

A woman in a black dress stands on the left, interacting with a white robotic arm on the right. The scene is overlaid with a semi-transparent teal rectangle containing text. The background is a light grey grid with various colored lines and circles representing motion or interaction paths.

CoBot Studio

Praxis-Guidelines für die
Gestaltung von Mensch-Roboter-
Interaktionen.

01

VORWORT

02

DIE STUDIEN

03

ERGEBNISSE &
GUIDELINES

04

REFERENZEN



Technische Neuerungen und eine zunehmende Erschwinglichkeit von Robotern führen bereits seit mehreren Jahren zu einem vermehrten Einzug von kollaborativen Leichtbaurobotern (sogenannten Cobots) in menschliche Lebensbereiche. Insbesondere im industriellen Umfeld hat das Interesse an kollaborativen Robotern bei Entscheidungsträger:innen in Unternehmen signifikant zugenommen. Laut des Automatica Trendindex 2022 sprechen sich 80% der 100 befragten Fach- und Führungskräfte aus Industrie-Unternehmen für einen verstärkten Einsatz von Robotik aus [1]. Ein Trend, der sich auch in weiteren Umfragen bestätigt [2, 3].

Ein reibungsloser Ablauf und Erfolg von Mensch-Roboter-Interaktionen hängt neben technischen Aspekten, wie adäquater Sicherheit des Roboters, entscheidend von den Einstellungen und dem Vertrauen menschlicher Interaktionspartner:innen ab. Ein angemessenes Maß an Vertrauen in Roboter führte in wissenschaftlichen Studien nachweislich zu mehr Akzeptanz, einer stärkeren Intention zur Zusammenarbeit mit Robotern sowie zu höherer Effizienz von Mensch-Roboter-Teams [4, 5]. Sicherheit und Vertrauen sind menschliche Grundbedürfnisse, die wiederum auf gegenseitigem Verständnis aufbauen. Für die erfolgreiche Mensch-Roboter-Kollaboration bedeutet dies: So wie für den Roboter Zustände und Intentionen seiner Interaktionspartner:innen identifizierbar sein müssen, sollten umgekehrt auch Zustände und geplante

Aktionen des Roboters für den Menschen erkennbar sein. Wann ein Cobot etwa aktiv in den gemeinsamen Arbeitsprozess eingreifen oder in welche Richtung er sich im nächsten Schritt bewegen wird, ist idealerweise intuitiv verständlich. Darüber hinaus zeigen sich Trainingstutorials als sinnvoll. Diese können insbesondere unerfahrenen Interaktionspartner:innen zukünftig eine Möglichkeit geben, sich leichter mit dem Roboter und seinen Funktionsweisen vertraut zu machen.

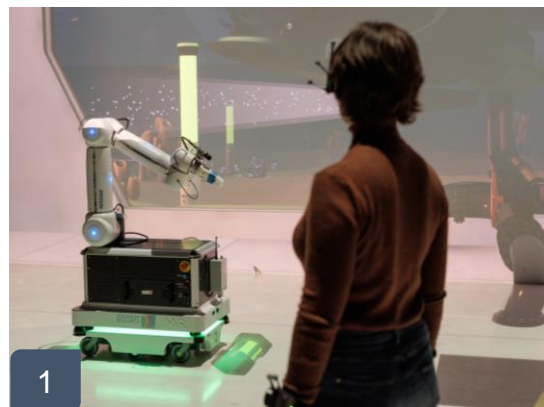
In der Frage, welche robotischen Signale in welchen Aufgabenkontexten gut verständlich sind, herrscht in Forschung und Industrie aber noch viel Erkenntnisbedarf. Des Weiteren besteht Unklarheit in Bezug auf die passende Ausführlichkeit der Informationsmenge in Tutorials und wie hoch deren zusätzlicher Effekt auf Einstellungen und Wahrnehmungen bezüglich Robotern tatsächlich ausfällt.

Um diesen Fragestellungen nachzugehen und Best Practices für eine vertrauenssteigernde und angenehme Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter zu entwickeln, führte das interdisziplinäre CoBot Studio Konsortium von 2019 bis 2022 wissenschaftliche Studien durch.

Eine Übersicht dieser Studien und der daraus entstandenen Guidelines möchten wir Ihnen im Folgenden präsentieren.

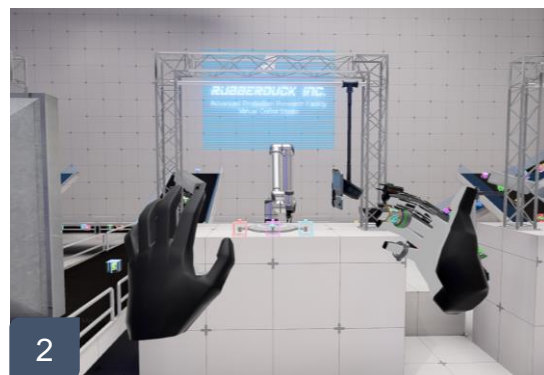
Das interdisziplinäre Konsortium des CoBot Studios, bestehend aus Expert:innen der Psychologie, Robotik, Informatik, multimodaler Kommunikation, Game Design sowie Soziologie entwickelte drei immersive Forschungsspiele in Virtual- und Mixed-Reality. Diese ermöglichten Teilnehmenden mit variierender Expertise und Altersstruktur, verschiedene praxisrelevante Kollaborationsszenarien spielerisch mit dem mobilen Manipulator CHIMERA [9] zu erleben [Abb. 1]. Hierzu zählten das Packen von Paketen, die Qualitätsinspektion oder das Einsammeln von Objekten – sowohl im freien Raum als auch auf kurze Distanz. Die Teilnehmenden konnten dabei den Roboter je nach Szenario über Handsignale oder einen Controller steuern [Abb. 2,3].

Gleichzeitig ermöglichten diese innovativen Forschungsumgebungen wissenschaftliche Erhebungen in kontrollierbaren Bedingungen unter der Verwendung modernster Tracking-Methoden. Zur Erfassung der subjektiven Einstellungen der Teilnehmenden vor und während der Kollaboration wurden Tablets und im Spiel eingeblendete, sogenannte „In-Situ“-Fragebögen eingesetzt [Abb. 3]. Objektive Leistungsparameter, wie die Kollaborationszeit, wurden automatisch getracked. Um die Fragestellung nach geeigneten Robotersignalen für die Industrie sowie des Mehrwerts von Tutorials systematisch zu erforschen, wurden insgesamt drei wissenschaftliche Erhebungen durchgeführt.



1

Der Roboter CHIMERA, bestehend aus einem kollaborativen Roboterarm (UR10), sowie einer mobilen Plattform (MiR100).



2

Digitale Repräsentation der Hände einer Teilnehmenden zur Robotersteuerung im ersten Forschungsspiel.



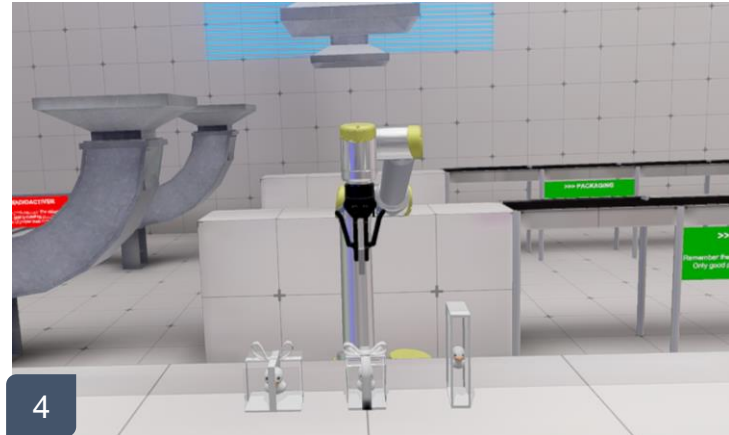
3

Eine Teilnehmende beantwortet einen interaktiven In-Situ-Fragebogen in der Mixed-Reality-Umgebung.

Forschungsspiel I: Evaluation von Roboter-Kommunikationsmodalitäten

Im ersten Forschungsspiel wurde die Wirkung verschiedener Formen der non-verbale(n) Roboter-Kommunikation in einer industriellen Virtual-Reality-Umgebung getestet. Hierfür wurden Teilnehmende je einer Experimentalgruppe zugeteilt, in welcher der digitale Zwilling des Roboters CHIMERA eine der möglichen Kommunikationsmodalitäten während der gemeinsamen Bearbeitung verschiedener Aufgaben zeigte. Kern dieser Aufgaben war die Vorhersage der Roboterintentionen. Teilnehmende bewerteten den Roboter während des Forschungsspiels hinsichtlich Vertrauen, Nutzungsakzeptanz, Verständlichkeit und Vorsehbarkeit seiner Intentionen. Zusätzlich wurde die menschliche Performance während der Kollaboration mit dem Roboter erfasst.

Die Auswahl der Kommunikationsmodalitäten des Roboters erfolgte unter Berücksichtigung bisheriger Befunde aus der Robotik,



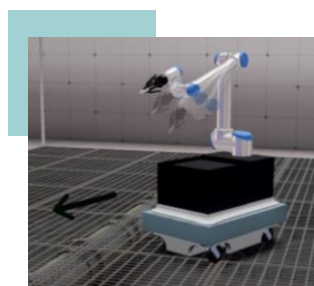
der Kinematik sowie einer zusätzlich durchgeführten Online-Vorstudie [6, 7]. Für die Kommunikation von Zuständen und Intentionen des Roboters im freien Raum wurden Lichtsignale und motorische Signale verglichen [Abb. 5]. Bei der Aufgabebearbeitung auf kurze Distanz [Abb. 4] erfolgte ein Vergleich zwischen verschiedenen Objektausrichtungshinweisen (Cues) von Teilen des Roboterarms. Vergleichbare Cues unterstützen nachweislich die gegenseitige Intensionsdetektion in menschlichen Interaktionen [8].

Robotersignale für die Interaktion im freien Raum

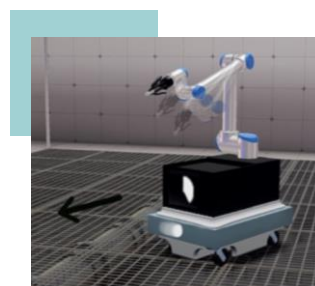


5

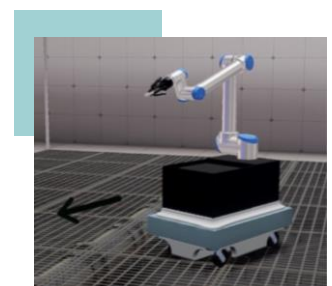
Lichtsignal



Motorisches Signal



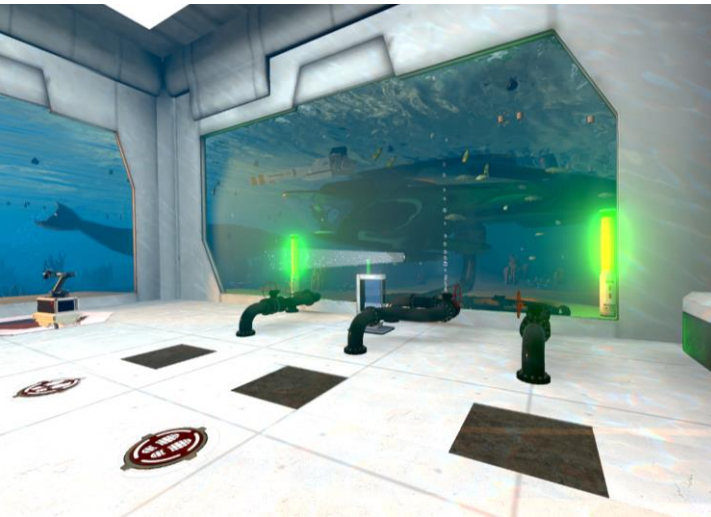
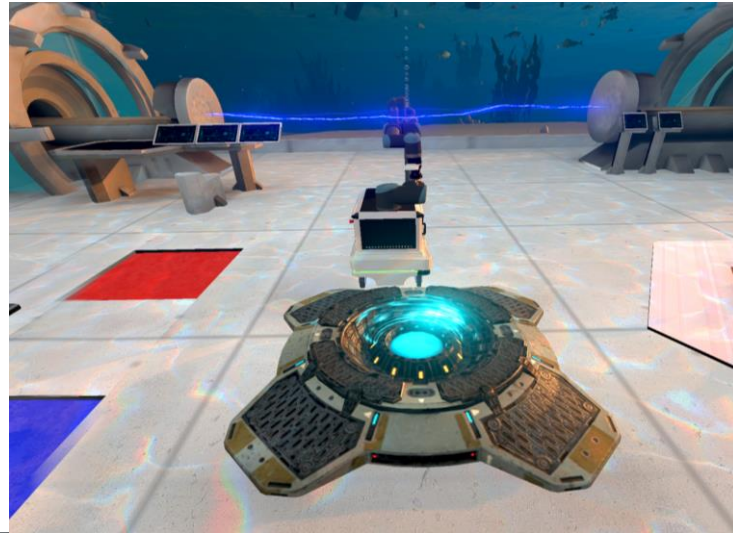
Kombinationssignal



Kontrollgruppe (kein Signal)

Forschungsspiel II: Die Wirkung von Virtual-Reality-Tutorials

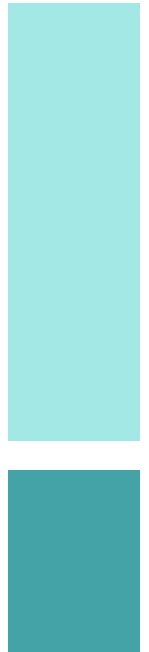
Die im ersten Forschungsspiel als besonders wirkungsvoll identifizierten Signale wurden für die Kommunikation des Roboters im zweiten Virtual-Reality (VR) Forschungsspiel verwendet. In diesem Spiel wurde die Informationstiefe des Tutorials variiert, das Teilnehmende vor der Interaktion mit dem Roboter sahen [genaue Inhalte s. Abb. 6].



Hierdurch konnte untersucht werden, ob eine zusätzliche Einführung zu den intuitiv verständlichen Robotersignalen und allgemeinen Charakteristika des Roboters eine weiterführende Wirkung auf die bereits im ersten Forschungsspiel erhobenen Parameter hatte. Die Interaktion zwischen Teilnehmenden und dem Mobilmanipulator erfolgte in einer virtuellen Unterwasser-Forschungsstation.

Tutorial-Inhalte für die zwei Studiengruppen

		+ Informationstiefe	- Informationstiefe
	Spielsteuerung	Objekte auswählen Durchgang starten	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
	Einführende Informationen Roboter	Fähigkeiten/ Funktionen Geschwindigkeit Armreichweite	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Robotersignale	Distanzsignal zu Zielpunkt „Komm mit“, „Achtung“, „Processing“	„Roboter kommuniziert über Signale“
	Robotersteuerung	„Stopp“ „Aufmerksamkeit“ „Komm mit“	„Roboter reagiert auf Gesten“



Forschungsspiel III – Die Wirkung von Mixed-Reality Tutorials

Um physische und virtuelle Wahrnehmungsebenen zu vergleichen, stellte das dritte Forschungsspiel eine Replikation des zweiten Spiels in der Mixed-Reality (MR) Simulationsumgebung Deep Space 8K des Ars Electronica Center Linz dar. Hier interagierten die Teilnehmenden mit dem physischen Roboter CHIMERA in einem

interaktiven Raum mit dreidimensionaler Projektion auf Wand und Boden. Zusätzlich zu den zuvor beschriebenen quantitativen Befragungen und Performance-Trackings wurden mit einer Teilmenge der Teilnehmenden nach der Interaktion mit dem Roboter qualitative semi-strukturierte Interviews durchgeführt.



Stichprobe der ersten Studie



Stichprobengröße

122 Personen
(56 weiblich, 65 männlich, 1 divers)



Sprache

Deutsch: 109
Englisch: 13



Altersverteilung

Durchschnittsalter: 31 Jahre
Altersspanne: 14-65 Jahre



Vorerfahrung mit Robotern

Ja: 22 Personen
Nein: 100 Personen

Roboterkommunikation für die Kollaboration im freien Raum

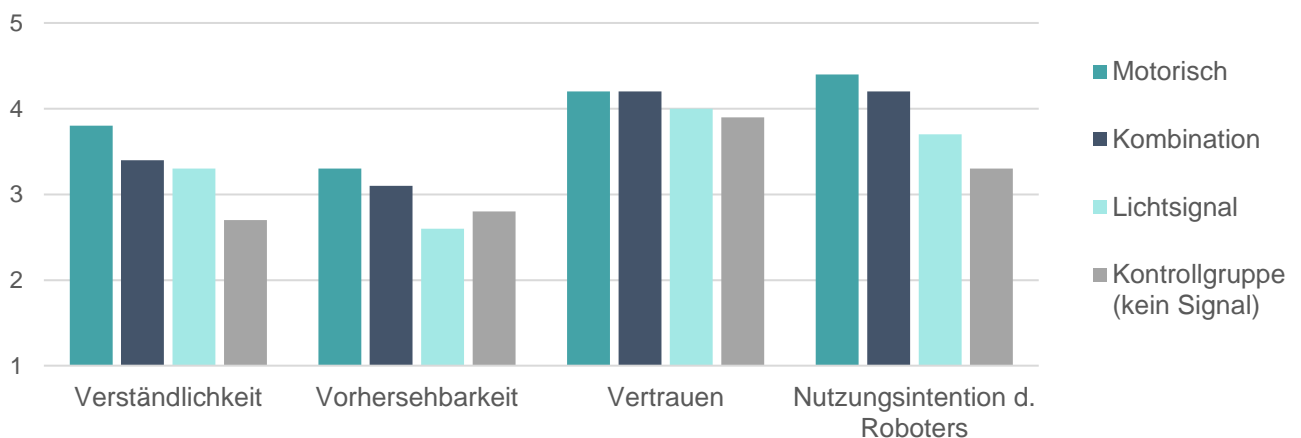
Die Ergebnisse des ersten Forschungsspiels deuten auf eine statistische Überlegenheit des motorischen Distanzsignals hin.

Teilnehmende, die dieses Signal alleine oder in Kombination mit dem Lichtsignal sahen, bewerteten den Roboter und seine Handlungen als verständlicher. Dies führte indirekt auch zu signifikant höheren Vertrauensbewertungen in den Roboter.

Teilnehmende, die mit einem Roboter arbeiteten, der motorische Intentionssignale

zeigte, gaben darüber hinaus eine signifikant höhere Nutzungsabsicht im Vergleich zu Personen an, bei denen der Roboter Lichtsignale oder keine Signale zur Kommunikation verwendete. Weitere Analysen zeigten, dass diese höhere Nutzungsintention durch die positiveren Verständlichkeits- und Vertrauensbewertungen erklärt werden kann. Es ergaben sich keine Unterschiede in Bezug auf die Verständlichkeitsbewertungen des Roboters.

Bewertungen des Roboters in den Signalgruppen

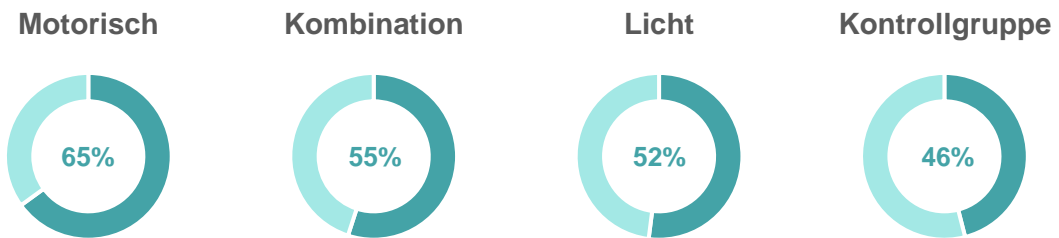


Stichprobe = 122 Personen

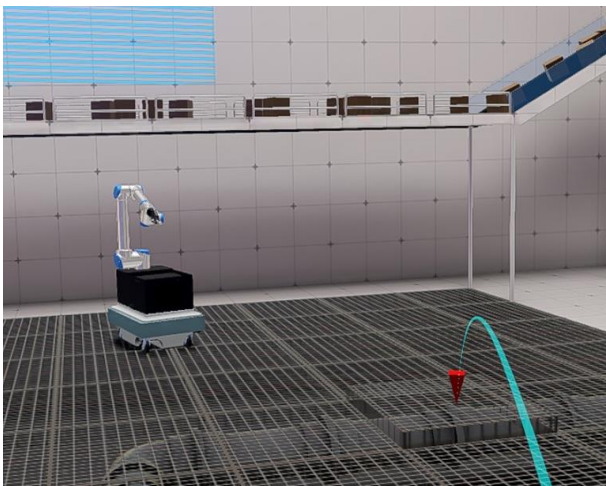
Neben einer positiveren subjektiven Bewertung der Teilnehmenden ermöglichten motorische Intentionssignale zudem eine bessere Vorhersageleistung der Roboterintentionen. So lagen Teilnehmende, die das motorische Signal des Roboters sahen, in ihrer Schätzung näher am tatsächlichen Zielort als Teilnehmende, bei denen der Roboter Lichtsignale oder kein Signal

zeigte. Darüber hinaus waren ihre Vorhersagen signifikant häufiger richtig als die der Teilnehmenden in anderen Signalgruppen. Keine Unterschiede zwischen den Signalgruppen wurden bezüglich der benötigten Zeit zur Aufgabebearbeitung und der subjektiv wahrgenommenen Vorhersehbarkeit des Roboters gefunden.

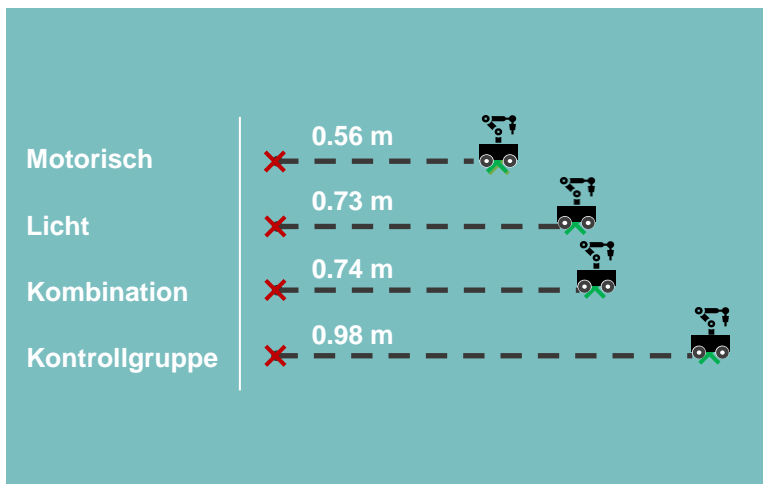
Richtigkeit der Zielort-Vorhersage in den Signalgruppen



Stichprobe = 122 Personen | Durchschnitt aus 6 Versuchsdurchgängen



Abstand geschätzter – tatsächlicher Zielort des Roboters



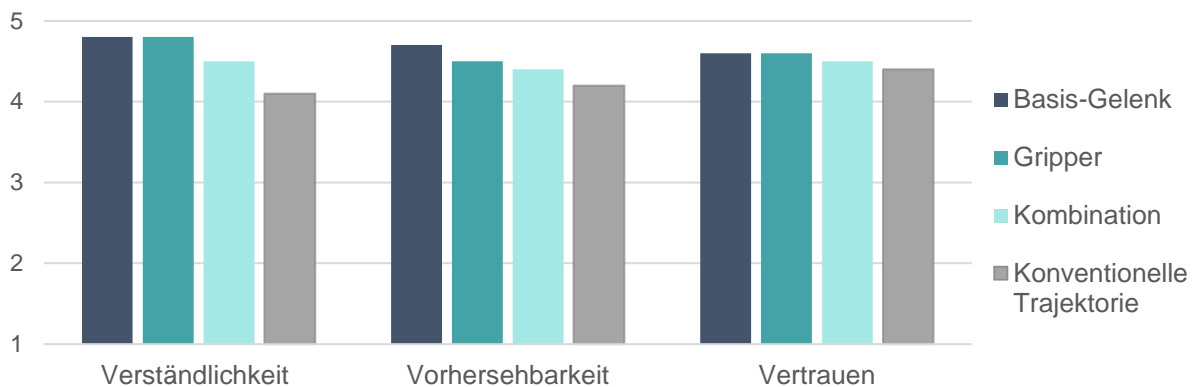
Stichprobe = 122 Personen | Durchschnitt aus 6 Versuchsdurchgängen

Roboterkommunikation für die Kollaboration auf kurze Distanz

Die Ergebnisse des ersten Forschungsspiels zeigten, dass Objektausrichtungshinweise die subjektive Verständlichkeit des Roboters signifikant verbessern können, wenn diese im robotischen Bewegungsablauf vorangestellt werden. Hierzu zählen die Ausrichtung des Basis-Gelenks seines Arms sowie seines

Greifers auf das Zielobjekt. Ein Herausstellen des Basis-Gelenks führte in der Tendenz zudem zu höheren subjektiven Bewertungen der Vorhersehbarkeit von Roboterbewegungen. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf Vertrauen und Nutzungsintention.

Bewertungen des Roboters in den Studiengruppen



Stichprobe = 122 Personen

Zusätzlich zu den positiveren subjektiven Bewertungen führten robotische Bewegungsabläufe mit vorangestellten Ausrichtungscues teilweise auch zu einer besseren Vorhersageleistung der Teilnehmenden. So konnten Teilnehmende in diesen Gruppen signifikant früher in der Robotertrajektorie eine Vorhersage über seine Zielobjekte treffen, als Teilnehmende, die konventionelle Trajektorien ohne herausgestellte Bewegungscues sahen.

In Bezug auf weitere erhobene Performance-Kriterien, wie die Zeit der gemeinsamen Aufgabenbearbeitung sowie die Richtigkeit der Vorhersage von Roboterintentionen ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Studiengruppen. Trajektorien mit vorangestellten Objektausrichtungscues führten somit zu einer vergleichbaren Performance, im Vergleich zu konventionellen Robotertrajektorien.

Kommunikation kollaborativer nicht-humanoider Roboter

- Motorische Signale sind Lichtsignalen vorzuziehen, um Status und Intentionen von nicht-humanoiden Robotern (intuitiv) verständlich zu machen. Motorische Signale konfliktieren darüber hinaus weniger wahrscheinlich mit den variierenden Licht- und Audiosignalen, die häufig in industriellen Arbeitsumfeldern vorherrschen.
- In der Mensch-Roboter-Kollaboration auf kurze Distanz ermöglicht das Voranstellen von Objektausrichtungscues des Roboter-Arms und -Greifers eine Steigerung der Verständlichkeit von robotischen Greifbewegungen. Im Gegensatz zu expliziten Signalen, die eine Unterbrechung des robotischen Bewegungsablaufes erfordern, kann durch das Herausstellen solcher Ausrichtungscues ein flüssiger Bewegungsablauf des Roboters erhalten werden. Die Ergebnisse der CoBot Studie zeigen zudem, dass die so angepassten Robotertrajektorien eine frühere Vorhersage der Zielobjekte des Roboters ermöglichen.
- Menschen scheinen bei Interaktionen mit Robotern implizites Wissen zur Erkennung von zielgerichteten Handlungsintentionen aus menschlichen Interaktionen anzuwenden. Somit sollten nicht nur motorische Kommunikationssignale (wie z.B. Gesten), sondern auch die Bewegungsabläufe von Robotern so menschlich wie möglich gestaltet werden. Hierdurch kann die intuitive Verständlichkeit von Roboterhandlungen erhöht werden.
- Bei der Validierung geeigneter Kommunikationsmodalitäten von Robotern sollte neben den Auswirkungen auf objektive Leistungsparameter auch die subjektive Wahrnehmung von menschlichen Kollaborationspartner:innen berücksichtigt werden. Diese kann von objektiven Performance-Maßen divergieren und ist ebenso essentiell für die Akzeptanz und das Vertrauen gegenüber Robotern.

Stichproben der zweiten und dritten Studie



Stichprobengröße

42 | 61 Personen



Sprache

Deutsch



Altersverteilung

Durchschnittsalter: 29 | 35 Jahre

Altersspanne: 18-69 | 20-66 Jahre



Vorerfahrung mit Robotern

Ja: 10 | 6 Personen

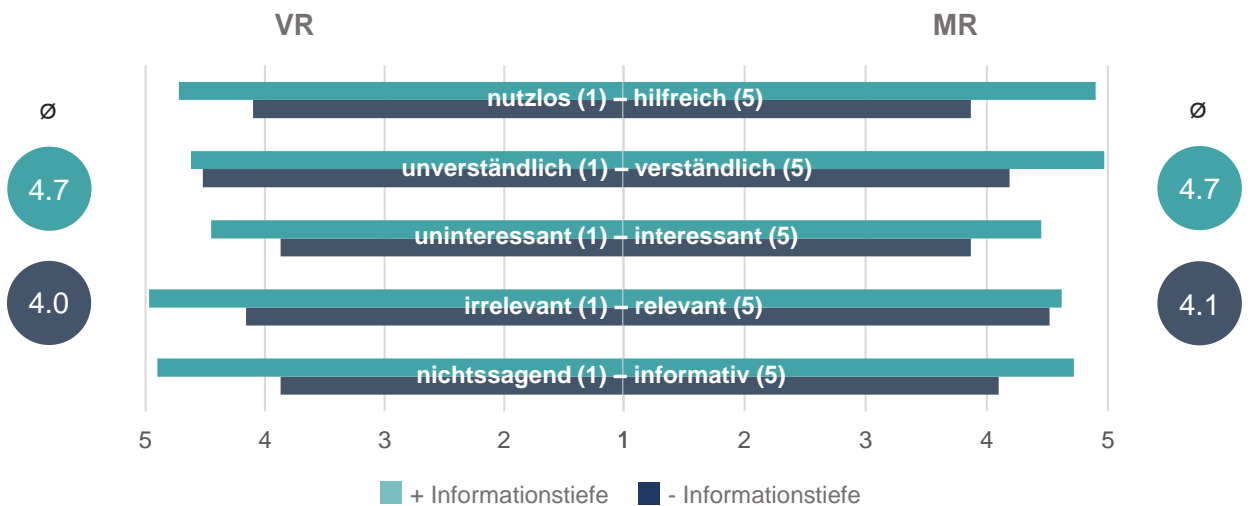
Nein: 32 | 55 Personen

Die Rolle von Tutorials

Personen, die das Tutorial mit umfassenden Erklärungen zu der Funktion der Roboter-Signale und -Verhaltensweisen erhielten, bewerteten dieses Tutorial als signifikant positiver im Vergleich zu Personen, die Tutorials mit weniger Informationen zu dem

Roboter erhielten. Des Weiteren bewerteten Personen, die ein informativeres Tutorial sahen, den Roboter auch nach der Interaktion tendenziell als verständlicher und seine Handlungen als vorhersehbarer.

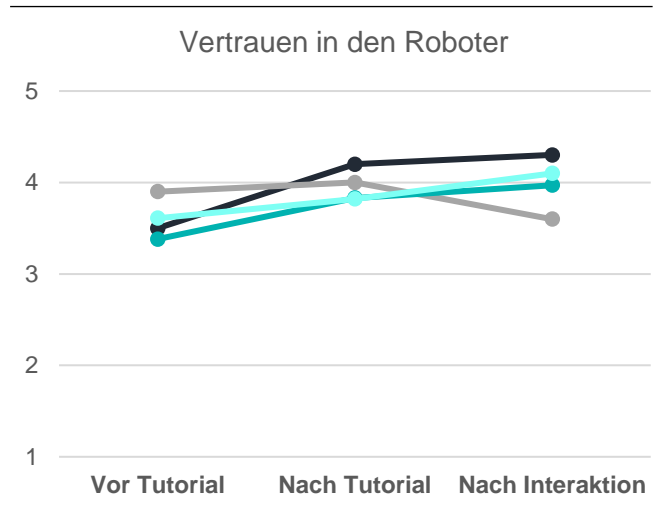
Bewertungen der Tutorials in Virtual- und Mixed-Reality



Stichprobe = 122 Personen

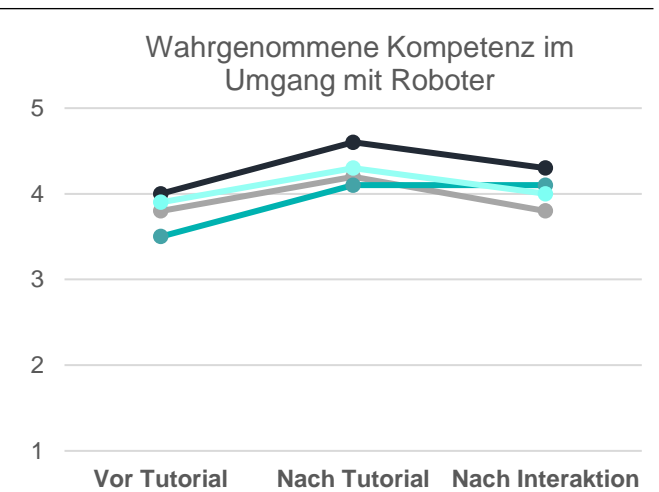
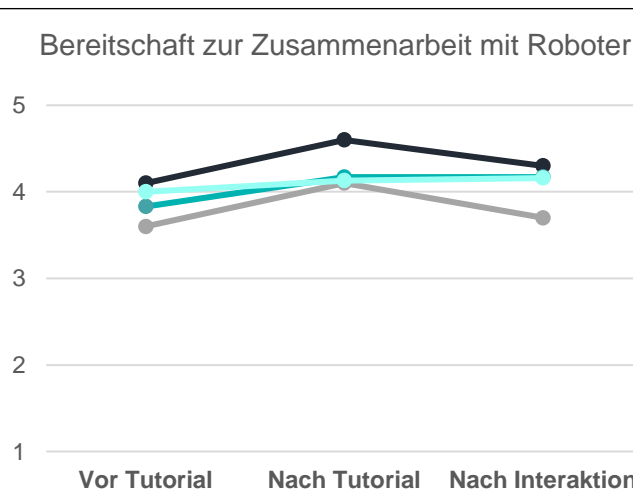
Personen, die detailliertere Informationen zum Roboter im Tutorial erhielten, zeigten in der VR-Studie einen Anstieg der Vertrauensratings über die Dauer der Interaktion, während bei Personen in der Vergleichsgruppe das subjektive Vertrauen in den Roboter tendenziell abnahm. Dieser Effekt konnte nicht für das Tutorial in der MR-Umgebung nachgewiesen werden.

Grundlegend führte die Darbietung des Tutorials in beiden Studien zu positiveren kognitionsbasierten Bewertungen in den Tutorial-Gruppen (hierzu zählen die Bereitschaft zur Zusammenarbeit mit dem Roboter sowie die wahrgenommene Kompetenz im Umgang mit dem Roboter). Der Verlauf der kognitionsbasierten



Stichprobe = 42 | 61 Personen

Bewertungen des Roboters variierte jedoch je nach dem zu bewertenden Merkmal zum Messzeitpunkt nach der Interaktion. Dies könnte durch die individuelle Interaktionserfahrung der Teilnehmenden bedingt sein, die diesem dritten Messzeitpunkt vorausging.



+ Informationstiefe in VR
 - Informationstiefe in VR
 + Informationstiefe in MR
 - Informationstiefe in MR

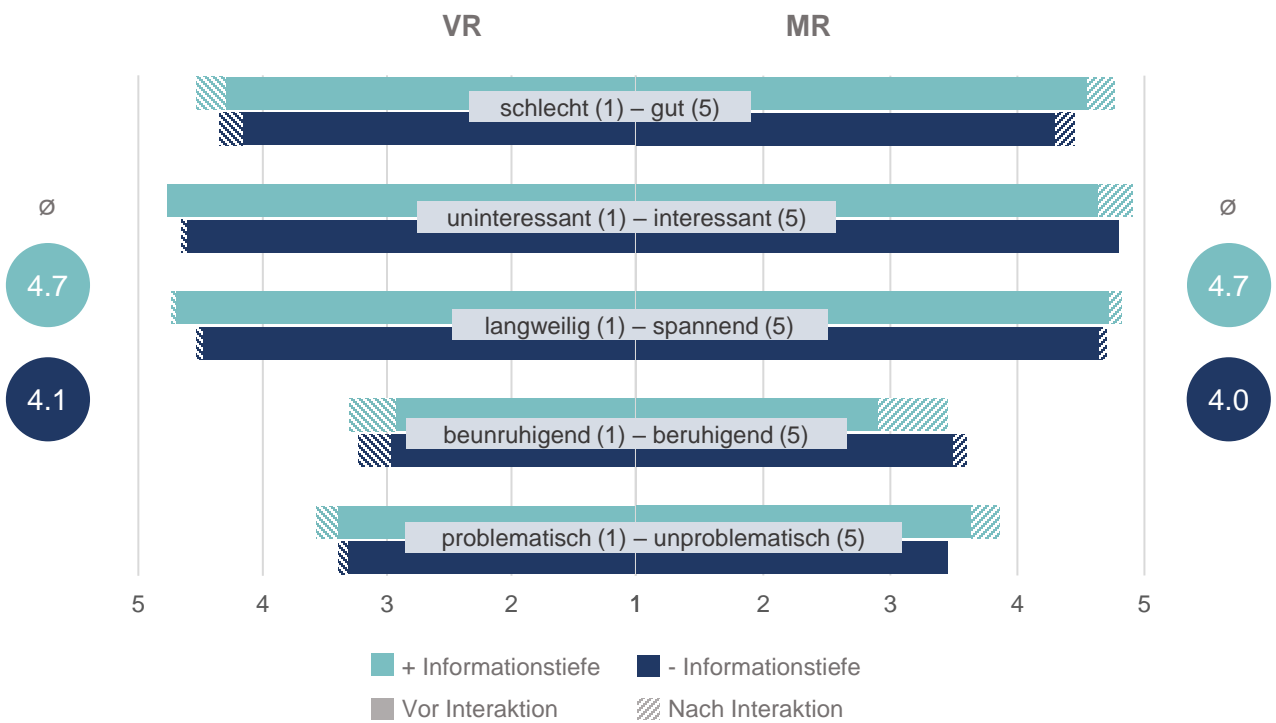
Stichprobe = 42 | 61 Personen

Die affektiven Einstellungen gegenüber dem Roboter, gemessen vor und nach der Interaktion in VR und MR, wurden in beiden Tutorial-Gruppen positiver. Unterschiede in der Informationstiefe des Tutorials führten jedoch nicht zu signifikanten Unterschieden in der Performance zwischen den Gruppen. Zudem konnte keine der Tutorialgruppen als

tendenziell besser in den erhobenen Performancemaßen, wie der benötigten Kollaborationszeit, identifiziert werden.

Die Bewertungen bezüglich des individuellen Spielerlebnisses der Teilnehmenden fielen sowohl im VR- als auch im MR-Forschungsspiel sehr positiv aus.

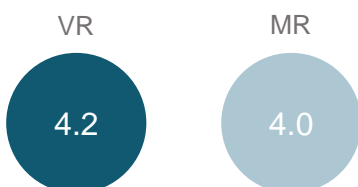
Affektive Einstellungen der Teilnehmenden gegenüber dem Roboter



Stichprobe = 42 | 61 Personen

Bewertungen des Spielerlebnisses in Virtual- und Mixed-Reality

Wahrgenommene Immersion



Spielvergnügen



Stichprobe = 42 | 61 Personen; Durchschnitt aus jeweils 8 Bewertungsdimensionen, bewertet auf einer Skala von 1= gering bis 5 = sehr

Wirkung und Gestaltung von Tutorials zu kollaborativen Robotern

- Tutorials mit umfangreicheren Informationen zu Robotern bieten eine gute Vorbereitung für die Interaktion mit diesen Robotern, da hierdurch eine positivere Einstellung und ein positiverer Ersteindruck erzielt werden können. Zudem können Tutorials das Verständnis und Vertrauen gegenüber Robotern in nachfolgenden Interaktionserfahrungen positiv beeinflussen.
- Tutorials sollten realistische Erwartungen bei menschlichen Interaktionspartner:innen bezüglich der Funktionen des Roboters sicherstellen. Hierbei ist es ebenfalls sinnvoll, vorab über potenzielle Fehlerquellen in der Interaktion und Limitationen des Roboters zu informieren.

Virtual- und Mixed-Reality als immersive Umgebungen für initiale Mensch-Roboter-Interaktionen

- VR- und MR-Umgebungen stellen vielversprechende Medien für initiale Mensch-Roboter-Interaktionen dar. Ausgehend von den Ergebnissen der CoBot-Studien eröffnen diese Umgebungen eine als authentisch und unterhaltsam erlebte Möglichkeit für das Sammeln von Interaktionserfahrungen mit Robotern. Diese Umgebungen können insbesondere sinnvolle Alternativen darstellen, wenn die Mensch-Roboter-Interaktionen in risikobehafteten Umfeldern stattfindet. MR- und VR-Umgebungen bieten in einem solchen Fall eine sichere und kontrollierbare Umgebung für das initiale Üben verschiedener Handlungsabläufe. Auch Remote-Training für Berufseinsteiger:innen oder Fortbildungen können hierdurch realisiert werden, ohne tatsächliche Arbeitsabläufe zu stören.
- Interaktionen mit Robotern in VR werden, ausgehend von den Befunden der CoBot-Studien, als vergleichbar zu initialen physischen Interaktionen in einer MR-Umgebung wahrgenommen. Die Wirkung verschiedener Signale oder Bauteile von Robotern auf menschliche Interaktionspartner könnte somit vergleichbar einfach in VR getestet werden.

- [1] Automatica Messe München. 2022. Automatica Trendindex 2022. Abgerufen von <https://automatica-munich.com/de/newsroom/presse-downloads/presseinformationen/detail/mit-robotik-und-automation-zukunftssicher-produzieren.html>
- [2] Amt für Wirtschaftsförderung Dresden und Dresden Marketing. 2022. Deutscher Robotik Spiegel 2022. Abgerufen von <https://www.dresden.de/de/wirtschaft/tomorrow-s-home/robotik/robot-valley/rv-robotik-spiegel.php>
- [3] Reichelt Elektronik und OnePoll. 2019. Abgerufen von <https://www.reichelt.de/magazin/studien/jedes-zweite-befragte-unternehmen-arbeitet-bereits-mit-robotern/>
- [4] V. Groom, C. Nass. 2007. Can robots be teammates? Benchmarks in human–robot teams. *Interaction Studies* 8, pp. 483–500. <https://doi.org/10.1075/is.8.3.10grom>
- [5] T. L. Sanders, T. Wixon, K. E. Schafer, J. Y. C. Chen, P. A. Hancock. 2014. The influence of modality and transparency on trust in human-robot interaction. *2014 IEEE International Interdisciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA)*, pp. 156–159. <http://dx.doi.org/10.1177/1071181311551298>
- [6] D. Szafir, B. Mutlu, T. Fong. Communicating Directionality in Flying Robots. 2015. In *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 19-26. <https://doi.org/10.1145/2696454.2696475>
- [7] K. Baraka, S. Rosenthal, M. Veloso. 2016. Enhancing human understanding of a mobile robot’s state and actions using expressive lights. *2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 652–657. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2016.7745187>
- [8] L. McEllin, N. Sebanz, G. Knoblich. 2018. Identifying others’ informative intentions from movement kinematics. *Cognition*, pp. 246-258. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.08.001>
- [9] CHIMERA Roboter: <https://www.joanneum.at/robotics/infrastruktur/mobile-manipulation>

CoBot Studio ist eine Kooperation von:



Kontakt

LIT Robopsychology Lab
Linz Institute of Technology

Open Innovation Center
Johannes Kepler University Linz
Altenberger Str. 69
4040 Linz, Austria

info@cobotstudio.at
<https://cobotstudio.com>



CoBot Studio (Projektnr. 872590) wird durch das Programm „Ideen Lab 4.0“ der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert.