown for harmful (*left*) and harmless (*middle*) objects in extreme group comparison as well as across all objects (*right*)



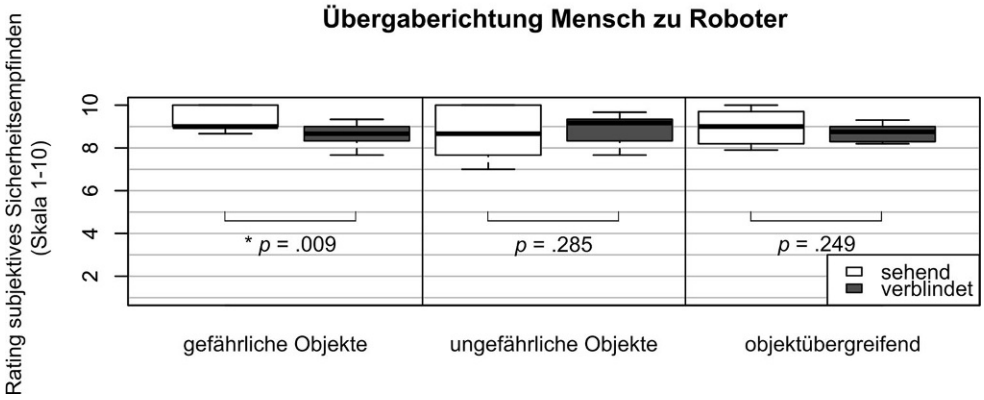


Abb. 14 Verteilung der Ratings sowie Ergebnisse der Randomisierungstests zwischen Gruppen für das Kriterium subjektive Sicherheit der Übergabe, visualisiert im Extremgruppenvergleich nach gefährlichen (*links*) und ungefährlichen (*Mitte*) Objekten sowie objektübergreifend (*rechts*)

Fig. 14 Distribution of ratings and results of randomization tests between groups for the criterion subjective safety of handover, separately shown for harmful (*left*) and harmless (*middle*) objects in extreme group comparison as well as across all objects (*right*)

Tab. 8 Mittelwertsunterschiede (M_{diff}) und Ergebnisse der Randomisierungstests (*p*-Werte) der subjektiven Bewertung zwischen beiden Übergaberichtungen abhängig von Objektkategorie und Gruppe
Table 8 Difference of Means (M_{diff}) and *p*-results of randomization tests of subjective ratings between both handover directions dependent on object and group

Kriterium	Objektkategorie	Sehend		Verblindet	
		M_{diff}	*p*	M_{diff}	*p*
Einfachheit	Gefährlich	0,44	0,238	0,83	0,044
	Ungefährlich	1,48	0,002	0,89	0,148
	Objektübergreifend	0,57	0,085	0,70	0,077
Komfort	Gefährlich	0,44	0,074	1,00	0,011
	Ungefährlich	1,11	0,007	0,61	0,117
	Objektübergreifend	0,63	0,023	0,47	0,033
Sicherheit	Gefährlich	0,44	0,022	1,06	0,026
	Ungefährlich	1,19	0,009	0,33	0,231
	Objektübergreifend	0,67	0,016	0,55	0,023

schen an den Roboter geringer als bei der *Objektübernahme* zuvor. Dieser Unterschied war in den Randomisierungstests jedoch nur bei der Übergabe ungefährlicher Objekte in allen Kriterien signifikant. Hier waren die Mittelwertsunterschiede $M_{diff} > 1$. Alle anderen Mittelwertsunterschiede der sehenden Gruppe waren kleiner und waren entsprechend objektübergreifend lediglich für die Kriterien Komfort und Sicherheit signifikant, bei gefährlichen Objekten nur für Sicherheit.

In der Gruppe der Verblindeten waren die Werte bei *Objektrückgabe* konsistent höher als bei der *Objektübernahme* zuvor. Der Unterschied war in allen Kriterien jedoch nur für die Übergaben gefährlicher Objekte signifikant. Für die Kriterien Komfort und Sicherheit zeigten sich auch objektübergreifend signifikante Unterschiede. Zwischen Objektübernahme und Objektrückgabe ungefährlicher Objekte unterschieden sich die Ratings in dieser Gruppe nicht signifikant. Generell waren die Mittelwertsunterschiede zwischen Objektübernahme und Objektrückgabe gering und betrugen meist $M_{diff} < 1$.

3.4 Diskussion der Nutzerstudie

Ziel der Nutzerstudie war die Überprüfung der ermittelten Standardgreifposen sowie der dahinterstehenden Greifstrategien für 10 unterschiedliche Objekte für die robotergestützte Objektübergabe mit sehenden sowie verblindeten Probanden.

3.4.1 Objektiver Erfolg der Objektübergaben

Die angewandten Greifstrategien waren bei der *Objektübernahme* von Roboter zu Mensch in fast allen Fällen objektiv erfolgreich. Lediglich bei der Übergabe der Tasse wurden gelegentlich auch potenziell heiße Flächen berührt. Daher sollte im Fall einer heißen Tasse vor der Übergabe eine zusätzliche Warnung erfolgen. In jedem Fall als gefährlich einzustufende Objekte konnten dagegen stets objektiv sicher übergeben werden.

Bei der *Objektrückgabe* von Mensch zu Roboter war das Bild uneinheitlicher. In der Gruppe der Sehenden gelang die Objektrückgabe immer, wenn auch nicht immer stabil. Dabei wurde sehr deutlich, dass die sehenden Probanden die Standardgreifpose des Roboters spiegelten, mit der der Roboter ihnen das Objekt zuvor überreicht hatte. Das heißt, die Probanden verwendeten zur Objektrückgabe die gleichen Greifflächen wie bei der vorherigen Objektübernahme. Dadurch standen dem Roboter die gleichen Flächen zum Greifen zur Verfügung wie bei der Objektübernahme des Menschen vom Roboter, was die Anwendbarkeit der vordefinierten Greifstrategie sicherstellte. Die Objektrückgabe muss daher im Zusammenhang mit der zuvor erfolgten Objektübergabe an die Probanden gesehen werden. Aufgrund des visuellen Eindrucks der robotischen Greifpose des Objekts und dem empirisch gezeigten hohen subjektiven Sicherheitsgefühl bei dieser Greifpose ist davon auszugehen, dass sich sehende Probanden bewusst gegen eine Veränderung der Greifpose sowie gegen die eigene Anwendung menschlicher Konventionen der Objektübergabe entschieden. Dies bestätigt, dass die Übergabe von Mensch zu Roboter bei Sehenden von der zuvor gesehenen Greifpose geprägt war. In der Gruppe verblindeter Probanden zeigte sich dagegen, dass manche Probanden bei der Objektrückgabe gefährliche oder potenziell gefährliche Objekte so griffen, dass gefährliche Flächen durch ihre Hand verdeckt und vom Roboter abgewandt waren. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die erstmalige Übergabeinteraktion mit einem Roboter die Anwendung von Konventionen menschlicher Objektübergaben wahrscheinlicher macht. Unklar ist jedoch, ob dieses Ergebnis auch auf Personen mit Sehbehinderung zutrifft. Zudem wandten die Probanden die menschlichen Konventionen nicht in jedem Fall an. Um daher in dieser Übergaberichtung Verletzungen von Nutzern zu vermeiden, sollte der Roboter bei gefährlichen Objekten einen Hinweis

geben, dass bei Übergaben an den Roboter nur ungefährliche Flächen durch den Menschen gegriffen werden sollen.

Die Objektrückgabe der sehenden Probanden führte trotz der soeben beschriebenen Spiegelung der zuvor gesehenen Greifpose und der damit für den Roboter identischen zur Verfügung stehenden Greifflächen wie bei der vorherigen Objektübergabe nicht immer zu einem stabilen Griff des Robotergreifers. Im Fall des Messers bestätigt dies die empirischen Messergebnisse der technischen Greifposenentwicklung, da schmale, flache Objekte für den Robotergreifer schwierig zu greifen sind. Jedoch war die Greifpose des Hammers bei der Rückgabe am häufigsten instabil. Dies ist aufgrund der simplen und geraden Geometrie des Hammerkopfs überraschend.

3.4.2 Subjektive Bewertung der Objektübergaben

Aus Nutzersicht kann man die entwickelten Standardgreifposen sowie die dahinterstehenden Greifstrategien insgesamt als erfolgreich bewerten. Sämtliche Ratings aller Kriterien bewegten sich oberhalb der Skalenmitte, gefundene Unterschiede zwischen Objekten, Gruppen sowie Objektübernahme und Objektrückgabe waren gering. Dies bestätigt, dass die entwickelten Übergabestrategien eine sichere, komfortable und einfache Übergabe für sehende und verblindete Personen gewährleisten können.

Dennoch lassen sich aus den gefundenen Unterschieden Hinweise für die Gestaltung robotischer Übergaben ableiten. Die Ratings verblindeter Probanden wiesen bei der Objektübernahme des Menschen vom Roboter konsistent geringere Werte auf als sehende Probanden. Auch war das Urteil in der verblindeten Gruppe breiter gefächert. Dies könnte ein Indiz für eine gewisse Verunsicherung sein, weil sehende Menschen unter Sichteinschränkung im Gegensatz zu Menschen mit Sehbehinderung über keine etablierten Strategien für eine sichere Objektübergabe verfügen. Um dem entgegen zu wirken, könnten in derartigen Situationen zusätzliche verbale Hinweise unterstützen, um die Übergabe einfacher, komfortabler und sicherer zu gestalten (z. B. Langer et al. 2022). Allerdings kann auch die Isolation von allen optischen Informationen (auch sämtlicher Umgebungsreize) durch die Schlafbrille allgemein zu einer gewissen Verunsicherung der verblindeten Probanden geführt haben.

Zwischen den Übergaberichtungen zeigten die Randomisierungstests in der Gruppe der Sehenden nur bei der Objektrückgabe ungefährlicher Objekte in allen Ratingkriterien signifikant niedrigere Werte als bei der vorherigen Objektübernahme. Hier könnte sich widerspiegeln, dass der Roboter bei der Rückgabe den Hammer häufig nicht stabil greifen konnte. Auch sonst lagen in dieser Gruppe die Ratings bei der Objektrückgabe tendenziell niedriger als bei der Objektübernahme des Menschen vom Roboter. Das kann als Indiz für eine geringfügige Verunsicherung gewertet werden. In der Gruppe der Verblindeten zeigte sich ein entgegengesetztes Bild. Hier lagen die Ratings bei der Objektrückgabe tendenziell höher als bei der Objektübernahme des Menschen vom Roboter. Allerdings sind in dieser Gruppe die beiden Übergaberichtungen kaum vergleichbar, da das Objekt nicht in den Robotergreifer gegeben, sondern durch den technischen Versuchsleiter übernommen wurde. Dies stärkt die Annahme, dass die ungewohnte Objektübergabe zwischen Mensch und Roboter im Vergleich zur Objektübergabe zwischen Menschen verunsichernd wirken kann. Umso wichtiger ist es, die Übergabestrategie an menschlichen Konventionen auszurichten, um dennoch eine einfache, komfortable und sichere robotische Übergabe von Objekten gewährleisten zu können.

4 Fazit und Ausblick

Die vorgestellten Studien unterliegen bei allen diskutierten Erkenntnissen einigen Limitationen und eröffnen Fragen für zukünftige Forschung.

Die hier vorgestellten Standardgreifposen und Greifstrategien sind ausschließlich für den Greifer Barrett-Hand™ und die untersuchten Objekte gültig. Zukünftig ist zu untersuchen, inwiefern sich die hier vorgestellten Greifstrategien auf andere Greifer sowie allgemein für gefährliche Objekte abstrahieren lassen.

Die Untersuchungen zur **Entwicklung der Greifposen** haben gezeigt, dass mithilfe der Simulationsumgebung GraspIt eine Greifplanung für einfache Objekte, deren Formen durch einfache Primitive zu abstrahieren sind, gut durchführbar ist. Bei Objekten mit komplexeren Formen muss aufgrund fehlender Fähigkeiten der Algorithmik eine zusätzliche Bestimmung der Greifposen durch einen empirischen Ansatz erfolgen. Diese Herangehensweise erfordert Erfahrung in Bezug auf die Greiferkinematik und Objektstruktur, um das Objekt richtig und sicher im Greifer zu positionieren. Dabei konnte festgestellt werden, dass Objekte mit feinen dünnen Konturen, wie Schere und Messer, schlecht im Greifer fixierbar und daher instabil während der Übergabe sind. Ebenfalls schwierig sind formveränderliche Objekte, da diese beim Schließen des Greifers einen verringerten Widerstand bieten. Objekte mit parallelen Flächen in entsprechendem Abstand oder zylindrischer Form ermöglichen dagegen einen besonders stabilen Griff.

Mithilfe der identifizierten Greifstrategie kann das Risiko für die Objektübernahme und -rückgabe der Objekte reduziert werden. Hierfür führt die Greifstrategie diejenige Greifpose aus, die anhand festgelegter Kriterien für die aktuelle Situation die höchste Schutzwirkung abbildet. Kann die Sicherheit nicht gewährleistet werden, wird keine Übergabe oder Entgegennahme realisiert.

Ziel der **Nutzerstudie** war die Überprüfung der entwickelten Greifstrategie für die robotergestützte Objektübergabe pro Objekt mit sehenden sowie verblindeten Probanden. Diese kann abschließend übergreifend als erfolgreich bewertet werden.

Bei der Objektrückgabe an den Roboter waren die beobachteten Muster berührter Greifflächen der Probanden abhängig von der zuvor erfolgten Objektübernahme. Dennoch gelang die Greifpose des Roboters bei der Objektrückgabe nicht immer stabil. Zukünftige Studien sollten daher das Greifen bei der Objektübergabe des Menschen zum Roboter ohne vorherige Objektübernahme des Menschen vom Roboter untersuchen. Für diesen Fall ist es wahrscheinlich, dass die robotische Greifstrategie angepasst oder neu entwickelt werden muss, um eine einfache, komfortable und sichere Objektübergabe zu gewährleisten. Zudem zeigte vor allem die verblindete Gruppe Anzeichen einer gewissen Verunsicherung. Aufgabe zukünftiger Forschung sollte es sein, Faktoren zu deren Reduzierung zu finden. Ferner schränkt die pandemiebedingt begrenzte Stichprobengröße die Aussagekraft der Studie ein. Weitere Studien sollten daher die entwickelten Übergabestrategien für Assistenzrobotik untersuchen. Die mögliche Verunsicherung der verblindeten Probanden könnte auch durch die Isolation von sämtlichen optischen Informationen durch die Schlafbrille bedingt gewesen sein, was bei einer bloßen Sichtverdeckung in der Praxis nicht der Fall wäre. In weiteren Studien sollten die entwickelten Übergabestrategien daher erneut mit einer anderen Operationalisierung von Sichteinschränkung untersucht werden. Im Gegensatz zu verblindeten Personen ist zudem zu erwarten, dass blinde und sehbehinderte Personen aufgrund ihrer Erfahrung mit menschlichen Objektübergaben unter Sichteinschränkung erlernte Übergabestrategien haben und diese auch in MRK-Situationen nutzen. Weitere Studien sollten daher untersuchen, inwieweit die Anwendung solcher Übergabestrategien durch einen Roboter auch von blinden und sehbehinderten Personen als sicher und angenehm wahrgenommen wird. Auch scheint Vorerfahrung mit robotischen Übergaben einen wesentlichen Einfluss auf das menschliche Greifen bei Objektübergaben zu haben, und sollte daher in zukünftigen Studien näher untersucht werden.

Zusammengefasst bestärken die Ergebnisse die Empfehlung, dass sich Ausrichtung und Greifpose der Objekte an erlernten menschlichen Konventionen orientieren sollte (Cakmak et al. 2011). Die Empfehlung kann zudem für gefährliche Objekte erweitert werden, deren gefährliche Flächen durch den Robotergreifer verdeckt und von der Person abgewandt ausgerichtet werden sollten. Für die Übergaberichtung Mensch zu Roboter hat sich herausgestellt, dass Menschen ohne Vorerfahrung auch Robotern gegenüber menschliche Konventionen verwenden und sich damit gegebenenfalls gefährden, indem sie selbst gefährliche Objektflächen umgreifen, anstatt sie dem Roboter entgegen zu halten. In diesem Fall muss der Roboter durch explizite Hinweise zum Greifen unterstützend tätig werden, damit die robotische Greifstrategie erfolgreich eingesetzt werden kann. Mit der Demonstration erfolgreicher Greifstrategien für die robotergestützte Übergabe gefährlicher Objekte unter Sichteinschränkung wurde somit ein wertvoller Beitrag zur Entwicklung barrierefreier und übergreifend anwendbarer Assistenzrobotik geleistet.

Danksagung Wir danken Daniel Wimpff von der SIKOM GmbH für die Erstellung des Wizard-of-Oz Sprachdialogs, Theresa Langer für die Erstellung der Objektgrafiken und den Gutachtern für ihre konstruktive Unterstützung.

Förderung Diese Forschungsarbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt (Projekt: MIRobO, 16SV7969K). Der Geldgeber hatte keinen Einfluss auf das Studiendesign, die Erhebung, Analyse und Interpretation der Daten, auf das Verfassen oder Einreichen des Berichts.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de.

Literatur

Bdiwi M (2014) Integrated sensors system for human safety during cooperating with industrial robots for handing-over and assembling tasks. Proc CIRP 23:65–70

Bohg J, Morales A, Asfour T, Kragic D (2014) Data-driven grasp synthesis—A survey. IEEE Trans. Robot. 30/2:289–309. http://arxiv.org/pdf/1309.2660v2. Zugegriffen: 14.11.2022

Cakmak M, Srinivasa S, Lee M, Forlizzi J, Kiesler S (2011) Human preferences for robot-human hand-over configurations. EEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco. I

Cochet H, Guidetti M (2018) Contribution of developmental psychology to the study of social interactions: some factors in play, joint attention and joint action and implications for robotics. Front Psychol 9:1992

DIN e. V., Deutsches Institut für Normung (2010) DIN EN ISO 12100:2010 Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung. Berlin: Beuth.

DIN e. V., Deutsches Institut für Normung (2019) DIN EN ISO 9241-210 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme. Berlin: Beuth.

ELAN (Version 5.8) [Computer software]. (2019). Nijmegen: Max Planck Institute for Psycholinguistics. Retrieved from https://tla.mpi.nl/tools/tla-tools/elan/

Feix T, Romero J, Schmiedmayer HB, Dollar AM, Kragic D (2016) The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types. Ieee Trans Human-mach Syst 46(1):66–77

Ferrari C, Canny J (1992) Planning optimal grasps. IEEE International Conference on Robotics and Automation,, Nice

GraspIt (2023) GraspIt! is a tool for grasping research. https://graspit-simulator.github.io/. Zugegriffen: 27. März 2023

Koene A, Remazeilles A, Prada M, Garzo A, Puerto M, Endo S, Wing A (2014) Relative importance of spatial and temporal precision for user satisfaction in Human-Robot object handover Interactions. In: Society for the Study of Artificial Intelligence and the Simulation of Behaviour (Ed) AISB 2014—50th Annual Convention of the AISB, London

Langer D, Legler F, Kotsch P, Dettmann A, Bullinger AC (2022) I let go now! Towards a voice-user interface for handovers between robots and users with full and impaired sight. Robotics 11/5:Nr. 112. https://doi.org/10.3390/robotics11050112

R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna (https://www.R-project.org/.)

Barrett Technology BarrettHand™ Typ BH8-280. https://advanced.barrett.com/barretthand. Zugegriffen: 8. Dez. 2021

trabala K, Lee MK, Dragan A, Forlizzi J, Srinivasa SS, Cakmak M, Micelli V (2013) Toward seamless human-robot handovers. J Human Robot Interact 2:112–132

Universal Robots (2016) Die Zukunft ist kollaborierend. https://www.universal-robots.com/de/download-center/#/cb-series/ur10. Zugegriffen: 8. Dez. 2021

Walde P, Langer D, Legler F, Goy A, Dittrich F, Bullinger AC (2019) Interaction strategies for handing over objects to blind people. Human Factors and Ergonomics Society (HFES) Europe Chapter Annual Meeting, Nantes (Poster presentation)

Yang W, Paxton C, Mousavian A, Chao Y, Cakmak M, Fox D (2021) Reactive human-to-robot Handovers of arbitrary objects. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shaanxi

Zaidi L, Corrales RJ, Sabourin L, Bouzgarrou B, Mezouar Y (2020) Grasp Planning Pipeline for Robust Manipulation of 3D Deformable Objects with Industrial Robotic Hand + Arm Systems. Appl Sci J 8736. https://doi.org/10.3390/app10238736