

Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten – Ergebnisse und Forschungsperspektiven des Förderprogramms ARA1

baua: Bericht

**Forschung
F 2463**

**Autonome Roboter für
Assistenzfunktionen:
Interaktive Grundfertigkeiten –
Ergebnisse und Forschungsperspektiven
des Förderprogramms ARA1**

1. Auflage 2020
Dortmund/Berlin/Dresden

Dieser Sammelband dient der Abschlussdokumentation der Projekte und der Begleitforschung der Fördermaßnahme ARA1 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Der Sammelband erscheint zum ARAIG-Abschlusskongress am 05.-06.10.2020. Der Sammelband wurde bei der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin im Projekt F 2463 (Förderkennzeichen 16SV7903) erstellt. Die Verantwortung für den Inhalt der einzelnen Kapitel liegt bei den jeweiligen Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Fachliche Herausgeber: Alina Tausch, Lars Adolph
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Thomas Jürgensohn
HFC Human-Factors-Consult GmbH, Berlin

Titelfotos: Michael Mende
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Theo Jacobs
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)
Christian Weiglein
KUKA Deutschland GmbH

Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon 0231 9071-2071
Telefax 0231 9071-2070
E-Mail info-zentrum@buaa.bund.de
Internet www.buaa.de

Berlin: Nöldnerstraße 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Telefax 030 51548-4170

Dresden: Fabricestraße 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Telefax 0351 5639-5210

Die Inhalte der Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt und entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt die BAuA jedoch keine Gewähr.

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.



doi:10.21934/buaa:bericht20200917 (online)

www.buaa.de/dok/8844908

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	5
Abstract	6
AutorInnen des Sammelbandes	7
Grußwort des BMBF	12
Geleitwort	13
Die Teilprojekte der Begleitforschung ARAIG berichten	16
1 Harmonisierung von Schnittstellen, Sicherheits- und Performancekriterien	16
2 Ethische und rechtliche Aspekte der Servicerobotik	26
3 Anforderungen an die Gestaltung von Servicerobotik aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive	42
4 Objektivierbare Performancekriterien	57
Die begleiteten Projekte berichten	76
5 RoSylerNT – Lernende roboterassistierte Systeme für das neuromuskuläre Training	76
6 ASARob – Aufmerksamkeitssensitiver Assistenzroboter	107
7 RoPHa – Robuste Wahrnehmungsfähigkeiten für Roboter zur Unterstützung älterer Nutzer im häuslichen Umfeld	118
8 MobILe – Physische Mensch-Roboter-Interaktion für ein selbstbestimmtes Leben	134
9 SINA – Sichere Wahrnehmung zur flexiblen Assistenz in dynamischen und unstrukturierten Umgebungen	147
10 RoKoRa – Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration mit Hilfe hochauflösender Radare	158
11 AuRorA – Interaktive Roboter unterstützen im Smart Home	172
12 FRAME – Assistierte "Fahrstuhlnutzung" und "Raumzutritt" für Roboter durch Einbeziehung von Helfern	188

Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten – Ergebnisse und Forschungsperspektiven des Förderprogramms ARA1

Kurzreferat

Dieser Sammelband zeigt einen Überblick über die Forschung unter der Fördermaßnahme „Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Gefördert wurde ein Begleitforschungs-Konsortium und acht Forschungsprojekte, die sich mit der Entwicklung interaktiver Grundfertigkeiten für den Einsatz von Robotern im Assistenzbereich beschäftigen. Zum Abschluss der Projekte soll dieser Band einen Überblick geben über die Forschungsinhalte und -ergebnisse der Projekte und somit vielfältige und abwechslungsreiche Einsichten sowohl in technische Entwicklungen als auch in kontextuelle Faktoren für den Einsatz von Servicerobotik. Am Sammelband beteiligt sind die Teilprojekte der Begleitforschung ARAIG sowie die Projekte ASARob, AuRorA, FRAME, MobilLe, RoKoRa, RoPha, RoSylerNT und SINA. Die Publikation wurde realisiert durch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, Förderkennzeichen 16SV7903) als Projektpartnerin in ARAIG.

Schlagwörter:

Assistenzroboter, ARAIG, robotische Grundfertigkeiten, Mensch-Roboter-Interaktion (MRI), Projekte, Assistenzfunktionen, Servicerobotik

Autonomous Robots for Assistance Functions: Interactive Basic Abilities – Results and Research Perspectives of the Funding Campaign ARA1

Abstract

This edited volume shows an overview over the research conducted in the funding campaign “Autonomous Robots for Assistance Functions: Interactive Basic Abilities“ of the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). One accompanying research project and eight research projects are funded which address the development of interactive basic abilities for applying robots in assistance contexts. This volume gives an overview over the research content and results and by this a manifold and varied overview over technical developments as well as contextual factors vital for the use of service robots. In this volume, the accompanying research project ARAIG participated together with the projects ASARob, AuRorA, FRAME, MoblLe, RoKoRa, RoPha, RoSylerNT and SINA. The publication was compiled by the Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA) as a project partner in ARAIG.

Key words:

assistance robots, ARAIG, robotic abilities, human-robot interaction (HRI), projects, assistance functions, service robotics

AutorInnen des Sammelbandes

Mohamed Abdelawwad, Dr., Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik/ Informatik, Fachgebiet Rechnerarchitektur und Systemprogrammierung (ICAS), Wilhelmshöhe 71, 34121 Kassel, RoKoRa

Mona Abdel-Keream, M.Sc., Universität Bremen (Institute for Artificial Intelligence), Am Fallturm 1, 28359 Bremen, RoPHa

Dirk Abel, Univ.-Prof. Dr.-Ing., Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen University, Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen, RoSylerNT

Lars Adolph, Dr., Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, Begleitforschung ARAIG

Hosam Alagi, M.Sc., Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR) - Intelligente Prozessautomation und Robotik (IPR), Engler-Bunte-Ring 8, 76131 Karlsruhe, SINA

Kirsten Albracht, Prof. Ph.D., Institut für Bewegungs- und Neurowissenschaft, Deutsche Sporthochschule Köln, Am Sportpark Müngersdorf 6, 50933 Köln, RoSylerNT

Benjamin Alt, M.Sc., ArtiMinds Robotics GmbH, Albert-Nestler-Str. 11, 76131 Karlsruhe, RoPHa

Hannes Bachter, MSc, Mojin Robotics GmbH, Max-Lang-Str. 56/1, 70771 Leinfelden-Echterdingen, ASARob

Annalies Baumeister, Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS), Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main, MobilLe

Nadine Bender, M.Sc., KUKA Deutschland GmbH, Zugspitzstrasse 140, 86165 Augsburg, RoSylerNT

Oussama Benfarah, Dipl. -Ing., BEC GmbH, Marktstrasse 191, 72793 Pfullingen, RoSylerNT

Gabriele Blume, Dipl.-Kffr. (FH), Stiftung Evangelische Altenheimat, Schwieberdinger Straße 5, 70435 Stuttgart, RoPHa

Josef Börcsök, Prof. Dr.-Ing. habil, Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik/ Informatik, Fachgebiet Rechnerarchitektur und Systemprogrammierung (ICAS), Wilhelmshöhe 71, 34121 Kassel, RoKoRa

Torsten Borowski, Dipl.-Ing., Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung IFA, Alte Heerstr. 111, 53757 Sankt Augustin, RoKoRa

Bjoern Braunstein, Dr. rer. medic., Institut für Bewegungs- und Neurowissenschaft & Institut für Biomechanik und Orthopädie, Deutsche Sporthochschule Köln, Am Sportpark Müngersdorf 6, 50933 Köln, RoSylerNT

Malte Drabesch, B. Sc., Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik / Informatik, Fachgebiet Rechnerarchitektur und Systemprogrammierung (ICAS), Wilhelmshöhe 71, 34121 Kassel, RoKoRa

Christian Emmerich, Dr.-Ing., Roboception GmbH, Kaflerstr. 2, 81241 München, RoPHa

Miriam Funk, M.Sc., Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, FRAME

Marion Gebhard, Prof. Dr., Westfälische Hochschule (WHS), Neidenburger Str. 43, 45897 Gelsenkirchen, MobilE

Jens Gerken, Prof. Dr., Westfälische Hochschule (WHS), Fachbereich Informatik und Kommunikation, Neidenburger Straße 43, 45897 Gelsenkirchen, MobilE

Martin Gerlich, Dipl. Wirt.-Ing. (FH), BEC GmbH, Marktstrasse 191, 72793 Pfullingen, RoSylerNT

Martin Gmür, Dipl.-Ing., User Interface Design GmbH, Wilhelm-Bleyle-Straße 10–12, 71636 Ludwigsburg, SINA

Felix Goldau, M.Sc., Friedrich-Wilhelm-Bessel-Institut Forschungsgesellschaft m. b. H. (FWBI), Otto-Hahn-Allee 1, 28359 Bremen, MobilE

Fabian Göll, M.Sc., Institut für Bewegungs- und Neurowissenschaft, Deutsche Sporthochschule Köln, Am Sportpark Müngersdorf 6, 50933 Köln, RoSylerNT

Birgit Graf, Dr.-Ing. Dipl.-Inf., Fraunhofer IPA, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, RoPHa

Florenz Graf, M.Sc., Fraunhofer IPA, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, ASARob

Axel Graeser, Prof. Dr.-Ing., Friedrich-Wilhelm-Bessel-Institut Forschungsgesellschaft m. b. H. (FWBI), Otto-Hahn-Allee 1, 28359 Bremen, MobilE

Fabian Gronbach, Interaktionswerk, Glückler & Gronbach GbR, Fäustlestraße 3, 80339 München, RoPHa

Horst-Michael Groß, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Ilmenau, Helmholtzplatz 5, 98693 Ilmenau

Matthias Hartwig, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V., Magazinstraße 15 – 16, 10179 Berlin, Begleitforschung ARAIG

Manfred Hägelen, Dr.-Ing., IMST GmbH, 47475 Kamp-Lintfort, RoKoRa

Björn Hein, Prof. Dr.-Ing., Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR) - Intelligente Prozessautomation und Robotik (IPR), Engler-Bunte-Ring 8, 76131 Karlsruhe, SINA & RoSylerNT

Ralf Hornscheidt, HIDREX GmbH, Otto-Hahn-Str. 12, 42579 Heiligenhaus, MobilE

Theo Jacobs, Dipl.-Ing., Fraunhofer IPA, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Begleitforschung ARAIG

Florian Jordan, M.Sc., Fraunhofer IPA, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, RoPHa

Thomas Jürgensohn, Prof. Dr.-Ing. Habil, HFC Human-Factors-Consult GmbH, Köpenicker Str. 325, 12555 Berlin, Begleitforschung ARAIG

Björn Kahl, Dr., Fraunhofer IPA, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Begleitforschung ARAIG

Darko Katić, Dr.-Ing., ArtiMinds Robotics GmbH, Albert-Nestler-Str. 11, 76131 Karlsruhe, RoPHa

Marco Kappler, Karlsruher Institut fur Technologie (KIT) - Institut fur Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab), Engler-Bunte-Ring 4, 76131 Karlsruhe, SINA

Maike Ketelhut, M.Sc., Institut fur Regelungstechnik, RWTH Aachen, Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen, RoSylerNT

Britta Kirchhoff, Dr., Bundesanstalt fur Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, Begleitforschung ARAIG, FKZ 16SV7903

Robert Klebbe, M.A., Klinik fur Geriatrie und Altersmedizin an der Charite, Chariteplatz 1, 10117 Berlin, AuRorA

Barbara Klein, Prof. Dr., Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS), Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main, MobilLe

Matthias Krinke, pi4_robotics GmbH, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin, MobilLe

Bastian Leibe, Dr. sc. techn., Lehrstuhl fur Informatik 13 (Computer Vision), RWTH Aachen, Mies-van-der-Rohe Str.15, 52074 Aachen, FRAME

Christian Lengenfelder, MSc, Fraunhofer IOSB, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe, ASARob

Jochen Lindermayr, M.Sc., Fraunhofer IPA, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, ASARob

Benjamin Maidel, Dipl.-Inf., Mojini Robotics GmbH, Max-Lang-Straße 56/1, 70771 Leinfelden-Echterdingen, AuRorA

Michael Maier, M.Sc., MYESTRO Interactive GmbH, Haid-und-Neu-Straße 7, 76131 Karlsruhe, AuRorA

Stephanie von Maltzan, Ass. iur., Karlsruher Institut fur Technologie (KIT), Zentrum fur Angewandte Rechtswissenschaften, Vincenz-Prienitz-Str. 3, 76131 Karlsruhe, RoSylerNT

Patrick Mania, M.Sc., Universitat Bremen (Institute for Artificial Intelligence), Am Fallturm 1, 28359 Bremen, RoPHa

Ronny Martin, Stiftung Evangelische Altenheimat, Luise-Schleppe-Haus und Schloss, Kornwestheimer Str. 30, 70439 Stuttgart, RoPHa

Felix Messmer, Dipl.-Ing., Mojini Robotics GmbH, Max-Lang-Str. 56/1, 70771 Leinfelden-Echterdingen, ASARob & AuRorA

Sibylle Meyer, Dr. phil., SIBIS Institut fur Sozial- und Technikforschung GmbH, Richard Wagner Str. 19, 10585 Berlin

Patrick Philipp, Dipl.-Inform., Fraunhofer IOSB, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe, ASARob

Victor Mosmann, B.Eng., Mojini Robotics GmbH, Max-Lang-Str. 56/1, 70771 Leinfelden-Echterdingen, ASARob

Mike Nagel, Dipl.-Ing. (FH), Koordinaten GmbH, Kieselbronner Str. 42/3, 75177 Pforzheim, RoSylerNT

Astrid Oehme, Dr. phil., HFC Human-Factors-Consult GmbH, Kopenicker Str. 325, 12555 Berlin, Begleitforschung ARAIG

Max Pascher, M.Sc., Westfälische Hochschule (WHS), Fachbereich Informatik und Kommunikation, Neidenburger Straße 43, 45897 Gelsenkirchen, MobilLe

Luis Perotti, M.Sc., Klinik für Geriatrie und Altersmedizin an der Charité, Charitéplatz 1, 10117 Berlin, AuRorA

Alexander Poeppel, M.Sc., Institut für Software- und Systems Engineering (ISSE), Universität Augsburg, Universitätsstr. 6a, 86159 Augsburg, SINA

Gwendolin Prins, M.A., C&S Computer und Software GmbH, Wolfsgäßchen 1, 86153 Augsburg, SINA

Felix Putze, Dr.-Ing., Universität Bremen, Enrique-Schmidt-Straße 5, 29359 Bremen, ASARob

Marija Radic, Dr. rer. pol, Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW, Neumarkt 9-19, 04109 Leipzig, ASARob

Daniel Reich, Dipl.-Inform., Universität Bremen, Enrique-Schmidt-Straße 5, 29359 Bremen, ASARob

Wolfgang Reif, Prof. Dr., Institut für Software- und Systems Engineering (ISSE), Universität Augsburg, Universitätsstr. 6a, 86159 Augsburg, SINA

Ulrich Reiser, Dr.-Ing., Mojini Robotics GmbH, Max-Lang-Str. 56/1, 70771 Leinfelden-Echterdingen, ASARob

Peter Remmers, Dr., Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Begleitforschung ARAIG

Bruno Ristok, C&S Computer und Software GmbH, Wolfsgäßchen 1, 86153 Augsburg, SINA

Arne Rönnau, Dr.-Ing., FZI Forschungszentrum Informatik, Haid-und-Neu-Straße 10-14, 76131 Karlsruhe, AuRorA

Massimo Romanelli, MSc, paragon semvox GmbH, Konrad-Zuse-Straße 19, 66459 Kirkel-Limbach, ASARob

Kirill Safronov, Dr.-Ing., KUKA Deutschland GmbH, Zugspitzstrasse 140, 86165 Augsburg, RoSylerNT

Raphael Schaller, M.Sc., Roboception GmbH, Kaflerstr. 2, 81241 München, RoPHa

Kevin Scheck, M.Sc., Universität Bremen, Enrique-Schmidt-Straße 5, 29359 Bremen, ASARob

Thomas Schraml, Dipl.-Ing., AUDI AG, Technologieentwicklung Automatisierungstechnik, 85045 Ingolstadt, RoKoRa

Marc Schroth, M.Sc., FZI Forschungszentrum Informatik, Haid-und-Neu-Straße 10-14, 76131 Karlsruhe, AuRorA

Tanja Schultz, Prof. Dr.-Ing., Universität Bremen, Enrique-Schmidt-Straße 5, 29359 Bremen, ASARob

Paul Schweidler, B. Sc., HFC Human-Factors-Consult GmbH, Köpenicker Str. 325, 12555 Berlin, Begleitforschung ARAIG

Taher Ben Slama, Dipl. -Ing., BEC GmbH, Marktstrasse 191, 72793 Pfullingen, RoSylerNT

Gergely Sóti, M.Sc., Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR) - Intelligente Prozessautomation und Robotik (IPR), Engler-Bunte-Ring 8, 76131 Karlsruhe, SINA

Michael H. Schwarz, Dr., Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik / Informatik, Fachgebiet Rechnerarchitektur und Systemprogrammierung (ICAS), Wilhelmshöhe 71, 34121 Kassel, RoKoRa

Sarah Stalljann, Westfälische Hochschule (WHS), Neidenburger Str. 43, 45897 Gelsenkirchen, MobilE

David Stegmaier, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V., Magazinstraße 15 – 16, 10179 Berlin, Begleitforschung ARAIG

Denis Stogl, M.Sc., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR) - Intelligente Prozessautomation und Robotik (IPR), Engler-Bunte-Ring 8, 76131 Karlsruhe, RoSylerNT & AuRorA

Jürgen Striebinger, CIBEK GmbH, Mühlweg 54, 67117 Limburgerhof, FRAME

Nicole Strutz, M.Sc., Klinik für Geriatrie und Altersmedizin an der Charité, Charitéplatz 1, 10117 Berlin, AuRorA

Matthias Stüben, M.Sc., Institut für Software- und Systems Engineering (ISSE), Universität Augsburg, Universitätsstr. 6a, 86159 Augsburg, SINA

Alina Tausch, M.Sc., Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, Begleitforschung ARAIG

Michael Voit, Dr.-Ing., Fraunhofer IOSB, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe, ASARob

Agnes Vosen, Dr. rer. pol, Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW, Neumarkt 9-19, 04109 Leipzig, ASARob

Christian Voß, M.Sc., Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik / Informatik, Fachgebiet Rechnerarchitektur und Systemprogrammierung (ICAS), Wilhelmshöhe 71, 34121 Kassel, RoKoRa

Christian Weiglein, KUKA Deutschland GmbH, Zugspitzstrasse 140, 86165 Augsburg, RoSylerNT

Jakob Weinland, M.Sc., FZI Forschungszentrum Informatik, Haid-und-Neu-Straße 10-14, 76131 Karlsruhe, AuRorA

Sascha Wischniewski, Dr.-Ing., Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, FRAME

Sebastian Witt, Dipl.-Ing.(FH), Koordinaten GmbH, Kieselbronner Str. 42/3, 75177 Pforzheim, RoSylerNT

Christian Zech, Dipl.-Ing., Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF, Tullastraße 72, 79108 Freiburg im Breisgau, RoKoRa

Uwe E. Zimmermann, Dr.-Ing., KUKA Deutschland GmbH, Zugspitzstrasse 140, 86165 Augsburg, RoSylerNT

Grußwort des BMBF

Die Digitalisierung durchdringt immer weitere Teile unseres Lebens und vieles, was noch vor wenigen Jahren als Science-Fiction galt, gehört heute zu unserem Alltag. So hält auch die Robotik mittlerweile Einzug in private Haushalte. Robotische Staubsauger und Rasenmäher sind inzwischen fast Familienmitglieder.

Auch wenn solche Serviceroboter schon jetzt zur Steigerung der individuellen Lebensqualität beitragen, ist die Entwicklung erst am Anfang. Eine völlig neue Generation von Assistenzrobotern wird auf der Grundlage künstlicher Intelligenz entstehen. Das Ziel ist ein Roboter, der auf natürliche Art und Weise mit dem Menschen interagiert und ihn so im Alltag unterstützen kann.

Dazu müssen Roboter in die Lage versetzt werden, die menschliche Kommunikation und das menschliche Verhalten zu verstehen und angemessen darauf zu reagieren. Um Assistenzroboter zu umsichtigen und dialogfähigen Interaktionspartnern zu machen, besteht aber noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert deshalb im Rahmen der mehrteiligen Fördermaßnahme „Roboter für Assistenzfunktionen“ die Weiterentwicklung der Mensch-Roboter-Interaktion. Höchst unterschiedliche Fachdisziplinen sind gefragt, ihren Beitrag zu leisten. Die große Interdisziplinarität der Beteiligten war anfangs eine Herausforderung, ist aber auch Voraussetzung für die vielen Erfolge, die die Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet erreicht haben.

Es ist sehr erfreulich, dass die unterschiedlichen Institutionen und Personen sich dabei einem gemeinsamen Ziel gewidmet haben: Innovative Lösungen zu finden, die einen nachhaltigen Einfluss auf die Weiterentwicklung der Mensch-Roboter-Interaktion haben.

Die ersten Ergebnisse der Förderreihe liegen in diesem Sammelband vor und ich wünsche allen Leserinnen und Lesern interessante Einblicke in die Welt der Assistenzroboter von morgen! Mein Dank gilt allen Projektpartnern und dem Begleitprojekt für die hervorragende Zusammenarbeit und Vernetzung untereinander. Gemeinsam lässt sich Vieles erreichen, wie Sie uns auf den folgenden Seiten beweisen.

Sibylle Quenett, September 2020

Leiterin des Referats „Interaktive Technologien für Gesundheit und Lebensqualität“

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Geleitwort

Im Frühjahr 2016 startete das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit einer Trilogie aufeinander aufbauender Förderbekanntmachungen, die die Thematik des Roboters in seiner Funktion als Assistent aufgreift. Die Assistenzrolle eines Roboters geht immer mit einer – im Vergleich zum Roboter im industriellen Kontext – besonderen räumlichen Nähe von Roboter und Mensch und einer häufig vergleichsweise intensiven Interaktion einher. Einsatzfelder der Assistenzrobotik sind häufig die Bereiche Pflege und Therapie, Unterstützung beeinträchtigter Personen oder der Roboter als Ersatz von informierendem oder geleitendem Personal. Wegen der fast unmöglichen Festlegung, was eigentlich ein Roboter ist, gehören aber auch beispielsweise Mähautomaten, selbstfahrende Plattformen, die Blumen gießen, oder Bodenreinigungsfahrzeuge zur Assistenzrobotik. Die Grenzen von Assistenzrobotern zu Industrierobotern verschwimmen, wenn der Roboter als „kollaborativer Roboter“ Hand in Hand mit und in unmittelbarer Nähe zu einem Werker am selben Werkstück arbeitet.

Die in der ersten Förderbekanntmachung der oben erwähnten Trilogie unter dem Titel „Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten“ geförderten Projekte spiegeln die ganze Breite der Assistenzrobotik wider – viele der erwähnten Anwendungsfelder sind in den geförderten Projekten adressiert. Parallel zu den Projekten mit einem speziellen Anwendungsfokus wurde in der Förderbekanntmachung das Begleitprojekt ARAIG gefördert. Neben dem Interprojektaustausch und strukturbildenden Maßnahmen hat sich das Begleitprojekt die Aufgabe gestellt, einen Ergebnisband zusammenzustellen und zu realisieren, der die Ergebnisse aller beteiligten Projekte dokumentiert. Ziel war es, die Breite und gleichzeitig hohe Qualität der Forschung im Bereich Assistenzrobotik in Deutschland zu demonstrieren.

Eine besondere Interaktion zwischen Roboter und Mensch findet statt, wenn eine mechanische Kopplung zwischen beiden existiert und beide jeweils Kräfte aufeinander ausüben. Im Projekt **RoSylerNT** (lernende roboterassistierte Systeme für das neuromuskuläre Training) wird der Roboter genutzt, um gezielt und fein dosiert durch geregelte Gegenkraft Muskelkräfte zu steuern und zu stimulieren. Dies kann beispielsweise bei der Rehabilitation verletzter Sportler oder für das Krafttraining älterer Menschen zur Erlangung verbesserter Bewegungsfertigkeiten eingesetzt werden. Der direkte Kontakt erfordert besondere Regelungsalgorithmen. In einem Teilprojekt wurde die Fähigkeit des Roboters zur mechanischen Kooperation dadurch demonstriert, dass Mensch und Roboter gemeinsam einen Tisch tragen.

Große Nähe und mechanischer Kontakt spielen auch im Projekt **MobLe** (Physische Mensch-Roboter-Interaktion für ein selbstbestimmtes Leben) eine Rolle. Der Roboter hilft hier Tetraplegikern beim Trinken, indem er – gesteuert von dem Nutzer selbst – einen Becher zum Kopf führt. In einer Variante kann der Nutzer über Strohalm trinken, in einer weiteren Variante gibt es einen direkten mechanischen Kontakt, indem der Becher zu den Lippen geführt wird.

Die Darreichung von Lebensmitteln bei einem körperlich eingeschränkten Nutzerkreis finden wir auch in dem Projekt **RoPha** (Robuste Wahrnehmungsfähigkeiten für Roboter zur Unterstützung älterer Nutzer im häuslichen Umfeld). Generelles Ziel des

Projektes ist die Unterstützung älterer und pflegedürftiger Menschen bei der Handhabung typischer Alltagsobjekte. Beispielhaft wurde die mundgerechte Bereitstellung von Nahrung bearbeitet. Neben dem Anreichen von Speisen wie beim Projekt **MobILe** wurden auch andere Manipulationen von Speisen wie das Schneiden, Bestreuen oder Aufnehmen erprobt.

Unterstützung im häuslichen Umfeld steht auch bei dem Projekt **AuRorA** (Interaktive Roboter unterstützen im Smart Home) im Mittelpunkt. Der Roboter hilft beim Kochen, indem er beispielsweise Zutaten anreicht oder kollaborativ mit dem kochenden Menschen agiert. Dazu wurde im Projekt ein modulares Küchensystem mit Linearachse realisiert. Ein technologisches Ziel war es, dass der Roboter den Menschen anspricht, Fragen stellt und über seine Handlungen vorher informiert. Um diese Grundfertigkeiten auch in anderem Umfeld zu erproben, wurde ein zweiter Anwendungsfall, der Roboter als Ansprechpartner im Hotel-Empfangsbereich, realisiert.

Dieser Anwendungsfall spielt auch im Projekt **ASARob** (Aufmerksamkeitssensitiver Assistenzroboter) eine Rolle. Wie der Roboter die Aufmerksamkeit eines Gegenübers erheischt, erfasst und aufrechterhält, war Kernthematik in ASARob und wurde in einem Hotellobbyszenario und weiteren anderen Anwendungsszenarien erforscht.

Die große Nähe von Assistenzrobotern zu dem interagierenden Menschen wirft zu jedem Zeitpunkt die Frage der Sicherheit der Maschine Roboter auf. Jeder Hersteller von Robotern muss nachweisen, dass von seiner Maschine keine Gefährdung ausgeht. Das Projekt **RoKoRa** (Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration mit Hilfe hochauflösender Radare) steht ganz unter dem Thema Sicherheit und untersucht am Beispiel eines kollaborativen Roboters in einem Industrieumfeld, wie man – trotz unmittelbarer Nähe – sichere Mensch-Roboter-Zusammenarbeit gewährleisten kann.

Die Gewährleistung von Sicherheit ist auch ein Thema im Projekt **SINA** (Sichere Wahrnehmung zur flexiblen Assistenz in dynamischen und unstrukturierten Umgebungen). Kapazitive Sensoren an Roboterkörper und -greifer erfassen das unmittelbare Umfeld und können beispielsweise erkennen, ob sich ein möglicherweise gefährdeter Mensch oder andere Objekte in der Nähe befinden oder ggf. vom Greifer erfasst werden.

Ein völlig neuer Aspekt bei der Betrachtung der Rolle eines Assistenzroboters kommt im Projekt **FRAME** (Assistierte „Fahrstuhlnutzung“ und „Raumzutritt“ für Roboter durch Einbeziehung von Helfern) ins Spiel: der Roboter unterstützt, benötigt aber in bestimmten Situationen – z. B. beim Öffnen von Türen – selbst Unterstützung. Wie im Projekt ASARob sind auch in FRAME Probleme der Initiierung von Aufmerksamkeit und des Aufrechterhaltens einer Dialogsituation zu lösen.

Im Rahmen des Begleitprojekts **ARAIG** bestand neben der Aufgabe der inhaltlichen Harmonisierung und der Durchführung strukturbildender Maßnahmen die Möglichkeit, an für die Assistenzrobotik relevanten Themen grundsätzlicher Art zu forschen. Eines der Kernthemen war die Harmonisierung von Schnittstellen sowie von Sicherheits- und Performancekriterien. Dazu wurde eine Testumgebung erstellt, die Projekte des Förderaufrufs und Projekte aus dem Folgeförderaufruf RA2 (Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktionsstrategien) zur Überprüfung der Performance ihrer Systeme nutzen konnten und können.

In einem weiteren Teilprojekt wurden ethische und rechtliche Aspekte der Servicerobotik untersucht. Hier wurde beispielsweise die „Autonomie als Eigenschaft von Robotern“ untersucht. In den rechtlichen Erörterungen wurden beispielsweise mögliche Implikationen auf die technische Entwicklung, die sich aus dem Produktsicherheitsrecht ergeben, herausgearbeitet.

Bei der Erforschung von Mensch-Roboter-Interaktion wird häufig vergessen, dass Assistenzroboter – beispielsweise in Kliniken – in einem Arbeitskontext eingebunden sind. Neben der Interaktion zwischen Roboter und Patient gibt es noch eine weitere Form von Interaktion, nämlich die mit dem Personal vor Ort oder ggf. noch mit Instandhaltungspersonal. Die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Gestaltung von Servicerobotik aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive wurden in einem weiteren Teilprojekt erarbeitet.

In dem vierten Teilprojekt von ARAIG wurde untersucht, welche objektiven und subjektiven Metriken zur Beschreibung von Assistenzrobotern herangezogen werden können. Im Zuge dessen wurde eine „Kontext-Person-Roboter-Heuristik“ erstellt, die hilft, Klarheit über die Charakteristika eines MRI-Szenarios zu erhalten und mehrere MRI-Szenarien schnell und einfach zu vergleichen. Ein weiteres Thema war die Untersuchung von Anthropomorphismen bei Robotern. Eine Frage war beispielsweise, wie Anthropomorphismen die Mensch-Roboter-Interaktion verändern.

Die kurzen „Teaser“ der Projekte zeigen, wie breit gefächert und vielfältig in den Projekten der Förderlinie „Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten“ geforscht wurde. Das Begleitprojekt ARAIG dankt allen Projekten für die termingerechte Einreichung der Beiträge – trotz der Einschränkungen von COVID-19 im Frühjahr 2020 – und wünscht allen Lesern und Leserinnen dieser Dokumentation eine anregende Lektüre und viele Anstöße für ihre eigene Praxis.

Thomas Jürgensohn, August 2020

(Begleitprojekt ARAIG)

Die Teilprojekte der Begleitforschung ARAIG berichten

1 Harmonisierung von Schnittstellen, Sicherheits- und Performancekriterien

Björn Kahl, Theo Jacobs

Projektpartner: Fraunhofer IPA – Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Abteilung Roboter und Assistenzsysteme

1.1 Zusammenfassung des Projekts

Das Vorhaben „Harmonisierung von Schnittstellen, Sicherheits- und Performancekriterien“ ist Teil der Begleitforschung „ARAIG – Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten“. Es fokussiert zum einen auf die Beratung der technischen Projekte im Förderprogramm zu Fragen der funktionalen Sicherheit von Robotersystemen als Ganzes und von deren modularen Komponenten oder Grundfunktionen und -fertigkeiten und zum anderen auf die Entwicklung von Evaluierungskriterien und -methoden für die funktionale Sicherheit wie auch die technische Robustheit oder „Performance“ von Roboterfunktionen.

Im Bereich der funktionalen Sicherheit ist das Ziel des Projektes, den Blick für das Thema der funktionalen Sicherheit zu schärfen und einen einheitlichen Wissensstand aller technischen Projekte zu erreichen. Zudem wird eine Testumgebung für praktische Tests geschaffen, in denen die funktionale Sicherheit anhand objektiver Kriterien evaluiert werden kann. Die gleiche praktische Testumgebung eignet sich aber auch dafür, Performancetests durchzuführen. Hier sollen im Vorfeld einheitliche Performancekriterien für interaktive Grundfertigkeiten mit den technischen Projekten definiert werden, die zum Ende der Projektlaufzeit überprüft werden können.

Ein weiteres Ziel des Projektes stellt die Harmonisierung von Softwareschnittstellen im Kreis der ARA1-Projekte dar. Durch die Vereinheitlichung soll ein besserer Austausch der in den Projekten erarbeiteten Lösungen untereinander erreicht werden. Zudem soll die Möglichkeit für eine spätere Verwertung der Ergebnisse unterstützt werden.

1.2 Hintergrund

Bereits seit einigen Jahren wird der Servicerobotik alljährlich ein steiler Wachstumsmarkt vorausgesagt (World Robotics, 2017) Allerdings ist der große Durchbruch bisher ausgeblieben, und dass, obwohl mehr als 740 Firmen in der Servicerobotik aktiv sind (Stand 2019), von denen rund ein Fünftel als Startup gezählt werden können. Es stellt sich die Frage: Warum? Ein wesentlicher Faktor ist sicherlich, dass Assistenz- und Servicerobotersysteme bisher überwiegend Spezialanfertigungen „aus einem Guss“ sind, die dadurch sehr hohe Entwicklungskosten bei vergleichsweise enger (wenig flexibler) Einsetzbarkeit haben, also schlicht unwirtschaftlich sind. Dies haben auch die Fördergeber erkannt und fördern deshalb

in dem vorliegenden Programm explizit „interaktive Grundfertigkeiten“. Der Ansatz ist richtig, greift aber zu kurz, wenn diese Grundfähigkeiten wieder nur für eine spezielle Anwendung entwickelt und auf optimale Leistung in dieser einen Anwendung in dem jeweiligen Projektdemonstrator hin getrimmt werden. Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Faktor ist die regelmäßig mangelnde Robustheit von Grundfunktionen wie Wahrnehmung, Manipulation sowie sichere und schnelle Navigation. Diese sind für den praktischen Einsatz von Assistenzsystemen unabdingbar, ihre Robustheit kommt aber in vielen wissenschaftlichen Forschungsprojekten zu kurz. Aus wissenschaftlicher Sicht ist eine Grundfunktion „erledigt“, wenn ihre prinzipielle Möglichkeit in einem Labordemonstrator gezeigt und das zugrundeliegende Prinzip publiziert ist. Auch die Frage der funktionalen Sicherheit, die ja grundsätzlich geklärt sein muss, damit ein Roboter überhaupt die Produktreife erlangen kann, spielt in der Forschung eher eine untergeordnete Rolle. Hier besteht ein grundsätzlicher Konflikt zwischen dem Interesse der Fördergeber und der Gesellschaft im Ganzen an einer hohen Verwertbarkeit (sog. „Impact“) der Ergebnisse der öffentlich finanzierten Forschung einerseits und dem Interesse der Forschenden an wissenschaftlicher Erkenntnis in Form von Publikationen, Studienarbeiten und Dissertationen andererseits (und der wettbewerbsrechtlich gebotenen Beschränkung der Förderung auf vorwettbewerbliche Forschung und Entwicklung).

Beide Einflussfaktoren auf den Erfolg der Servicerobotik allgemein und robotischer Assistenzsysteme im Speziellen adressiert das Fraunhofer IPA. Über langjährige Mitarbeit in der internationalen Normung, insbesondere in der ISO-Arbeitsgruppe 6 „Modularity for Service Robots“ im TC299 „Robotics“ (ISO/TC 299) trägt das IPA zur Definition von Methoden und Standards für die modulare Entwicklung von Robotersystemen aus Bausteinen bei, die in unterschiedlichen Kontexten nutzbar sind.

Im vom IPA koordinierten SeRoNet-Projekt (Fördergeber BMWi) (Projekt SeRoNet) untersucht das IPA mit zehn anderen Partnern Voraussetzungen und technische Methoden für einen Ökosystemansatz in der Entwicklung von Roboter- und Automatisierungssystemen. Kernidee dieses Ansatzes ist, dass die Entwicklung von Systemen (Lösungen) und den Komponenten (Grundfertigkeiten), die diesen Systemen zugrunde liegen, strikt getrennt sind. SeRoNet selbst ist dabei die konkrete Umsetzung der in seinem europäischen Schwesterprojekt RobMoSys (H2020) (Projekt RobMoSys) untersuchten Modellierungsprinzipien (Abbildung 1.1). Indem die Systemkomposition (als Unterscheidung zur mit hohen Aufwänden assoziierten Systemintegration) vollständig modellgetrieben in einer grafischen Umgebung aus durch reichhaltige semantische Modelle beschriebenen Komponenten erfolgt, reduzieren sich die Kosten aufseiten der Anwendungsentwickler erheblich. Voraussetzung dafür sind allerdings entsprechend modellierte, vielseitig einsetzbare Komponenten. Deren Entwicklung verteuert sich, weil sie durch die unterschiedlichen Nutzungskontexte robuster sein müssen. Diese Kosten wiederum werden dadurch aufgewogen, dass unterschiedliche Anbieter die Komponenten in verschiedenen Systemen nutzen können.

Der BMBF-Aufruf „Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten“ schien eine exzellente Möglichkeit, dieses Konzept weiter zu verbreiten, gleichzeitig neue Grundfertigkeiten als Komponenten für den SeRoNet-Ansatz gewinnen zu können und damit die langfristige Verfügbarkeit der in der ARA1-Förderlinie entwickelten Grundfertigkeiten sicherzustellen.

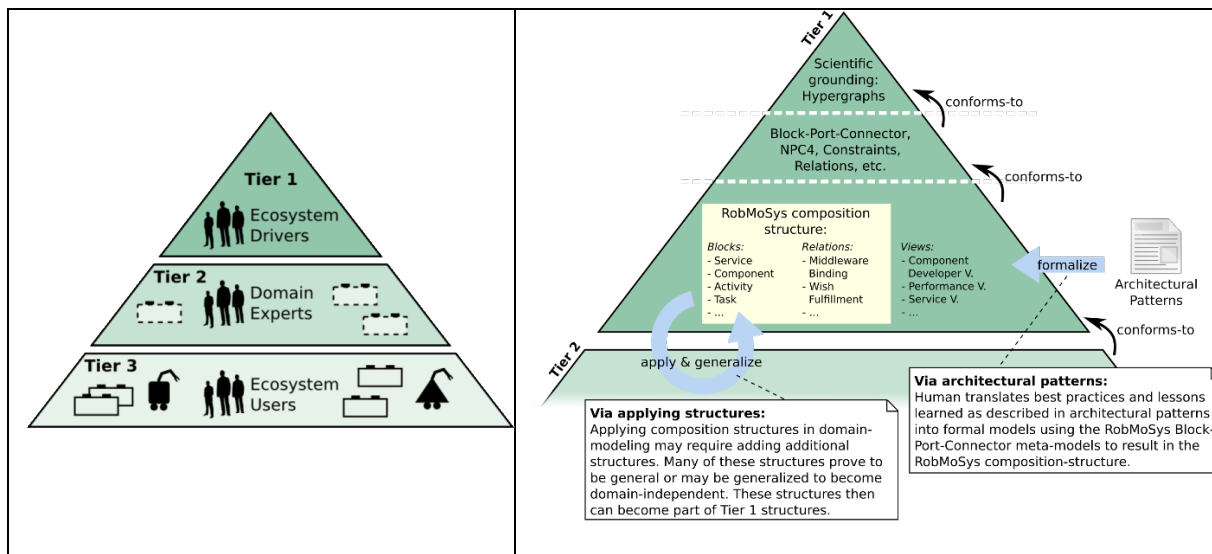


Abbildung 1.1: Dreistufiges Ökosystemmodell und Modellierungsprinzipien in RobMoSys, wie sie auch in SeRoNet umgesetzt wurden und in ARAIG als Basis für die Harmonisierung von Schnittstellen angedacht waren. Bildquelle: https://robmosys.eu/wiki/general_principles:ecosystem:start (links, bearbeitet) und <https://robmosys.eu/wiki/modeling:tier1> (rechts)

Hinsichtlich der Robustheit von Softwarekomponenten für Robotersysteme kann das IPA auf langjährige Erfahrungen insbesondere aus der Entwicklung des Care-O-Bot® als auch aus der Leitung des europäischen Zweigs des ROS-Industrial Konsortiums zurückblicken. Insbesondere im ROS-Industrial Konsortium ist ein zentrales Arbeitsgebiet die Bereitstellung von Softwarekomponenten auf Basis des freien Open Source Systems ROS, die industriellen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen genügen müssen. Die ARA1 Ausschreibung bot die Gelegenheit, aus bisher weniger betrachteten Anwendungsbereichen wie Pflege oder Rehabilitation Impulse für konkrete Robustheitsanforderungen zu erhalten und den vorhandenen Erfahrungssatz an Methoden der sicheren und robusten Softwareentwicklung in die technischen Förderprojekte einzubringen.

Auch das Thema der funktionalen Sicherheit von Servicerobotern adressiert das Fraunhofer IPA in seiner langjährigen Mitarbeit im ISO-Normungsgremium TC 299. So arbeitete das Institut im Rahmen der Arbeitsgruppe WG 2 „Service Robot Safety“ an der Entwicklung eines ersten Sicherheitsstandards für Serviceroboter mit. Aus Sicht der Forschung ist hier von großem Interesse, wie die Anwender des Standards, die derzeit meist aus Forschungseinrichtungen oder Start-ups kommen und daher noch keine tiefgehenden Erfahrungen mit Sicherheitsnormen mitbringen, diese nutzen. Daraus lassen sich Erkenntnisse ableiten, wie der Sicherheitsstandard in Zukunft verbessert werden kann. Auch sollen unnötige regulatorische Barrieren, die unter Umständen bestimmte Anwendungen, z. B. Assistenz mit unmittelbarem Körperkontakt, in der Zukunft blockieren könnten, vermieden werden. Normungsbedarf besteht darüber hinaus konkret bei der Definition von Testkriterien für praktische Tests. Ein erster Versuch, Testkriterien zu definieren und in der Praxis zu erproben, wurde bereits im Projekt VaSiMa (Projekt VaSiMa) unternommen. Die Ergebnisse des Projekts flossen teilweise in den Normungsentwurf ISO TR 23482-1 ein (ISO TR 23482-1). Im Rahmen des Projektes ARAIG können die vorhandenen

Methoden nun mit einem breiten Spektrum von Entwicklern diskutiert und weiterentwickelt werden.

Methoden für die Messung der Performance von Servicerobotern werden derzeit in der Arbeitsgruppe WG 4 des ISO TC 299 entwickelt (ISO 18646), in der sich das Fraunhofer IPA ebenfalls beteiligt. Dort liegt der Fokus allerdings vor allem auf der Bewertung von Basisfunktionalitäten wie der Höchstgeschwindigkeit oder einem Bremsweg. Das Projekt ARAIG bietet dagegen die Gelegenheit zu diskutieren, wie sich die komplexeren interaktiven Grundfertigkeiten sinnvoll und vergleichbar bewerten lassen.

1.3 Methodische Herangehensweise

Als Teil der Begleitforschung liegt der Fokus der Arbeiten weniger auf eigenen Entwicklungsarbeiten als mehr auf der Beratung und Begleitung der technischen Projekte im Förderprogramm. Das Teilvorhaben „Harmonisierung von Schnittstellen, Sicherheits- und Performancekriterien“ gliedert sich entsprechend methodisch in drei Bereiche:

- Beratung und Schulung zur funktionalen Sicherheit
- Unterstützung in der Entwicklung zukunftsfähiger und interoperabler Schnittstellen
- Unterstützung in der Definition und Durchführung objektiver Performance-Evaluationen.

Um adäquat zur funktionalen Sicherheit beraten zu können, wurden zunächst die öffentlich zugänglichen Informationen zur Zielsetzung und Anwendungsdomäne der technischen Projekte ausgewertet und dann in Workshops mit den Projekten konkrete sicherheitsrelevante Funktionen (aus Nutzer- bzw. Anwendungssicht, nicht aus Implementierungssicht) identifiziert. Nachdem die Projektvertreter in die Grundlagen der funktionalen Sicherheit für Robotersysteme und den bestehenden Normungsrahmen eingeführt worden waren, wurde gemeinsam eine exemplarische Risikobewertung durchgeführt. Diese Workshops und Schulungen zur funktionalen Sicherheit stießen auf ausgesprochen hohen Zuspruch, weit mehr als erwartet, und wurden mehrfach und auch für Projekte der nachfolgenden Förderlinie RA2 wiederholt. Für die Begleitforschung selbst ergaben sich interessante Einblicke in praktische Probleme beim Anwenden der existierenden Normenwerke, die wiederum in die Normung selbst zurückgespiegelt werden können.

Um bei der Entwicklung interoperabler Schnittstellen zu unterstützen, wurde ein vergleichbarer Ansatz gewählt. Jedoch zeigte sich hier bereits im ersten Workshop mit den Projekten, dass das grundsätzliche Problem zwar den allermeisten bewusst ist, jedoch anders als beim Thema funktionale Sicherheit (die letztlich Voraussetzung für eine Betriebserlaubnis der resultierenden Systeme ist) kaum Interesse an einer praktischen Umsetzung neuartiger Methoden der Softwareentwicklung bestand. Insbesondere gab es großen Widerstand gegen die Umstellung auf ein neues Komponentenmodell, wie es z. B. in SeRoNet verfolgt wird. Im Rückblick hätte dies vorausgesehen werden können, da die Arbeiten in den technischen Projekten – insbesondere auch unter Berücksichtigung des mit der Förderlinie beabsichtigten Reifegrades der Ergebnisse – auf umfangreichen Vorarbeiten in existierenden, teilnehmereigenen Softwarearchitekturen basieren. Der Versuch einer

projektübergreifenden Harmonisierung von Schnittstellen wurde daher aufgegeben. Für die Zukunft müssten entsprechende Absichten bereits in der Konzeption eines Förderprogramms berücksichtigt werden und – da auf absehbare Zeit vorexistierende, proprietäre Softwaresysteme die Basis neuer Entwicklungen bilden werden – in den Förderprogrammen explizit Mittel für die Anpassung an einen bzw. die Ausgliederung von ausgewählten Softwarebausteinen in einen kompositorischen Ansatz vorgesehen werden, wie er in RobMoSys beschrieben und in SeRoNet implementiert wird.

Für die dritte Säule „Sicherheits- und Performance-Evaluation“ wurde ein leicht anderer Ansatz gewählt. Ausgehend von eigenen Vorarbeiten und insbesondere Vorgaben aus den existierenden Normen zur Sicherheit und zu Sicherheits- und Performancetests wurden zunächst generische Testkriterien abgeleitet und diese dann den technischen Projekten zur Ergänzung vorgelegt. Auf Basis dieser Testkriterien (Abbildung 1.2) wurde ein Konzept für einen mobilen Teststand entworfen, mit dem die Systeme der begleiteten Projekte bei den entsprechenden, für den jeweiligen Projektdemonstrator zuständigen Projektpartnern vor Ort evaluiert werden können. Dieser Entwurf wurde im November 2019 mit Vertretern der Förderprojekte aus den Förderlinien ARA1 und RA2 diskutiert. Die Diskussion brachte einige zusätzliche Anforderungen an die Testumgebung, die seitdem in das Konzept eingearbeitet werden. Der Teststand wird gegenwärtig (Juli 2020) am Fraunhofer IPA aufgebaut und steht den Projekten ab Herbst zur Verfügung. Der eigentlich vorgesehene Zeitplan, ab Ende Mai Tests durchführen zu können, konnte aufgrund der ab März einsetzenden Corona-Krise leider nicht eingehalten werden.

Ziel der Evaluierungen ist einerseits, eine transportable Testumgebung zu schaffen, die für möglichst viele Roboter einsetzbar ist. Andererseits sollen Erkenntnisse über die Anforderungen an eine Testumgebung ermittelt werden. Dies beinhaltet auch die Anforderungen an technisches Equipment, um die Tests zu erfassen und auszuwerten (z. B. externe Kamerasysteme).

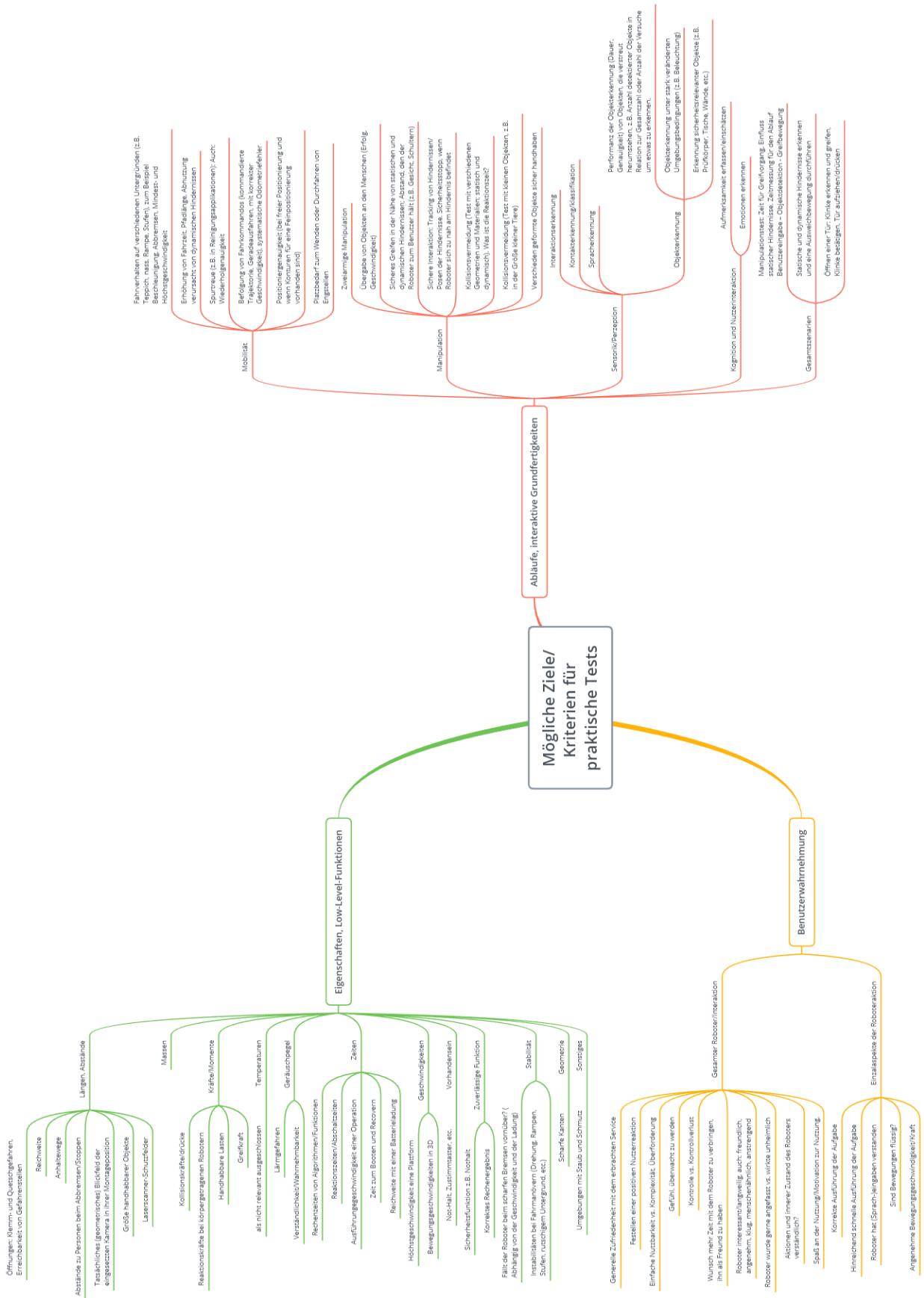


Abbildung 1.2: Sammlung von Kriterien für praktische Sicherheits- und Performancetests in Form einer Mindmap

1.4 Ergebnisse

Durch die flächendeckende Schulung aller Projekte im Bereich Safety konnte erreicht werden, dass sich alle Projekte mit dem Thema auseinandergesetzt haben. Die Anforderungen, die für ein praxistaugliches System zu erfüllen sind, wurden ermittelt und diskutiert. Allerdings zeigte sich, dass eine vollständige Umsetzung nicht immer möglich ist. Wie zu erwarten war, spielt die Kollaboration zwischen Mensch und Roboter bei den Grundfertigkeiten zur Interaktion eine große Rolle. Mehrere technische Projekte beschäftigen sich beispielsweise mit der Entwicklung von Szenarien, die das Anreichen von Gegenständen und insbesondere das Heranführen bis zum Mund beinhalten. Dies kommt beispielsweise zum Einsatz, um Menschen eine selbstbestimmte Nahrungsaufnahme zu ermöglichen, auch wenn sie aufgrund von Krankheit oder Behinderung ihre Arme und Hände nicht gebrauchen können. Aus Sicht der Sicherheitstechnik stellt hier eine mögliche Kollision mit dem Kopf ein hohes Risiko dar. Neben nachgiebigen Roboterstrukturen wurde vor allem eine Begrenzung des Arbeitsraums diskutiert, um das Risiko zu mindern. Dies setzt allerdings voraus, dass Personen ihren Kopf noch ein kleines Stück auf den Roboter zubewegen können, um Nahrung entgegenzunehmen. Andere Formen der Mensch-Roboter-Kollaboration stellen robotische Trainingsgeräte dar, die sich im stetigen Kontakt mit einer Person befinden und eine Kraftübertragung zwischen Benutzer/Patient und Trainingsgerät erfordern.

Da viele der technischen Projekte im medizinischen Umfeld (z. B. Pflege, Reha etc.) angesiedelt waren, existierte bei vielen Demonstratoren bereits die Anforderung, ein Ethikvotum für praktische Tests mit Probanden einzuholen. Diese Ethikräte haben die technische Sicherheit allerdings in der Regel nur bedingt im Fokus und es fehlt häufig auch die Kompetenz, die Sicherheit zu beurteilen. Insofern konnte durch die durchgeführten Schulungen und die Hinweise zur Erstellung einer Risikobeurteilung zusätzliche Sicherheit für die Entwicklerteams geschaffen werden. Durch das Angebot, praktische Tests mit der Testumgebung durchzuführen, können die entwickelten Sicherheitskonzepte validiert und die Demonstratoren auf eventuelle Schwachstellen hin überprüft werden.

Einheitliche Schnittstellen und Datenmodelle als Basis tatsächlich interoperabler Grundfunktionen, die aufeinander aufbauen können, um zunehmend komplexe Anwendungsfunktionen effizienter zu realisieren, sind weiter eine große Herausforderung. Dies liegt zum Teil an den über Jahre, teils Jahrzehnte, in aufeinander aufbauenden Förderprojekten gewachsenen Softwarestrukturen und zum Teil an bisher fehlenden Alternativen für eine effiziente und interoperable Softwareentwicklung in der Robotik. Das vor rund zehn Jahren entstandene ROS („Robot Operating System“, auch wenn es sich strenggenommen nicht um ein Betriebssystem handelt) stellt einen ersten Schritt in diese Richtung dar und wird mittlerweile in den allermeisten Projekten als Standard-Middleware und Komponentensystem eingesetzt. Es greift aber durch eine fehlende Modellschicht und nur geringe Werkzeugunterstützung zu kurz. Insbesondere sind ROS-Nodes zwar in technischer Sicht Komponenten, die prinzipiell wiederverwertbar sind. Es gibt aber nur in Ansätzen (z. B. beim so genannten „Navigation Stack“ und dem ROS-Projekt „MoveIt!“) systematisch strukturierte und weitgehend universell akzeptierte Schnittstellen, die sowohl die einfache Wiederverwendung des Stacks als Ganzes als auch den einfachen Austausch von Teilen des Stacks durch alternative

Implementierungen erlauben. Obwohl das Problem bekannt und erkannt ist, sind die erheblichen „Altlasten“ an existierender, kontinuierlich weiterentwickelter Software ein erhebliches Hindernis auf dem Weg zu modernen, modellgetriebenen und weitgehend werkzeuggestützten Softwareentwicklungsmethoden. Dies ist insbesondere insofern problematisch, als dass sich durch Ausnutzung semantischer Modellierung und darauf aufbauenden formalen Verifikationsmethoden wesentlich einfacher und nachvollziehbarer Aussagen zum Systemverhalten treffen ließen, als dies bei manueller Analyse eines komplexen Softwaresystems möglich ist. Solche Aussagen z. B. zu garantierten Reaktionszeiten von Subsystemen sind jedoch wesentlich, um die funktionale Sicherheit eines Systems zu bewerten.

In Hinblick auf die „Sicherheits- und Performance-Evaluation“ wurden drei Typen von interaktiven Grundfunktionen identifiziert, die bei fast allen Demonstratoren der technischen Projekte eine Rolle spielen. Diese sind die Mobilität der Roboter, das Manipulieren von Objekten mit Roboterarmen und Greifern sowie die Fähigkeit, Objekte mithilfe von Sensoren zu erkennen. Insbesondere die Mobilität stellt das verbindende Element über fast alle Demonstratoren dar. Um dies zu adressieren, wurde für die Testumgebung ein modularer Boden angeschafft (Abbildung 1.3). Dieser besteht aus 1m x 1m großen Platten mit Oberflächen aus Parkett, Teppich und einem dunklen, reflektierenden Glasboden. Letzterer stellt vor allem für auf den Boden schauende Sensoren eine Herausforderung dar. Neben ebenen Flächen kann der Testboden auch zu einer Rampe aufgebaut werden, um beispielsweise die Kippstabilität eines Demonstrators zu untersuchen.

Darüber hinaus wurden verschiedene Hindernisse definiert, die jeweils ungünstige, in einer Umgebung anzutreffende Objekte darstellen. Diese umfassen beispielsweise zylindrische Prüfkörper, die entsprechend den einschlägigen Normen die minimalen Durchmesser von Oberkörpern, Armen und Beinen, jeweils von Erwachsenen und Kindern, darstellen. Diese wurden mit schwarzem Moltonstoff bezogen, da optischen Sensoren sie so aufgrund der niedrigeren Remissionsraten schwerer erkennen können. Weitere Beispiele für Hindernisse sind dünne Tischbeine und eine Haushaltsleiter mit Beinen aus blankem, reflektierendem Metall. Um Kamerasysteme zu testen, wurden zudem mehrere Tests mit zu erkennenden Haushaltsobjekten definiert. Um ungünstige Bedingungen zu simulieren, kommen beispielsweise Szenen mit mehreren Objekten zum Einsatz, die sich gegenseitig verdecken. Zudem kann die Beleuchtung verändert werden, um beispielsweise die Effekte von Schattenwurf oder niedrigem Umgebungslicht zu untersuchen.

Untersuchungen der Performance lassen sich grundsätzlich mit der gleichen Testumgebung durchführen wie Untersuchungen der funktionalen Sicherheit. So kann beispielsweise für beide Fälle ein Test durchgeführt werden, in dem ein mobiler Roboter einem sich bewegenden Hindernis ausweichen muss. Während beim Safety-Test das Vermeiden einer Kollision bewertet wird, kann beim Performance-Test die Zeit beurteilt werden, die der Roboter zum Umfahren des Hindernisses und dem Erreichen einer Zielposition braucht. Welche der genannten Tests später bei den technischen Projekten durchgeführt werden, wird im Vorfeld mit diesen abgesprochen. Zudem wird es die Möglichkeit geben, zusätzliche, speziell auf einen Demonstrator zugeschnittene Tests durchzuführen, solange sie mit dem vorhandenen Equipment darstellbar sind.



Abbildung 1.3 Testaufbauten für die Hinderniserkennung und -vermeidung (links) und für die Objekterkennung unter wechselnden Lichtverhältnissen (rechts). Quelle: Fraunhofer IPA / Theo Jacobs

1.5 Forschungsausblick

Die im Rahmen von ARAIG entwickelte Testumgebung wird auch über das Projektende hinaus verwendet und weiterentwickelt werden. So kann sie in vielen anderen Forschungsprojekten zum Einsatz kommen, bei denen Demonstratoren entwickelt werden. Dadurch ergeben sich ggf. Ansätze für zusätzliche Tests. Gleichzeitig werden die Erfahrungen mit den praktischen Tests in die Normungsarbeit im ISO TC 299 zurückgespiegelt und den Arbeitsgruppen für funktionale Sicherheit und für Performance zur Verfügung gestellt. In beiden Arbeitsgruppen steht in den kommenden Jahren eine Überarbeitung von Normen an, sodass im Idealfall ein Teil der Testmethoden in internationale Standards überführt werden kann. Dies ermöglicht Laboren in anderen Ländern, die Tests durchzuführen.

Im Bereich der Erzielung umfassender Interoperabilität von Komponenten und Grundfunktionen unterschiedlicher Hersteller und damit einfacher Komposition neuer und innovativer Robotikanwendungen aus einem Baukasten an Modulen stellt sich die Frage nach der – möglichst unkomplizierten – Integration von existierenden proprietären Systemen. Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt kann hier in der teilautomatisierten Analyse existierender Softwaresysteme liegen, um zum einen aus bestehenden Implementierungen die für einen kompositorischen Ansatz der Systementwicklung notwendigen Modelle nachträglich zu extrahieren, und zum anderen möglichst automatisiert Schnittstellenhüllen (sog. „Glue-Code“ oder „Wrapper“) generieren zu können. Mit diesen können ältere Softwareartefakte in ein modernes Softwarerahmenwerk eingebunden werden.

Eine große Herausforderung wird in Zukunft auch die funktionale Sicherheit von modularen Systemen sein. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass Serviceroboter nicht mehr von einem Hersteller kommen, sondern aus den Komponenten mehrerer Hersteller zusammengeführt werden. Dabei muss sichergestellt sein, dass alle Komponenten fehlerfrei zusammenarbeiten und die Sicherheit des Gesamtsystems gewährleistet ist. Hierzu bedarf es gewisser Vorarbeiten jedes einzelnen Komponentenherstellers. Zudem sind zentrale „Sicherheitsmodule“ denkbar, die die Sicherheitsfunktionalitäten der einzelnen Module zusammenführen und koordinieren. Dabei muss untersucht werden, wie sich der modulare Charakter auf die durchzuführende Sicherheitsevaluation und insbesondere auf die Inhalte der durchzuführenden praktischen Tests auswirkt.

1.6 Implikationen für die Praxis

Die Testumgebung für Sicherheits- und Performance-Evaluation wird auch nach dem Projektende für praktische Tests zur Verfügung stehen. Geplant ist das Angebot an Hersteller und Entwickler von Servicerobotern, die Testumgebung im Rahmen einer Forschungskoooperation zu nutzen. Zudem können Roboterhersteller mit der Veröffentlichung der Projektergebnisse bzw. der Übernahme in die Normung Teile der Testumgebung nachbauen und eigene Tests damit durchführen.

1.7 Literaturverzeichnis

ISO Technical Committee TC 299 „Robotics“, <https://www.iso.org/committee/5915511.html>.

Normenfamilie ISO 18646-1 bis -4 Robotics — Performance criteria and related test methods for service robots, 2016 – 2020.

Norm ISO TR 23482-1 Robotics — Application of ISO 13482 — Part 1: Safety-related test methods, 2020.

Projekt SeRoNet „Servicerobotik Netzwerk“, gefördert durch das BMWi, Förderkennzeichen 01MA17003A, URL: <https://www.seronet-projekt.de/>.

Projekt RobMoSys, gefördert im H2020 Programm der Europäischen Union, Fördervertrag: 732410, URL: <https://robmosys.eu/>.

Projekt VaSiMa (Validierung der funktionalen Sicherheit bei der mobilen Manipulation mit Servicerobotern), gefördert durch das BMWi, Förderkennzeichen 01FS11009. <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/VaSiMa.html>.

World Robotics 2019 - Service Robots; IFR Statistical Department, VDMA Services GmbH, Frankfurt am Main, Germany, 2019, ISBN 978-3-8163-0731-0. Page 46-47. URL: <https://ifr.org/worldrobotics/>

2 Ethische und rechtliche Aspekte der Servicerobotik

Peter Remmers, Matthias Hartwig, David Stegmaier

Projektpartner: Technische Universität Berlin; Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (Unterauftragnehmer)

2.1 Ethik in der Mensch-Roboter-Interaktion

Es herrscht inzwischen weitgehend Einigkeit darüber, dass die Entwicklung der Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) nicht nur eine technische Herausforderung ist, sondern darüber hinaus auch besondere ethische und rechtliche Fragen aufwirft. Es gibt folglich auf allen Seiten das Bedürfnis nach umfassenden ethischen und rechtlichen Orientierungen und Beurteilungen. Dabei geht es zunächst um die komplexen Anforderungen an sichere Interaktionen und rechtmäßige Datenverarbeitungen, die von aktuellen Technologien der Digitalisierung allgemein erfüllt werden sollen. Gerade Interaktionen im physischen Kontaktbereich erfordern Überlegungen dazu, was dem menschlichen Interaktionspartner zugemutet und zugetraut werden kann (Remmers, 2020a). Ebenso erfordern bestimmte Sicherheitslösungen eine komplexe Sensorik, deren Datensammlung nicht unbedingt im Interesse der interagierenden Person liegen dürfte. Doch Sicherheit, Zweckmäßigkeit und Rechtmäßigkeit sind zunächst lediglich notwendige Bedingungen für einen vertretbaren Einsatz von neuen Technologien wie der Robotik in komplexen Lebens- und Arbeitswelten. Ihre spezifische ethische Bedeutsamkeit erhält die Mensch-Roboter-Interaktion darüber hinaus vor allem dadurch, dass mit dem Einsatz von Robotern tendenziell tiefgreifende Umgestaltungen von geläufigen *zwischenmenschlichen* Interaktionen verbunden sind. Zentrale Themen einer ethischen und rechtlichen Begleitforschung der Robotik-Entwicklung sind daher diejenigen Veränderungen im Zusammenleben und in der Arbeit, mit denen bei grundsätzlich gelingenden, sicheren und rechtmäßigen Mensch-Roboter-Interaktionen zu rechnen ist.

Da ethische Reflexionen über etablierte und akzeptierte Technologien einen stark eingeschränkten Gestaltungsspielraum haben (Grunwald, 2010, S. 165ff.), ist eine ethische Begleitung der technologischen Forschung und Entwicklung im laufenden Prozess angezeigt. Diesem Anspruch einer integrierten Forschung (Gransche & Manzeschke, 2020) folgen auch die Projekte in der Ausschreibung „Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten“ (ARA1): In allen Verbundprojekten der Ausschreibung wurde Expertise zu den ethischen, rechtlichen und sozialen Implikationen der Technologieentwicklung (ELSI) in den interdisziplinären Austausch einbezogen. Darüber hinaus wird im projektübergreifenden Begleitforschungsprojekt ARAIG ein Teilvorhaben zu den *ethischen und rechtlichen Aspekten der Servicerobotik* gefördert. Mit diesem Format ergibt sich die besondere Gelegenheit, zentrale Aspekte der MRI aus einer übergeordneten Perspektive zu erforschen, wobei zugleich eine enge Orientierung an den konkreten technologischen Entwicklungen gegeben ist – ein Zugang zur Praxis, der vielen Arbeiten in der ethischen Fachliteratur fehlt. So sind aus ethischer

Perspektive bereits im Titel der ARA1-Ausschreibung mehrere explizite Herausforderungen für die Begleitforschung vorgezeichnet: Es geht um *interaktive Grundfertigkeiten* von *autonomen Robotern für Assistenzfunktionen*. Der Fokus liegt also auf ethischen und rechtlichen Aspekten der Interaktion mit (teil-)autonomen Robotern, die dem Menschen assistieren sollen.

2.1.1 Autonomie als Eigenschaft von Robotern

Eine erste (begriffliche) Herausforderung besteht darin, mit der Eigenschaft der Autonomie im Zusammenhang mit interagierenden Robotern umzugehen. Dieser Begriff ist inzwischen zu einem zentralen Thema der technikethischen und technikphilosophischen Debatten geworden, die sich allerdings oft auf sehr allgemeinem und teilweise hochspekulativem Niveau bewegen. Dagegen findet der Begriff der Autonomie selbst im Recht keinen Niederschlag. Auch finden sich in techniknahen Diskussionen des Begriffsfeldes bisher nur wenige Beiträge zur spezifischen Rolle der Autonomie in der Mensch-Roboter-Interaktion (im Vergleich zur Autonomie als Eigenschaft technischer Systeme im Allgemeinen) (Gransche et al., 2014; Beer et al., 2014). Die Betrachtung der Entwicklungen in den ARA1-Projekten gibt hingegen realitätsnahe und instruktive Einblicke in die konkrete praktische Bedeutung der Eigenschaft der Autonomie bei Robotern und in der MRI-Entwicklung, die in den folgenden Abschnitten resümiert werden.

Betrachtet man die gesamte Ausschreibungsreihe zu Robotern für Assistenzfunktionen, wird am Begriff der Autonomie eine interessante Entwicklung deutlich: Trug die erste Ausschreibung noch den Namen „*Autonome* Roboter für Assistenzfunktionen“, entfällt der Begriff „autonom“ in den folgenden beiden Ausschreibungen der Reihe. Der Begriff rückt u. a. deswegen in den Hintergrund, weil er durch die Debatte um die (vermeintlichen) Gefahren des „autonomen Fahrens“ (d. h. fahrerloser Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr) in ein schlechtes Licht rückt. Trotzdem lohnt es sich, die Eigenschaft der Autonomie in den Projekten der 1. Ausschreibung genauer in den Blick zu nehmen. Aus der Forschungsliteratur entnehmen wir, dass das weite Bedeutungsfeld der Autonomie von einer im engeren Sinne *technologischen* Autonomie zu unterscheiden ist. In diesem technologischen Verständnis funktioniert Autonomie nicht als ethischer Grundbegriff. Vielmehr findet hier eine Ausdifferenzierung und Umdeutung von verschiedenen Bedeutungselementen des überlieferten Autonomiebegriffs statt, wie z. B. Selbständigkeit, Subjektivität, Zurechenbarkeit und Verantwortlichkeit. Die Verwendung des Autonomie-Begriffs im Bereich von Programmen und Maschinen hat sich von verschiedenen überlieferten Bedeutungsaspekten inspirieren lassen, kann aber kaum auf eine einheitliche und zugleich übergreifende Definition zurückgeführt werden.

Wenn man von technologischer Autonomie als „Eigenschaft“ eines technischen Artefakts oder Systems spricht, dann ist zunächst die Klärung der Ebene der Zuschreibung wichtig. Autonomie bezeichnet hier die technische Möglichkeit, eine gegebene Aufgabe ohne direkte und simultane Nutzersteuerung auszuführen. Streng genommen ist ein Roboter also nicht selbst autonom, sondern er führt eine Aufgabe „autonom“ aus, sofern für diesen Prozess keine direkte Steuerung notwendig ist (Remmers & Schweidler, 2020).

Schaut man sich dann die Eigenschaft der technologischen Autonomie in ihrer speziellen Ausprägung im Bereich der Robotik an, dann zeigt sich, dass dort (mindestens) zwei Verwendungen des Autonomie-Begriffs unterschieden werden können: Einerseits ein *enger* Begriff von Autonomie, der sich auf den Vorgang einer Automation von (Teil-)Entscheidungen im Rahmen einer übergeordneten Aufgabe bezieht. Ein typisches Beispiel ist die selbständige Navigation eines Roboters im Raum. Wenn die Aufgabe lautet: „Gehe von A nach B“, dann sind bei der Ausführung dieser Aufgabe Teilentscheidungen zu treffen, die mit der Aufgabenbeschreibung nicht oder nur implizit festgelegt sind. Wenn der Roboter sich von A nach B bewegt, dabei Hindernisse erkennt und ihnen ausweicht, eine Tür öffnet und mit dem nötigen Schwung die Türschwelle überquert, dann hat er die Aufgabe autonom ausgeführt. Das bedeutet: Der Roboter kann auf die jeweils vorliegenden Sensordaten korrekt im Sinne der Aufgabe reagieren, obwohl die dafür notwendigen Informationen nicht explizit in der Aufgabenbeschreibung enthalten sind.

Autonomie im engeren Sinne, also als programmierte Verzweigung zur Auswahl des Roboter-Verhaltens in einem „Verhaltensnetzwerk“, kommt explizit beispielsweise in den ARA1-Projekten *Sina* und *AuRorA* vor. In beiden Projekten assistiert ein Roboter, indem er Gegenstände holt und der interagierenden Person überreicht. Die Auswahl von Handlungen und Verhaltensweisen über Entscheidungsbäume spielt zwar auch in anderen Projekten eine Rolle, sie bildet aber nur einen Teil der umfassenderen Autonomie im Sinne der Fähigkeit des Roboters, assistierend in Interaktionen zu agieren. Vor diesem Hintergrund kann Autonomie auch in einem *weiten* Sinne verstanden werden, der sich auf gelingende Interaktionen in komplexen Umgebungen und mit menschlichen Interaktionspartnern bezieht. Automatisierte Entscheidungen können bei der Realisierung dieser komplexeren Interaktionen beteiligt sein, stehen aber nicht im Vordergrund – auch andere Fähigkeiten eines Roboters können gleichermaßen relevant und notwendig für entsprechende Interaktionen sein. So kann ein Roboter beispielsweise erkennen, worauf eine Person gerade ihre Aufmerksamkeit richtet, dann „selbständig“ auf die Person zugehen und sie ansprechen, wobei bestimmte Prozesse zum Lenken (und Beibehalten) der Aufmerksamkeit ablaufen (vgl. Projekt *AsaRob*). Die interagierende Person muss selbst in diesem Beispiel gar keine Interaktion initiiert und auch (noch) keine Aufgabe formuliert haben. Der Roboter ist dann autonom, weil er komplexe Interaktionen in lebensweltlichen Umgebungen initiieren, aufrechterhalten und in eine gewünschte Richtung lenken kann.

Eine besondere Rolle spielt die Eigenschaft der Autonomie im Projekt *FRAME*. An diesem Projekt wird die komplexe Rolle der Autonomie in der Mensch-Roboter-Interaktion gut deutlich. Ausgangspunkt ist hier die Navigation eines Roboters zwischen verschiedenen Etagen per Fahrstuhl. Die Aufgabe „Fahre in Etage 4“ kann der Roboter allerdings nicht ausführen, weil eine eigenständige Fahrstuhlnutzung aus verschiedenen Gründen ausgeschlossen ist. Der Roboter ist daher bei der Fahrstuhlnutzung auf die Assistenz von Personen angewiesen. In dieser Hinsicht müsste der Roboter eigentlich als nicht-autonom (in Bezug auf die Aufgabe) gelten. Anders sieht es dagegen aus, wenn der Roboter andere Personen selbständig zur Assistenz bei der Fahrstuhlnutzung einbeziehen kann – und das ist das eigentliche Ziel des Projekts *FRAME*. Hier realisieren die entwickelten Grundfertigkeiten nicht unmittelbar die selbständige Ausführung einer Aufgabe, sondern sie ermöglichen es dem Roboter, die Assistenz einer interagierenden Person für die Ausführung einer Aufgabe heranzuziehen. Die Ausführung der übergeordneten Aufgabe, auf eine

andere Etage zu navigieren, ist deshalb wieder als autonom zu bezeichnen, allerdings hier nicht im Sinne der Definition „ohne menschliche Intervention“ (Beer et al., 2014), sondern gerade durch die Fertigkeit des Roboters, selbständig menschliche Assistenz einzubeziehen.

Neben der technologischen Autonomie, die als Eigenschaft des Roboters mit den entwickelten Grundfertigkeiten realisiert wird, kommt auch die Autonomie der interagierenden Person in einigen ARA1-Projekten explizit zur Sprache, beispielsweise in den Projekten *MobILe* und *RoPHa*. Ziel der robotischen Assistenz ist hier die Förderung oder Ermöglichung von selbstbestimmten Handlungen körperlich eingeschränkter Personen. Assistenz bedeutet hier die Ermöglichung von selbstbestimmtem Handeln bzw. die Ersetzung von fehlender Autonomie seitens des Menschen durch den Roboter. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass dieses Autonomie-Verständnis einen ethischen Wert ausdrückt, also etwas allgemein Wünschenswertes für Personen. Die technologische Autonomie von Robotern kann hier eine Rolle spielen, aber trotz der Namensgleichheit bezeichnet sie eine grundsätzlich andere Eigenschaft, die nicht mit der Wertedimension zu verwechseln ist.

Zusammenfassend zeigt sich an den verschiedenen ARA1-Projekten die begriffliche und technische Vielfalt der Autonomie-Konzeptionen sehr anschaulich. Zugleich werden Schwierigkeiten und Unklarheiten deutlich, die den Begriff der Autonomie an seine Grenzen bringen. Anhand von Differenzierungen und Übersetzungen des Begriffs in spezifisch technisches Vokabular oder auch in allgemeinverständliche Beschreibungen für die interdisziplinäre Verständigung kann das Konzept im Grundsatz weiterentwickelt werden – auch wenn Autonomie dem Namen nach in den Hintergrund tritt.

2.1.2 Vermenschlichungseffekte

An der letzten Bemerkung zur Autonomie in den ARA1-Projekten wird bereits eine Tendenz deutlich, die die Robotik in vielerlei Hinsicht prägt: die Angleichung des Roboters an Vorstellungen von menschlichen oder tierähnlichen Interaktionsteilnehmern. Zunächst sind Roboter typische Auslöser für die spontane psychologische Tendenz zur „Vermenschlichung“ von technischen Artefakten. Generell handelt es sich bei derartigen Zuschreibungen um ein häufig zu beobachtendes, spontan von Personen ausgehendes und normalerweise harmloses Phänomen. Der Spielraum reicht z. B. von kindlichen Puppenspielen bis zur Unterstellung von Absichten etwa bei Autos oder Computern. Doch während entsprechende Verhaltenstendenzen bei vielen Technologien eher beiläufig eintreten, werden sie als psychologische Effekte im Gestaltungsprozess von Robotern gezielt und systematisch ausgenutzt, um die Interaktionsfähigkeit des Menschen zu unterstützen und zu steuern. So können bekannte und geläufige zwischenmenschliche Interaktionen als Maßstab für die Gestaltung der Interaktion und als intuitiver Zugang für Nutzer abgerufen werden (vgl. auch Kapitel 4.4 zu Anthropomorphismus).

Eine intendierte Vermenschlichung von Robotern wird meistens im Zusammenhang mit der äußeren Gestaltung diskutiert, etwa bei humanoiden oder zoomorphen

Formen.¹ Allerdings kann man gerade an den Entwicklungen der ARA1-Projekte gut beobachten, dass Vermenschlichungseffekte bei Robotern auch auf anderen Ebenen der Interaktionsgestaltung eine Rolle spielen können. Sowohl die genannte technologische Autonomie als Verhaltensmerkmal von Robotern als auch die Orientierung an typisch menschlichen Handlungszusammenhängen bei der Interaktionsgestaltung tragen zum Bild eines quasi-menschlichen „Verhaltens“ von Robotern bei. Auch wenn ein Roboter kein Gesicht und keine Arme hat, kann er durch seine Reaktionen in der Interaktion entsprechende Zuschreibungen provozieren.

Vermenschlichungseffekte sind nicht unbedingt ethisch problematisch. Die gezielte Ausnutzung und Lenkung von gegebenen psychologischen Tendenzen im Rahmen der Mensch-Roboter-Kollaboration bietet viele Vorteile für die Gestaltung der entsprechenden Interaktionen. So kann auch technischen Laien eine „intuitive“ Interaktion mit Robotern auf die gewünschte Weise erleichtert werden. Insgesamt ermöglicht dieser Ansatz neue und in der Praxis erheblich vereinfachte Anwendungen der Robotik.

Allerdings können bestimmte psychologische Effekte der Vermenschlichung auch unerwünschte Auswirkungen haben. Zunächst kann eine menschenähnliche Robotergestaltung zu Fehleinschätzungen über die tatsächlichen Fähigkeiten des Roboters führen, wodurch die Interaktion fehleranfällig wird. Wenn ein Roboter beispielsweise Hände hat, dann liegt die Annahme einer Greiffähigkeit nahe – eine Erwartung, die beispielsweise der Roboter *Pepper* nicht erfüllt.

Darüber hinaus wird die Möglichkeit einer entstehenden emotionalen Bindung von interagierenden Personen an Roboter diskutiert (insbesondere bei langfristigen Interaktionen), wodurch die eigentlich intendierte Nutzung gestört werden kann. Ein Beispiel dafür wäre die Entwicklung einer Sorge-Beziehung für den Roboter in langfristigen Interaktionen, die sich durch die Wahrnehmung eines vermeintlich ‚lebendigen‘ Roboterverhaltens einstellen kann. Wahrscheinlichkeit und Relevanz dieser Effekte können aktuell noch nicht hinreichend empirisch untersucht und eingeschätzt werden, da es keine langfristigen Mensch-Roboter-Interaktionen außerhalb professionalisierter Bereiche gibt. Anekdotische Beispiele für eine Emotionalisierung einer Mensch-Roboter-Beziehung sind aber inzwischen bei Interaktionen mit Staubsaugerrobotern bekannt, die sich an Beziehungen zu Haustieren anzulehnen scheinen. Kritisch erscheinen dagegen aktuell bereits Anwendungsszenarien von *sozialen* Robotern, deren Zweck neben Unterhaltungs-, Lehr- und Spielefunktionen gerade in der Suggestion von emotionalen Bindungen bestehen kann. Hier kündigen sich einige ethische Bedenken an, beispielsweise angesichts der Möglichkeit einer manipulativen Verhaltensbeeinflussung des Nutzers (‚Nudging‘ – vgl. auch Kap. 4.1.2.4). Allerdings sind zumindest die Roboter aus den ARA1-Projekten noch nicht so weit.

2.1.3 Verantwortung

Schließlich können aus der Vermenschlichung und der damit verbundenen vermeintlichen Handlungsträgerschaft eines Roboters Folgen für die Zuschreibung

¹ Zoomorphe Gestaltung von Robotern kann ebenfalls als eine besondere Form der Vermenschlichung interpretiert werden, da üblicherweise „vermenschlichte“ (d.h. domestizierte, gezähmte oder gezüchtete) Nutz- und Heimtiere als Maßstab für die Gestaltung von Robotern herangezogen werden (im Unterschied zu Wildtieren).

von Verantwortung entstehen. So kann die Gestaltung eines Roboters als Handlungssubjekt insbesondere bei technischen Laien das Gefühl der eigenen Verantwortlichkeit vermindern. Damit und mit der Unübersichtlichkeit in der Interaktionssituation ist eine Tendenz zur Verantwortungsdiffusion verbunden, im äußersten Falle noch genährt von der mythischen Idee, dass die Maschine auf eine Weise selbst für ihre Aktionen verantwortlich sein könnte. Entsprechende Tendenzen könnten durch eine missverstandene Übertragung des ethisch-moralischen Autonomie-Begriffs auf Maschinen und durch die angesprochenen Vermenschlichungseffekte noch unterstützt werden.

Rechtlich sind die Verhältnisse allerdings eindeutig: Verantwortung wird weiterhin immer auf menschliche Handlungssubjekte zurückgeführt – Hersteller, Entwickler, Programmierer, Anwender, Nutzer etc. Dieser Grundsatz ist im Recht fest verankert, ohne dass es dafür eines neuen Rechtsprinzips der menschlichen Letztverantwortung bedarf. Dasselbe gilt auch für ethisch-moralische Verantwortungskonzepte. Hier ergibt sich lediglich die Schwierigkeit, dass aufgrund der tendenziell informellen moralischen Verhaltensstruktur nicht auf geltende Rechtsprechung, sondern auf technikethische Fachmeinungen verwiesen werden kann.

Es zeigt sich aber, dass Vermenschlichungseffekte im Umgang mit Robotern auch rechtlich bedeutsam sind, sofern eine Übertragung der für Menschen gemachten Verhaltensordnung auf Maschinen häufig einfach und verlockend erscheint (vgl. die Anforderung, dass ein Fahrroboter in Verkehr den „den an die Fahrzeugführung gerichteten Verkehrsvorschriften“ entsprechen soll, § 1a Abs. 1 Nr. 2 StVG, so auch geplant für Kraftfahrzeuge mit „autonomer“ Fahrfunktion). Hier gilt es zu differenzieren: Ein Roboter soll (und kann) sich nicht menschlich „verhalten“, sondern menschlichen Bedürfnissen und berechtigten Reaktionserwartungen gerecht werden. Der richtige Ansatz wäre hier also, den Fahrroboter von „den an die Fahrzeugführung gerichteten Verkehrsvorschriften“ konsequent zu entbinden und den Normungsgremien eine konsequente Orientierung an diesen Regelungen für optimale Sicherheit im gemischten Verkehr aufzugeben. Rechtlich bedarf es eines eigenen „maschinengerechten“ Sicherheitskonzepts, das menschlichen Bedürfnissen und berechtigten Reaktionserwartungen Rechnung trägt, aber Sicherheit auf eine der technischen Entwicklung gemäße Weise herstellt und nicht versucht, menschliche Funktionsträger zu simulieren, indem auf eine bisher für diese geltende Verhaltensordnung schlicht verwiesen wird. Hier zeichnet sich jedoch ein Akzeptanzproblem aus derselben Quelle ab. Die Nachricht „Autonome Fahrzeug sind nicht an die StVO gebunden“ würde in der Bevölkerung für Unruhe sorgen, obgleich von vornherein ohnehin kein Roboter an irgendeine Rechtsvorschrift halten kann.

Eine weitere Grundidee der ARA1-Ausschreibung besteht darin, interaktive Grundfertigkeiten von Robotern zu modularisieren. Sie werden jeweils einzeln entwickelt und sollen schließlich nach Möglichkeit flexibel in einem Robotersystem zusammengestellt werden können. In diesem Sinne bilden die ARA1-Projekte gewissermaßen einen Teil der Grundlagenforschung zu den komplexen Interaktionen der anknüpfenden Ausschreibung „Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktionsstrategien“ (RA2). Daraus ergibt sich eine zweite (methodische) Herausforderung für die Begleitung des Projektverbundes: Die Forschung konzentriert sich nicht auf umfassende robotische Gesamtsysteme, sondern greift stattdessen elementare Grundfertigkeiten von Robotern heraus, die jeweils wichtige Funktionen in komplexen Interaktionsszenarien haben. Zwar arbeitet jedes der technischen

Verbundprojekte zugleich mit übergreifenden Szenarien und konkreten Use-Cases. Diese hilfreiche Orientierung an einer zukünftigen Anwendung bestimmt die technischen Möglichkeiten der entwickelten interaktiven Grundfertigkeiten allerdings nicht vollständig und lässt viele weitere denkbare Szenarien offen.

Diese Unbestimmtheit der Anwendungsperspektive ist besonders für ethische und rechtliche Beurteilungen relevant. Überblickt man die aktuelle Forschungsliteratur zur ethischen Arbeit mit robotischen Technologien, dann wird eine Diskrepanz zwischen top-down-Ansätzen ethischer Beurteilungen zu den bottom-up-Ansätzen der technologischen Entwicklungen deutlich. Da ethische Beurteilungen zumeist an sehr konkreten lebensweltlichen Situationen und Problemen ansetzen, steht sie in der interdisziplinären Zusammenarbeit mit Technologieentwicklern vor der Herausforderung, aussagekräftige Zusammenhänge zwischen der zukünftigen Anwendungsebene und den einzelnen Entscheidungen der Gestalter herzustellen. Damit ist das grundsätzliche Dilemma der technikethischen Gestaltung von innovativen Technologien angesprochen: Der Forschungsansatz, ein Gesamtsystem ‚analytisch‘ in kleine Elemente zu zerlegen und relativ unabhängig vom späteren Gesamtsystem zu entwickeln, erschwert eine fundierte Einschätzung der Technikfolgen im zukünftigen soziotechnischen System. Aus dieser Konstellation ergeben sich grundsätzliche methodische Fragen zu einer ethisch orientierten Technikgestaltung: Welche Verantwortung tragen die Techniker und Gestalter beispielsweise eines Radar-Sensors, wenn das System, in dem der Sensor eingesetzt wird, in der Anwendung einen unvorhergesehenen Fehler macht?

Die angestrebte Modularisierung der Grundfertigkeiten verdankt sich also einerseits der Arbeitsteilung in der technologischen Entwicklung, wirft aber andererseits grundsätzliche Fragen nach der Verantwortlichkeit der Entwickler für das spätere Gesamtsystem auf. Eine Bestimmung der Verantwortlichkeiten von Entwicklern und Herstellern einzelner Komponenten wird besonders im Recht relevant. So könnte auch bei der rechtlichen Verantwortungsallokation entlang der Produktionskette bei zunehmend autonomen Systemen künftig anders als bisher zu bewerten sein, wer die rechtliche Verantwortung für ein Teil- bzw. das Gesamtprodukt zu tragen hat. Insbesondere bei sog. weiterlernenden Systemen stellt sich dann auch im Technikrecht die Frage, wie im kritischen Zeitpunkt, also bei einem Produkt im Zeitpunkt des Inverkehrbringens oder bei einem Kraftfahrzeug im Zeitpunkt der Zulassung, die rechtlich erforderliche Sicherheit und Beschaffenheit des Systems ermittelt und nachgewiesen werden kann. Es ist dann zu klären, ob solche Systeme mit dem gegebenen Rechtsrahmen noch erfassbar sind, wenn im maßgeblichen Zeitpunkt das sicherheitstechnisch und rechtlich zu bewertende Produkt bereits in endgültiger Form vorliegen muss und eine Veränderbarkeit nicht berücksichtigt werden kann.

2.1.4 Forschungsausblick: Strukturelle Ethik als integrierter Designansatz zur Technisierung von Interaktionen

Neben der diskutierten Vermenschlichung von Robotern findet in umgekehrter Richtung eine Anpassung von Interaktionen an die technischen Möglichkeiten statt. Denn die Integration von Mensch-Technik-Interaktionen beispielsweise im Alltag oder in traditionell weniger stark technisierten Arbeitsfeldern (z. B. der Pflege) macht bestimmte Regelungen erforderlich, die vor dem Einsatz der Technik und unabhängig davon nicht notwendig waren, z. B. weil sie sich aus der sozialen Entwicklung heraus

ergeben haben. Wenn ein Roboter in diesen Handlungszusammenhängen eingesetzt werden soll – sei es zur Substitution oder zur Assistenz – dann müssen in vielen Fällen offenbar bestimmte Abläufe und Reaktionen festgelegt werden. Der Idealfall, dass ein Roboter in ein komplexes Umfeld eingebunden wird, während alle anderen Eigenschaften der Situation identisch bleiben, ist nicht realistisch. Auch wenn das Ziel gesetzt ist, „Technik zum Menschen“ zu bringen, lässt sich eine Anpassung des Menschen an die Technik in diesem Prozess nicht vermeiden. Die ethische Fragestellung lautet dann: Welche Anpassungen der Lebenswelt sind in welchem Ausmaß wünschenswert, zumutbar und im Entwicklungsprozess kontrollierbar?

Diese Notwendigkeit eines Eingriffs in geläufige und eingespielte zwischenmenschliche Interaktionen erfordert konkrete Entscheidungen über die Gestaltung und Regulierung der Interaktionen. Entsprechende Festlegungen im Verlauf technologischer Entwicklungsprozesse haben somit ethische und rechtliche Relevanz. Allerdings ist die ethische Tragweite dieser Festlegungen nicht leicht zu bestimmen und zu untersuchen, wenn man von reinen Akzeptanz-Fragen absieht. Das liegt daran, dass die vielfältigen Abläufe alltäglicher und flüssig funktionierender Interaktionen zwischen Menschen oft hochkomplex, unverstanden und unsichtbar sind. Aus der Perspektive der Robotik wurde dieser Erkenntnis bereits in den 1980er Jahren diskutiert (Brooks, 1991).

Dieser Punkt betrifft insbesondere die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) als besondere Form der Interaktion (Onnasch & Roesler, 2020). Technische Systeme für MRK-Anwendungen werden aktuell in zwei Richtungen ausdifferenziert: Als grundsätzliche Weiterentwicklung der Robotik in der industriellen Arbeit (Müller et al., 2019) sowie als Interaktionsform für Serviceroboter, d. h. für Roboteranwendungen in nicht-industriellen Arbeits- und Alltagsumgebungen (Buxbaum, 2020). Insbesondere im Bereich der Service- und Assistenzrobotik „simuliert“ die MRK häufig zwischenmenschliche Interaktionen, wobei Roboter technisch nach dem Vorbild von Handlungssubjekten gestaltet werden.

Unter dieser Voraussetzung können die Entscheidungen im Forschungs- und Entwicklungsprozess, die sich auf die Interaktionsgestaltung auswirken, identifiziert und bewertet werden. So sind beispielsweise mit dem Ansatz der *strukturalen* Ethik entsprechende Eingriffe in technologische Entwicklungsprozesse denkbar (Brey, 2014). Ziel dieses Ansatzes ist es, den Einfluss der technologischen Gestaltung auf die Handlungs- und Verhaltensspielräume des Nutzers systematisch zu bestimmen. Welche Handlungen werden durch den Roboter nahegelegt, welche erscheinen vielleicht unpraktisch oder unbequem? Wird ein bestimmtes Nutzerverhalten suggeriert und gefördert? Werden bestimmte Beziehungen zwischen den Interaktionspartnern vom Umfeld auf die Mensch-Roboter-Interaktion „vererbt“? Welche Routinen stellen sich ein?

Die Beantwortung derartiger Fragen funktioniert allerdings nicht im Rahmen von einzelnen Workshops, sondern bestenfalls durch möglichst direkte Mitarbeit eines Ethik-Experten am Gestaltungsvorgang, d. h. durch Integration im Labor. Beobachtungen und Konzeptualisierungen aus der Perspektive der übergeordneten Begleitforschung liefern wichtige Hinweise und methodische Anknüpfungspunkte für diesen Ansatz. Eine aktive Einspeisung der gewonnenen Erkenntnisse in die Projekteentwicklungen hat durch den begleitenden Charakter der Forschung nicht nur auf der Ebene allgemeiner Hinweise und Richtungstendenzen stattgefunden, sondern

stellenweise auch im Prozess und in beratenden Gesprächen über konkrete Gestaltungsoptionen.

2.2 Rechtliche Projektbegleitung

Durch rechtswissenschaftliche Begleitung der technologischen Entwicklung und Implementierung von interaktiven Robotern können rechtliche Anforderungen von Beginn an im Rahmen eines Anforderungsmanagements mitgedacht werden. Bei diesem Ansatz werden nicht nur Fehlentwicklungen vermieden, beispielsweise wenn am Ende der technischen Entwicklung die Zulassungs-, Genehmigungs- oder Planungsprozesse an rechtlichen Vorschriften scheitern oder wenn unvorhergesehene Haftungsrisiken auftreten. Auch die Akzeptanz kann erhöht werden (z. B. durch „data minimisation by design“, also eine konsequente Entwicklung von Datenverarbeitungsprozessen im Geiste der Datenschutzgrundverordnung (DSGVO)). Darüber hinaus kann eine zukünftig für eine technische Entwicklung erforderliche Regulierung rechtzeitig angestoßen werden und in einem wechselseitigen Prozess die Technik dem Recht und das Recht der Technik angenähert werden, um einen rechtsgeleiteten Fortschritt zu gewährleisten.

Da Assistenzroboter per Definition dem Menschen bei verschiedenen Tätigkeiten assistieren, werden sie in Bereichen tätig, die mitunter auch Gegenstand rechtlicher Verhaltensregelungen sind. Im äußersten Falle kann der Assistenzroboter selbst Tätigkeiten ausführen, die gesetzlich reglementiert sind. Roboter können jedoch nie selbst Adressaten von Recht sein, das eben nur Handlungsvorschriften für Menschen bereithält.² Jedoch kann der Adressat des Rechts, also der Mensch, die Rolle des agierenden Subjekts ablegen und an den Assistenzroboter abgeben. Gleichzeitig haben die Reaktionen von Assistenzrobotern Auswirkungen, die den Folgen von menschlichen Handlungen entsprechen können, sodass wir zumindest diese Auswirkungen der Legitimationsstruktur unserer Rechtsordnung unterstellt wissen möchten. Eine sachgerechte Regelung muss zeitlich jedoch bereits früher ansetzen als erst bei der Ausführung der zu regelnden Tätigkeit und ihren Folgen. Vielmehr sind es immer Menschen, die Assistenzroboter entwickeln, programmieren, herstellen, in Verkehr bringen und einsetzen, sodass Reaktionen des Roboters und deren Folgen immer auf menschliches Vorverhalten zurückzuführen sind, das wiederum einer rechtlichen Regelung zugänglich ist (Dettling/Krüger, 2019, S. 211-213). Der zu regelnde Sachverhalt wird durch die Verlagerung des Anknüpfungspunkts der rechtlichen Regelung jedoch komplexer (Kohte, 2015, S. 1417-1419).

² Im Hinblick auf die Schaffung einer sogenannten ‚ePersonhood‘, also einer Rechtspersönlichkeit für Roboter, kann auf Grundlage der hier gefundenen Ergebnisse auf die organische Weiterentwicklung des bestehenden Rechtssystems verwiesen werden (vgl. Lohmann, 2017, S. 168). Einer Schaffung eines neuen Typus von Rechtssubjekt bedarf es nicht, da auch für weiterlernende Systeme noch menschliche Adressaten zur Gewährleistung von Sicherheit und damit rechtlich verantwortliche Rechtssubjekte vorhanden sind. Es mag eine zunehmende Verlagerung der Regulierung ins Produktsicherheitsrecht und in die technische Normierung erfolgen. Der Mensch bleibt aber zweckmäßiger Adressat des Rechts (vgl. Grützmaker, 2016, 695-698). Auch technische Normen werden letztlich durch die Menschen umgesetzt, die den Roboter konstruieren und ihn einsetzen. Dass eine e-Person vergleichbar einer juristischen Person selbstständige Trägerin von Rechten und Vermögen, ggf. in Verbindung mit einer entsprechenden Haftungsbegrenzung wird, wäre allein um des Opferschutzes willens wohl kaum wünschenswert.

2.2.1 Methodische Herangehensweise

Das begleitende rechtliche Gutachten zum ARAIG-Projekt (Hartwig, Martin & Schumacher, 2020) orientierte sich vor diesem Hintergrund an folgenden Fragen: Wie könnten die für die hier untersuchten Assistenzroboter und ihren Anwendungsbereich relevanten Rechtsnormen auf solche Konstellationen angewendet werden? Ergeben sich rechtliche Unklarheiten oder Regelungslücken? Entfalten die Normen ihre intendierte Wirkung weiterhin und kommen sie zu interessengerechten Ergebnissen? Bedarf die Anknüpfung an andere (meist vorgelagerte) menschliche Handlungssituationen auch anderer Regelungen?

Da im Rahmen von ARAIG nicht die Umsetzung eines konkreten Beispielroboters in einem konkreten Arbeitsumfeld untersucht wurde, kann keine abschließende Bestimmung der einschlägigen Regelungen vorgenommen werden. Stattdessen wurden die typischerweise anwendbaren Gesetze abstrakt untersucht. Die Darstellung beschränkte sich dabei soweit auf die Grundsätze der jeweiligen Rechtsgebiete, so dass eine Skizzierung der Wirkmechanismen möglich war und allgemeine Schlussfolgerungen für die Entwicklung und den Einsatz der untersuchten Assistenzroboter gezogen werden konnten.

Dafür wurde zunächst bei den produktsicherheitsrechtlichen Regelungen angesetzt, die die Anforderungen an die Bereitstellung von Assistenzrobotern auf dem Markt regeln. In einem zweiten Schritt wurden die arbeitsschutzrechtlichen Regelungen betrachtet, da sie die typische Verwendung von Assistenzroboter im Arbeitsumfeld adressieren. Weiter wurden die relevanten haftungsrechtlichen Regelungen des Zivilrechts und des Strafrechts untersucht. Gegenstand war außerdem das Datenschutzrecht sowie anschließend das Nichtdiskriminierungsrecht.

2.2.2 Ergebnisse

Die im rechtlichen Gutachten durchgeführte abstrakte Untersuchung der rechtlichen Rahmenbedingungen kommt zu dem Ergebnis, dass das Recht in seiner jetzigen Ausgestaltung hinreichende Ansätze bietet, um die untersuchten Assistenzroboter rechtlich erfassen zu können. Es zeigt sich jedoch ein Trend zur Verlagerung des Schwerpunkts der relevanten Regelungen weg vom Verhaltensrecht, also insbesondere von den Verkehrssicherungspflichten der Techniknutzer, hin zum Technikrecht, also insbesondere dem vorgreifenden Produktsicherheitsrecht und dem nachsorgenden Produkt- und Produzentenhaftungsrecht. Hier spielen besonders technische Normen eine herausragende Rolle: Sie „übersetzen“ die vormals an Menschen gerichteten Verhaltensanforderungen in für die Roboter „umsetzbare“ Regeln, sei es durch technische Anforderungen an die Konstruktion der Roboter oder durch organisatorische Anforderungen an ihr Einsatzumfeld oder ihre Verwendung selbst.

Im Folgenden werden die Erkenntnisse zu den einzelnen Rechtsgebieten kurz zusammengefasst.

Das Produktsicherheitsrecht nach dem Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) als Kern des technischen Sicherheitsrechts ist auf Roboter anwendbar (Klindt & Schucht, 2012, S. 1282). Sein präventiver Ansatz soll verhindern, dass schon keine unsicheren Produkte auf dem Markt bereitgestellt werden, die bei bestimmungsgemäßer

Verwendung oder vorhersehbarer Fehlanwendung eine Gefahr darstellen können. Die entsprechende Regelung findet sich in § 3 ProdSG. Dessen Anforderungen sind für den Hersteller und die Marktakteure relevant, die das Produkt auf dem Markt bereitstellen (Lach & Polly, 2017, S. 4). Die allgemeinen Regelungen des ProdSG, also das besagte Verbot sowie die weiteren Regelungen insbesondere zu Verbraucherprodukten, zur Anbringung des CE-Kennzeichens und zur Marktüberwachung, werden für bestimmte Produktgruppen, wie Maschinen, Spielzeug, Druckgeräte etc. durch die speziellen Produktsicherheitsverordnungen konkretisiert. Diese gehen wie auch wesentliche Teile des ProdSG auf europäische Produktsicherheitsrichtlinien zurück, die in ihnen in deutsches Recht umgesetzt werden (sog. harmonisierter Bereich). Sie verweisen wegen der spezifischen technischen Sicherheitsanforderungen auf die Anhänge der jeweils umgesetzten Richtlinie. Die Produktsicherheitsverordnungen konkretisieren also, was unter einem sicheren Produkt im Sinne des § 3 ProdSG jeweils zu verstehen ist (Lach & Polly, 2017, S. 18). Die Konformität des Produkts mit den jeweiligen Sicherheitsanforderungen ist durch den Hersteller darzulegen. Er kann dabei auf technische Normen zurückgreifen, die die Sicherheitsanforderungen konkretisieren. Handelt es sich um sog. harmonisierte Normen, die als solche im Amtsblatt der EU veröffentlicht wurden, besteht nach § 4 Abs. 2 ProdSG die Vermutung, dass das Produkt der jeweiligen Sicherheitsanforderung gerecht wird. Den technischen Normen kommt damit eine wichtige Rolle bei der Frage zu, ob ein Produkt sicher ist im Sinne der jeweils einschlägigen produktsicherheitsrechtlichen Norm (Menz, 2015, § 4, Rn. 3). Aber auch Produkte, die nicht in den harmonisierten Bereich fallen, müssen trotzdem nach § 3 ProdSG sicher sein. Hier kann der Hersteller gemäß § 5 Abs. 2 ProdSG auch auf die Anwendung bestimmter technischer Normen verweisen, nämlich solcher, deren Fundstellen von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin bekanntgegeben worden sind. Den technischen Normen kommt also im Produktsicherheitsrecht eine ganze entscheidende Rolle zu. Für die rechtmäßige Bereitstellung von Assistenzrobotern auf dem Markt kommt es daher vor allem darauf an, dass der Hersteller deren Konformität mit den Sicherheitsanforderungen nachweisen kann. Diese sind regelmäßig in technischen Normen konkretisiert, auf die das Recht entweder ausdrücklich oder beispielsweise durch Verweis auf den Stand der Technik Bezug nimmt. Das staatlich gesetzte Recht lagert also die genaue Regulierung insoweit in den Bereich der technischen Normung aus. Im Ergebnis ist das Produktsicherheitsrecht also geeignet, die Bereitstellung von Assistenzrobotern sachgerecht zu regeln. Es kommt hier entscheidend auf die technischen Normen an, die den Stand der Technik abbilden und in den ihnen eigenen Verfahren entsprechend weiterentwickelt werden müssen.

Für den Arbeitsschutz sind insbesondere die Regelungen des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) von Bedeutung. Der Arbeitgeber ist insgesamt für die Sicherheit der Beschäftigten verantwortlich. Wenn er also Assistenzroboter im Betrieb einsetzt, hat er diese in der Gefährdungsbeurteilung nach § 5 ArbSchG zu berücksichtigen. Da es sich um Betriebsmittel handelt, sind die konkreten Vorgaben der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) zu beachten. Zusammengefasst werden kann das Ziel der Gefährdungsbeurteilung dahingehend, dass sichergestellt werden soll, dass die jeweiligen Arbeitsmittel – vorliegend also der Roboter – sachgerecht in den betrieblichen Ablauf integriert werden (Kohte, 2015, S. 1417-1419). Die Anforderungen werden wiederum konkretisiert durch die Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS). Im Ergebnis kommt es also auch hier, wie im

Produktsicherheitsrecht, darauf an, dass dem Arbeitgeber zur Bestimmung der sicherheitsrechtlichen Anforderungen an die Verwendung von Assistenzrobotern als Arbeitsmittel entsprechende TRBS, also wieder technische Normen zur Verfügung gestellt werden.

Bei der zivilrechtlichen Haftung ist zwischen der vertraglichen Haftung, der deliktischen und der Produkthaftung zu unterscheiden. Bei der Haftung des Verwenders von Assistenzrobotern für Schäden, die ein Assistenzroboter verursacht, ist sowohl bei der Haftung aus Vertrag als auch bei der deliktischen Haftung insbesondere die Bestimmung der Verkehrssicherungspflicht schwierig. Hier muss ermittelt und vom Geschädigten dargelegt und bewiesen werden, ob der Verwender des Roboters seine Verkehrssicherungspflichten verletzt hat, um eine Haftung für fahrlässiges Handeln nach § 276 Abs. 2 BGB zu begründen. Der Verwender muss zudem erkannt haben können, dass er eine entsprechende Verkehrssicherungspflicht bei Einsatz des Roboters hat und muss auch in der Lage gewesen sein, dieser nachzukommen (Lorenz, 2020, Rn. 31). Es kommt darauf an, ob der Verwender erkennen konnte, dass er eine Gefahrenquelle schafft und dass er diese kontrollieren kann und muss. Dabei kann nicht allein die Verwendung von Assistenzrobotern das Bestehen einer Gefahr nahelegen, auch wenn sie potenziell z. B. bei Kollisionen Verletzungen verursachen können. Dies würde zu einer Kriminalisierung des Einsatzes von Robotern führen (Günther, 2016, S. 69). Es kommt vielmehr auf den Einzelfall an. Ein anderer Aspekt hingegen betrifft die Frage der Zurechenbarkeit des „Handelns“ des Assistenzroboters zu seinem Verwender: Ist der Roboter ein Erfüllungsgehilfe im Sinne des § 278 BGB oder kann § 278 BGB analog auf Roboter angewendet werden, sodass der Verwender das „Verschulden“ des Roboters zu vertreten hat? Hiergegen wird eingewendet, dass § 278 BGB auf ein willensgetragenes Verhalten des Erfüllungsgehilfen abstellt, ein Roboter aber keinen Willen bilden könne, das Verhalten des Roboters vielmehr auf seiner Programmierung und damit auf dem Willen des Programmierers beruhe (Günther & Böglmüller, 2017, S. 53-55). Bei der deliktischen Haftung nach § 823 BGB finden sich entsprechende Überlegungen bei der Frage, ob der Verwender für das schädigende „Verhalten“ des Assistenzroboters nach § 831 BGB haftet, da der Roboter als Verrichtungsgehilfe angesehen werden könnte. Das wird wieder mit dem Argument abgelehnt, dass der Verrichtungsgehilfe einen Handlungswillen bilden können muss, was der Roboter nicht kann (Günther, 2016, S. 135).

Der Hersteller des Assistenzroboters kann dem Geschädigten nach den Grundsätzen der Produzentenhaftung aus § 823 Abs. 1 BGB sowie nach dem Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG) haften. Die Produzentenhaftung setzt dabei einen Konstruktions-, Fabrikations-, Instruktions- oder Produktbeobachtungsfehler voraus. Gleiches gilt für die Haftung nach § 1 ProdHaftG. Nach dem ProdHaftG besteht jedoch keine Produktbeobachtungspflicht des Herstellers. Zudem gilt nach § 1 Abs. 2 Nr. 5 ProdHaftG ein Ausschluss der Haftung für solche Produktfehler, die nach dem Stand der Wissenschaft und Technik in dem Zeitpunkt, in dem der Hersteller das Produkt in den Verkehr brachte, nicht erkannt werden konnten. Im Zusammenhang mit neuartiger Technologie, wie sie in einigen untersuchten Assistenzrobotern der ARA1-Projekte zum Einsatz kommt, sind Fälle entsprechender sog. Entwicklungsrisiken denkbar. Im Ergebnis ist das Recht der Produkthaftung auf die hier untersuchten Assistenzroboter jedoch ohne weiteres anwendbar und kann zu sachgerechten Ergebnissen kommen.

Im Strafrecht kommt sowohl eine Strafbarkeit des Verwenders als auch des Herstellers des Roboters in Betracht, wenn bei dem Einsatz des Roboters ein Mensch zu Schaden

kommt. Da das Strafrecht stets an ein menschliches Verhalten anknüpft, muss die Schädigung letztlich auf ein solches zurückzuführen sein, die Suche nach der Schadensursache kann also nicht bei dem Roboter aufhören. Der Verwender kann durch den Einsatz des Roboters in eine Garantenstellung kommen, wenn der Roboter nach Aktivierung „autonom“ agiert (Günther, 2016, S. 208). Er muss dann verhindern, dass die Schädigung eintritt. Tut er dies nicht, muss er sich ein strafrechtlich relevantes Unterlassen nach § 13 Abs. 1 StGB vorwerfen lassen. Hinsichtlich des subjektiven Tatbestandes wird häufig eine Fahrlässigkeit des Verwenders in Betracht kommen. Es kommt also wieder darauf an, dass er die im Verkehr erforderliche Sorgfalt außer Acht gelassen hat. Insoweit ist wieder im Einzelfall und ggf. anhand technischer Normen zu ermitteln, welche Sorgfaltspflichten der Verwender jeweils hatte (Günther, 2016, S. 212; Eschelbach, 2019, § 220 Rn. 9). Der Hersteller kann ebenfalls Garant im Sinne des § 13 Abs. 1 StGB werden, wenn er durch Inverkehrbringen des Roboters eine Gefahrenquelle schafft. Unterlässt er es, Maßnahmen zur Beseitigung bestehender Risiken zu treffen, die erst nach Inverkehrbringen offenbar wurden, so kann er ebenfalls durch Unterlassen strafbar sein (Günther, 2016, S. 218). Dem Hersteller müsste dann, sofern kein Vorsatz vorliegt, eine Sorgfaltspflichtverletzung vorzuwerfen sein, um den Fahrlässigkeitsvorwurf zu begründen. Wie auch bei der zivilrechtlichen Produkthaftung kann hier auf Pflichtverletzungen bei Konstruktion, Fabrikation, Instruktion und bei der Produktbeobachtung abgestellt werden (Günther, 2016, S. 222; Schuster, 2019, S. 6-8).

Sofern der Assistenzroboter mit Sensoren ausgestattet ist, muss der Datenschutz nach Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) bzw. Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) berücksichtigt werden, wenn dabei personenbezogene Daten verarbeitet werden. Insbesondere bei dem Einsatz von Videokameras stellen sich dabei Fragen der Zulässigkeit. Denn im öffentlichen Raum kann z. B. nicht über eine Einwilligung der betroffenen Person die Zulässigkeit der Datenverarbeitung erreicht werden. Es könnte daher geboten sein, Systeme einzusetzen, die eine Personenerkennung von technischer Seite ausschließen, indem die erfassten Personen anonymisiert werden, also keine personenbezogenen Daten erhoben werden (*Privacy by Design*, vgl. Steckler & Krempel, 2020).

Die grundrechtlichen Gleichbehandlungsgebote werden durch einfachgesetzliche Diskriminierungsverbote konkretisiert. Hier ist vor allem das Allgemeine Gleichbehandlungsgesetz (AGG) von Bedeutung. Da die hier untersuchten Assistenzroboter jedoch keine rechtlich relevanten Entscheidungen treffen, also auf Rechtsverhältnisse einwirken, entfällt ein wesentlicher Teil des Anwendungsbereichs des AGG. Allerdings kann bei Unterstützung des Menschen bei einer rechtlich relevanten Entscheidung im Massengeschäft durch den Assistenzroboter dieser in den Anwendungsbereich des § 19 AGG rücken. Denn auch diese mittelbare Beeinflussung der Entscheidung kann eine verbotene Diskriminierung begründen.

Bei der Konstruktion des Assistenzroboters für den Einsatz im öffentlichen Sektor ist zudem auf die Vorgaben des Gesetzes zur Gleichstellung von Menschen mit Behinderungen (BGG) zu achten. So sind z. B. Assistenzroboter, die von Trägern der öffentlichen Gewalt eingesetzt werden, nach § 7 Abs. 1 und 2 BGG barrierefrei zu konstruieren.

2.2.3 Ausblick

Eine Untersuchung konkreter Anwendungsbeispiele könnte eine genauere Analyse der hier betrachteten Gesetze erlauben. Andererseits sind bei der hier angestellten abstrakten Untersuchung solche Systeme noch nicht berücksichtigt worden, die über einen hohen Grad an Veränderbarkeit im Betrieb verfügen („weiterlernende Systeme“ oder „künstliche Intelligenz/KI“) oder in sicherheitsrelevanter Weise mit anderen Systemen vernetzt sind. Hier stellen sich insbesondere im präventiven Technikrecht grundlegende Fragen. Aber auch im Haftungsrecht kann das Schuldprinzip in bestimmten Konstellationen an seine Grenzen stoßen. Hier setzt sich auf der rechtlichen Ebene das eingangs dargestellte Problem der Ethik fort, dass eine Gesamtbewertung der Technikfolgen dann schwierig ist, wenn das zu bewertende System aus vielen Komponenten besteht, die aus sicherheitstechnischer Sicht einzeln betrachtet werden können.

Für solche Systeme wird zu untersuchen sein, wie mit fortschreitender Automatisierung und Vernetzung das bestehende Recht angepasst werden muss. Dabei zeigt die vorliegende Untersuchung bereits, dass Begriffe wie „Autonomie“ oder „Vernetzung“ selbst im Recht keinen Niederschlag finden. Derartige Systeme müssen daher anders und genauer beschrieben werden. Rechtliche Probleme können sich aus Eigenschaften wie Opazität, dezentraler Vernetzung, mangelnder Robustheit und hoher Sicherheitsrelevanz des Systems ergeben. Solche technischen Eigenschaften lassen sich, anders als Schlagwörter wie „Autonomie“ oder „KI“, in rechtlich normierten Anforderungen wiederfinden und können auf gesetzlicher Ebene oder auf Ebene der technischen Normen adressiert werden. Es kommt dann darauf an, auf der geeigneten Regelungsebene die erforderlichen Regeln zu formulieren, um derartige Systemeigenschaften rechtlich handhabbar zu machen, um ein hohes Sicherheitsniveau zu gewährleisten und gleichzeitig einen technologieneutralen und innovationsfreundlichen Regelungsrahmen zu schaffen.

2.3 Literaturverzeichnis

Beer, J. M., Fisk, A. D., Rogers, W. A. (2014). Toward a Framework for Levels of Robot Autonomy in Human-Robot Interaction. *Journal of Human-Robot Interaction*, 3(2), 74. <https://doi.org/10.5898/JHRI.3.2.Beer>

Brey, P. (2014). From Moral Agents to Moral Factors: The Structural Ethics Approach. In P. Kroes & P.-P. Verbeek (Hrsg.), *The Moral Status of Technical Artefacts* (Bd. 17, S. 125–142). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7914-3_8

Brooks, R. A. (1991). Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47(1–3), 139-159. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(91\)90053-M](https://doi.org/10.1016/0004-3702(91)90053-M)

Buxbaum, H.-J. (Hrsg.) (2020). *Mensch-Roboter-Kollaboration*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28307-0>

Dettling, H.-U., Krüger, S. (2019). Erste Schritte im Recht der Künstlichen Intelligenz. *MMR Zeitschrift für IT-Recht und Recht der Digitalisierung* (S. 211-219).

Eschelbach, R. (2019). In: B. v. Heintschel-Heinegg (Hrsg.), *Beck'scher Online-Kommentar StGB*. C.H. Beck.

- Gransche, B., Manzeschke, A. (Hrsg.) (2020). *Das geteilte Ganze: Horizonte Integrierter Forschung für künftige Mensch-Technik-Verhältnisse*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26342-3>
- Gransche, B., Shala, E., Kimpeler, S., Hubig, C., Alpsancar, S., Harrach, S. (2014). *Wandel von Autonomie und Kontrolle durch neue Mensch-Technik-Interaktionen*. Fraunhofer ISI.
- Grunwald, A. (2010). *Technikfolgenabschätzung – eine Einführung*. 2. Auflage, edition Sigma.
- Grütmacher, M. (2016). Die deliktische Haftung für autonome Systeme – Industrie 4.0 als Herausforderung für das bestehende Recht?. *CR Computer und Recht* (S. 695-698).
- Günther, J.-P. (2016). *Roboter und rechtliche Verantwortung*. Herbert Utz Verlag.
- Günther, J., Böglmüller, M. (2017). Künstliche Intelligenz und Roboter in der Arbeitswelt. *BB Betriebsberater* (S. 53-58).
- Hartwig, M., Martin, B., Schumacher, O. (2020). *Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von autonomen Robotern in Assistenzfunktionen*. https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2020/02/20200211_Gutachten_Rechtliche-Rahmenbedingungen_Assistenzroboter.pdf
- Hergesell, J., Maibaum, A., Meister, M. (2019). *Genese und Folgen der »Pflegerobotik«*. Juventa Verlag.
- Johnson, D. G. (2020). *Engineering ethics: Contemporary and enduring debates*. Yale University Press.
- Klindt, T. & Schucht, C. (2012). Internationales, europäisches und nationales Technikrecht. In: D. Ehlers, M. Fehling & H. Pünder, *Besonderes Verwaltungsrecht Bd. 1*. C.F. Müller
- Kohte, W. (2015). Arbeitsschutz in der digitalen Arbeitswelt. *NZA Neue Zeitschrift für Arbeitsrecht* (S. 1417-1424).
- Lach, S., Polly, S. (2017). *Produkt-Compliance*. Springer-Gabler Verlag.
- Liggieri, K., Müller-Känel, O. (2019). *Mensch-Maschine-Interaktion: Handbuch zu Geschichte – Kultur – Ethik*. J.B. Metzler.
- Lohmann, M. F. (2017). Ein europäisches Roboterrecht – überfällig oder überflüssig? *ZRP Zeitschrift für Rechtspolitik*.
- Lorenz, S. (2020). In: H. G. Bamberger, H. Roth, W. Hau & R. Poseck (Hrsg.), *Beck'scher Online-Kommentar BGB*. C.H. Beck.
- Menz (2015). In: T. Klindt, *Produktsicherheitsgesetz Kommentar*. C.H. Beck.

Müller, R., Franke, J., Henrich, D., Kuhlenkötter, B., Raatz, A., Verl, A. (2019). *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. Hanser.

Onnasch, L., Roesler, E. (2020). A Taxonomy to Structure and Analyze Human–Robot Interaction. *International Journal of Social Robotics*. <https://doi.org/10.1007/s12369-020-00666-5>

Remmers, P. (2020a). Ethische Perspektiven der Mensch-Roboter-Kollaboration. In H.-J. Buxbaum (Hrsg.), *Mensch-Roboter-Kollaboration* (S. 55–68). Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-28307-0_4

Remmers, P. (2020b). Would moral machines close the responsibility gap? Reflections on autonomous artificial agents. In B. Beck & M. Kühler (Hrsg.), *Technology, Anthropology, and Dimensions of Responsibility* (S. 133-145). J.B. Metzler.

Remmers, P., Schweidler, P. (2020). *Mensch, Roboter und Autonomie – Bereicherung versus Entmündigung in der Arbeit durch autonome Maschinen* [Unveröffentlichtes Manuskript]. Berlin.

Schuster, F. P. (2019). Strafrechtliche Verantwortung der Hersteller beim automatisierten Fahren. *DAR Deutsches Autorecht*.

Steckler, B., Krempel, E. (2020). »Privacy by Design« im Dialog von Recht und Technik. In B. Gransche & A. Manzeschke (Hrsg.), *Das geteilte Ganze* (S. 71-92). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-26342-3_4

3 Anforderungen an die Gestaltung von Servicerobotik aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive

Alina Tausch, Britta Kirchhoff, Lars Adolph

Projektpartner: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

3.1 Servicerobotik und ihr Einsatz in Arbeitssystemen

Der Einsatz von servicerobotischen Anwendungen, wie sie auch in den Projekten zur Ausschreibung „Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten“ entwickelt werden, erfordert im Arbeitskontext besondere Sensibilität und geht mit einer Reihe von Gestaltungsanforderungen einher. Ziel dieses Beitrags ist es, die wesentlichen Gestaltungsanforderungen speziell an Servicerobotik überblicksartig aufzuzeigen und zu vertiefen. Sie sollen ForscherInnen, SystementwicklerInnen und AnwenderInnen eine Perspektive darauf bieten, was erforderlich ist, um Servicerobotik erfolgreich in Arbeitssystemen einsetzen zu können. Gleichzeitig werden die entwickelten Gestaltungsanforderungen in einen arbeitswissenschaftlichen Rahmen eingebettet, indem wir im Beitrag aufzeigen, wie Robotik in Arbeitssystemen eingesetzt werden kann.

Zur Abgrenzung des Themenfelds nutzen wir den Begriff des Serviceroboters nach der DIN EN ISO 8373 als einen Roboter, der für Menschen oder Ausstattung nützliche Aufgaben erledigt und nicht im industriellen Umfeld Anwendung findet. Anforderung dafür ist ein gewisser Grad an Autonomie, also die Fähigkeit, Aufträge ohne menschliche Intervention auf Basis des aktuellen Zustands und sensorischer Wahrnehmung auszuführen (Norm DIN EN ISO 8373). Diese Definition ist hilfreich für unsere Betrachtungsperspektive, da sie generisch genug ist, um alle Use Cases aus den Projekten und beispielsweise die im Kontext der Instandhaltung betrachteten Fahrerlosen Transportsysteme mit einzubeziehen. Der Begriff der Assistenzrobotik ist hier zu eng gefasst, beschreibt er doch in der Regel die Unterstützung von zu Pflegenden oder eine soziale Interaktion. Daher nutzen wir den Begriff der Serviceroboter als Überbegriff, der in entsprechenden Fällen durch die Begriffe der Assistenz- oder sogar Pflegerobotik spezifiziert werden kann, um mit unseren Gestaltungsanforderungen eine möglichst große Bandbreite von Systemen einschließen zu können.

Robotik im Servicebereich ist, obwohl gerade im außerhäuslichen Bereich noch nicht weit verbreitet, ein Themenfeld mit einer Vielzahl verschiedener Anbieter und Anwendungen, in dem Forschung und Einsatz häufig parallel laufen. Zusätzlich ist es erforderlich, dass bestehende Systeme laufend auf die komplexen Anforderungen einer häufig unstrukturierten Umgebung angepasst werden müssen und stetig weitere Entwicklung erfordern, um ihren Einsatzbereich zu erweitern. Die International Federation of Robotics sieht gar die Grenze zwischen Industrie- und Servicerobotik verschwimmen und neue Nutzungskonzepte entstehen (Müller, 2019). Für die Betrachtungen zu Robotik, die wir im Rahmen der Arbeit der Bundesanstalt für

Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) durchführen, ist es gerade diese allgemeinere Perspektive auf ganz verschiedenartige Systeme, die einen Mehrwert bringt. Unser Ziel ist es, möglichst verallgemeinerbare Aussagen darüber zu machen, wie sich Servicerobotik auf Arbeitssysteme auswirkt, ohne dabei spezifische Roboter ein- oder auszuschließen.

Denn was bei Entwicklung und Einsatz von Servicerobotik häufig übersehen wird, ist, dass solche Roboter nicht nur den direkten Nutzer beeinflussen, sondern ganze Systeme, die um sie herum bestehen. In erster Linie wird der Fokus immer darauf liegen, einen für den direkten Dienstleistungsempfänger nützliches und angenehmes Gerät zu schaffen. Darüber hinaus ist es jedoch auch von entscheidender Bedeutung, Roboter zu entwickeln, die in der Lage sind, sich sicher und menschengerecht in vorhandene oder neu entstehende Arbeitssysteme zu integrieren und über die direkten Dienstleistungsempfänger hinaus auch andere Anspruchsgruppen und deren Bedürfnisse sinnvoll zu berücksichtigen. Nur so kann es letztlich gelingen, Serviceroboter auch nutzbringend in Kontexten wie der stationären und ambulanten Pflege, aber auch in weiteren Dienstleistungskontexten wie Hotellerie oder Einzelhandel, einzusetzen.

3.2 Forschung der BAuA zu Servicerobotik im Arbeitskontext

Um die Bedeutung der Berücksichtigung von Arbeitssystemen bei Gestaltung und Einsatz von Servicerobotern bewusst zu machen, hat die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) im Rahmen von ARAIG untersucht, welche Personengruppen, speziell im Pflegekontext, vom Einsatz von Servicerobotik berührt sind. Um diese Anspruchsgruppen herum haben wir ein soziotechnisches Modell der Servicerobotik im Pflegekontext (ARA-Sys, siehe Abbildung 3.1) entwickelt (Veröffentlichung des Modells in Tausch et al., 2020). Es macht die wichtigen Akteure und ihre organisatorischen Verbindungen, Abhängigkeiten und Kommunikationswege untereinander sichtbar und zeigt damit auf, wie vielfältig die Auswirkungen des Einsatzes von Servicerobotern sein können.

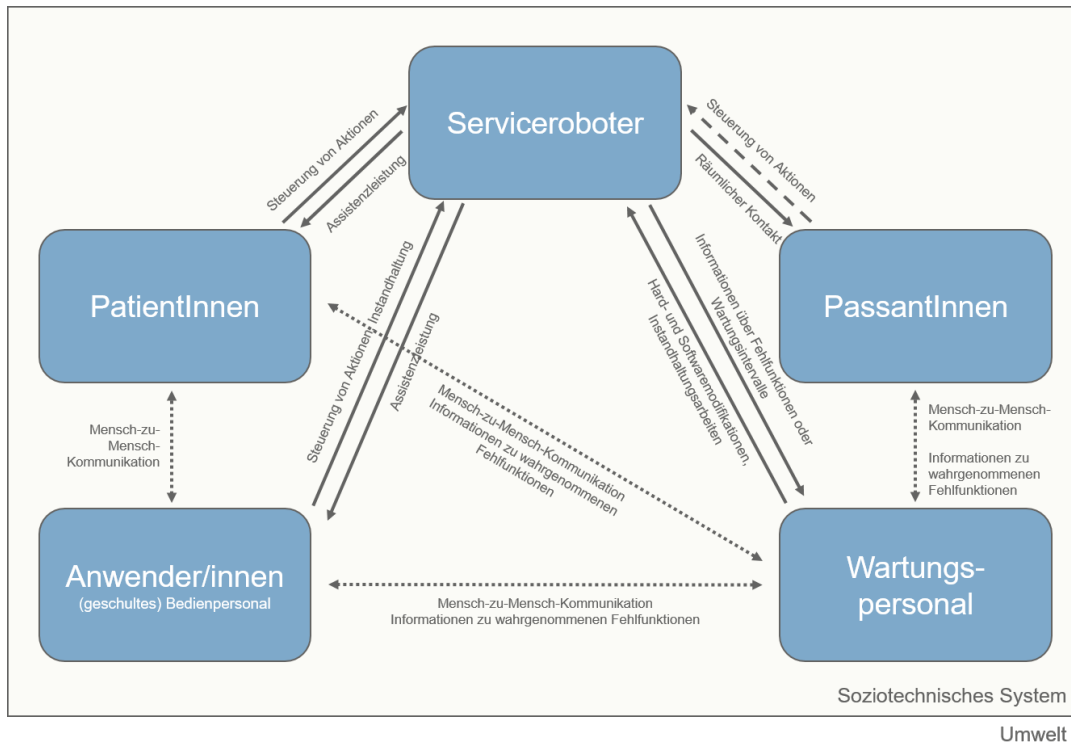


Abbildung 3.1: ARA-System – Soziotechnisches Systemmodell der Servicerobotik im Pflegekontext

Um eine erste, vornehmlich literaturbasierte, Version dieses Modells zu verbessern und es greifbar für die Anwendung in Einzelfällen zu machen, wurden Interviews mit Anwendern von Servicerobotik im Pflegekontext geführt. Die Interviews, die sich mit verschiedenen Formen Fahrerloser Transportsysteme und der Therapierobbe *Paro* befassen, zeigen deutlich auf, wie verschieden Systeme rund um einen Serviceroboter aussehen können (mehr dazu siehe Tausch, Kirchoff & Adolph, 2020). Zentrale Erkenntnis der Interviews war, dass ein Serviceroboter nicht nur mit dem direkten Dienstleistungsempfänger in Kontakt kommt und dass daher bei der Einsatzgestaltung unterschiedliche Kontaktgruppen mit ihren verschiedenen Qualifikationsniveaus und Erfahrungen berücksichtigt werden müssen. Dies ist umso wichtiger für Systeme, die im (halb-)öffentlichen Raum eingesetzt werden und auch mit Passanten in Kontakt kommen können, die keine Ahnung vom Roboter, seiner Funktionsweise und seinen Aufgaben haben. Gleichzeitig zeigen die Interviews, wie unterschiedlich gut Beschäftigte auf den Einsatz von Servicerobotik vorbereitet sind, dass es bei vielen Beschäftigtengruppen keinerlei formale Qualifikation für die Zusammenarbeit mit Robotern gibt und wie wertvoll andererseits ihre Einbindung in den Einsatz eines Serviceroboters sein kann.

3.3 Ableitung von Gestaltungsanforderungen

Unsere Aufgabe als Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin ist es folglich, die allgemeinen und spezifischen Auswirkungen von Servicerobotik auf Arbeitssysteme zu beobachten, und daraus Schlüsse für eine menschengerechte System- und Einsatzgestaltung im Arbeitskontext zu ziehen. Wo immer spezifische Erkenntnisse zu Auswirkungen bis dato fehlen, bedienen wir uns der Forschung und Erfahrung aus verwandten Bereichen, die unter entsprechender Anpassung an den Kontext des Service bzw. die Spezifikation von Technikfolgen auf die Auswirkungen eines Robotereinsatzes übertragen werden. Das erlaubt auch eine Steuerung

technischer Entwicklungen in Richtung eines sicheren, gesunden und menschengerechten Einsatzes, sowohl im Sinne von Vorlaufforschung als auch begleitend zum zunehmenden Technologieeinsatz. Daher haben wir *12 Anforderungen an die Gestaltung von Servicerobotik* formuliert. Diese Anforderungen spiegeln sowohl unser als auch das Verständnis von Experten für Mensch-Roboter-Interaktion für einen sinnvollen und menschengerechten Einsatz von Servicerobotik wider.

Im Folgenden wird zunächst die Methodik erläutert, durch die die Anforderungen entstanden sind. Kapitel 3.4 enthält eine Liste mit der jeweiligen Kurzform der Anforderungen, die im folgenden Abschnitt einzeln näher erläutert werden.

3.3.1 Verwandte Arbeiten

Als Grundlage für die Entwicklung von Anforderungen an Servicerobotik referenzieren wir die Publikation der BAuA von Wischniewski et al. (2019), die sieben Thesen zur Mensch-Roboter-Interaktion entwickelt haben. Diese Thesen repräsentieren Erwartungen an die künftige Entwicklung von MRI und normativ gerichtete Entwicklungsbedarfe aus Sicht der Ergonomie, allerdings mit dem Fokus eher auf industrielle Anwendungskontexte. Sie haben Bedeutung für die weitere Diskussion des Themas in der deutschen Robotik-Community (siehe Buxbaum & Häusler, 2020), und wurden unter anderem beim Ladenburger Diskurs „Mensch-Roboter-Kollaboration“ im Sommer 2019 unter Experten diskutiert.

Aus diesem Diskurs entstand im Nachgang, parallel zu unserem Ansatz, ein Set von Thesen zur zukünftigen Gestaltung der Mensch-Roboter-Interaktion mit den „Perspektiven Ergonomie, Technik, Wirtschaftlichkeit, Psychologie, Arbeitswissenschaft und Ethik“ (Buxbaum, 2020 S.308). Die Thesensammlung will als Momentaufnahme und Forschungswegweiser verstanden werden und ist inspiriert von den zuvor beschriebenen Thesen der BAuA. Die Rezeption dieser Thesen im Sammelband „Mensch-Roboter-Kollaboration“ zeigt die Relevanz, sich auf einer Metaebene mit Forschungs- und Entwicklungsbedarfen im Bereich der MRI zu befassen und sowohl Erkenntnislücken als auch Perspektiven aufzuzeigen.

Gleichsam wählen beide thesenhaften Ansätze einen recht breiten Blickwinkel auf die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter, und die Thesen der BAuA haben ihren Ursprung vor allem in der Betrachtung industrieller Anwendungsszenarien. Eine Sichtung dieser Thesen ergab, dass sich einige sehr gut auf den Servicebereich übertragen lassen, andere eine Konkretisierung erfordern oder für den Servicebereich nicht im gleichen Maße zutreffend sind.

Die Thesensätze und unsere ergänzende Betrachtung von Gestaltungsanforderungen der Servicerobotik sind nicht als Konkurrenz zueinander stehende Produkte zu betrachten, sondern als teilweise aufeinander aufbauende Sets von Ideen für Forschung und Praxis, die jeweils in sich und auch in Kombination miteinander Gültigkeit besitzen. Die hier vorgestellten Gestaltungsanforderungen verstehen sich als Erweiterung und Spezifikation der allgemeinen Anforderungen für MRI für den Servicebereich. Durch unseren iterativen Entwicklungsansatz konnten wir viele verschiedene Blickwinkel mit einbeziehen und zu einer hinreichend vielfältigen und gleichzeitig spezifischen, fundierten Aufstellung von Anforderungen gelangen.

3.3.2 Vorgehen: Expertenbasierte Formulierung von Anforderungen

Die Thesen von Wischniewski et al. (2019) wurden in einem ersten Schritt sprachlich an den Kontext der Servicerobotik angepasst. Auf diese Anpassung folgte eine erste Diskussion mit Experten: Die Thesen wurden in einem Metakonsortialtreffen den anwesenden Projektpartnern aus der Fördermaßnahme „Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten“ des BMBF präsentiert. Hier konnten sie in einer moderierten Diskussion besprochen, kommentiert und ergänzt werden. Kritische Aspekte wurden ebenso aufgenommen wie Zustimmung und Ideen für neue Thesen, die von der bisherigen Aufstellung abweichen.

Auf Basis der Ergebnisse dieser Diskussion wurden die Thesen überarbeitet und im Juni und Juli 2019 in einer Online-Diskussion ExpertInnen aus dem Bereich Service-Robotik zur Verfügung gestellt. Über die Diskussions-Plattform *discuto* konnten die letztlich acht aktiven TeilnehmerInnen die Thesen kommentieren, was auch umfassend genutzt wurde, sowie ein Zustimmungs- bzw. Ablehnungs-Urteil abgeben.

Aus den hier erfolgten Kommentaren und Beurteilungen wurde eine Liste an weithin akzeptierten Aussagen über die Gestaltung von Servicerobotik erstellt. Diese Liste wurde zunächst sprachlich überarbeitet. Nachdem sowohl innerhalb der durch ARAIG begleiteten Projekte neue Erkenntnisse erzielt wurden als auch die oben bereits erwähnten Interviews mit Robotik-Anwendern geführt wurden, wurden im weiteren Projektverlauf die Thesen nochmals überarbeitet. Sie wurden auf Ihre Passung zu bisherigen Forschungserkenntnissen hin überprüft und das Profil nochmals in Richtung Servicerobotik hin geschärft.

Das Ergebnis dieses iterativen Prozesses ist eine Liste von 12 spezifischen Anforderungen an die Gestaltung von Servicerobotik, die zunächst präsentiert und im folgenden Abschnitt näher erläutert werden sollen.

3.4 12 Anforderungen an die Gestaltung von Servicerobotik

1. Für die Bildung eines adäquaten Situationsbewusstseins müssen Kontaktpersonen über ein **mentales Modell** des Roboters verfügen.
2. **Bedieneigenschaften** des Roboters müssen sich an die Voraussetzungen und Bedürfnisse der Bediener **anpassen**.
3. **Aktionen** von Servicerobotern müssen **transparent** und vorhersehbar gestaltet sein.
4. Interfaces von Servicerobotern müssen in hohem Maße **gebrauchstauglich** und interaktionsförderlich gestaltet werden.
5. Entwickler und Systemintegratoren müssen hinsichtlich **gebrauchstauglicher Gestaltung** von Servicerobotern und ihrer Peripherie befähigt werden.
6. Es braucht **flexible Sicherheitstechnik**, um Flexibilitätspotenziale der Servicerobotik zu heben.
7. **Aufgabenzuteilung** muss ad hoc und flexibel durch den Bediener möglich sein.

8. Es braucht Interaktionsprinzipien für den **Umgang mit unvorhergesehenen Situationen**, die mit den Fähigkeiten des Roboters nicht zu bewältigen sind.
9. Auswirkungen von Servicerobotern auf **Arbeitssysteme** müssen betrachtet werden.
10. Durch den Einsatz von Servicerobotern können **neue Aufgaben** geschaffen werden, die einer Betrachtung bedürfen.
11. Der **Aufgabenbegriff** muss diskutiert werden und eignet sich ggf. nicht als zentrierendes Systemelement.
12. Die theoretisch basierten **Interaktionsformen** zwischen Mensch und Roboter müssen für den Servicebereich konkretisiert und ggf. ausgebaut werden.

3.5 Erläuterungen zu den Anforderungen

(1) Gerade für Servicerobotik ist es essentiell, dass die Personen, die mit ihr in Kontakt kommen, über ein adäquates mentales Modell des Roboters verfügen. Anders als in der Industrie, wo nur einzelne, spezifisch für den Umgang mit einem Roboter geschulte Personen mit ihm in Interaktion treten, ist von Servicerobotik häufig ein größerer Personenkreis betroffen, der auch nicht immer spezifisch auf Kontaktsituationen vorbereitet wurde (wie zum Beispiel PassantInnen im Krankenhaus, die einem fahrerlosen Transportsystem über den Weg laufen). Hier ist es also umso wichtiger, dass potenzielle Kontaktpersonen eine hinreichend konkrete Ahnung davon haben, was sie vom Roboter potenziell an Verhaltensweisen zu erwarten haben (wird er zum Beispiel ausweichen, wenn man sich ihm nähert): Dieser Umstand lässt sich mit dem Begriff Situationsbewusstsein umschreiben, worunter die Wahrnehmung, Analyse und Entwicklung von Umweltfaktoren verstanden wird (Endsley, 2016). Dieser Gedankenprozess wird unterstützt durch Erinnerungen aus dem Langzeitgedächtnis und eine solide Situationseinschätzung (Rauch, Gradenegger, & Krüger, 2009).

Das Situationsbewusstsein wird unterstützt durch sogenannte mentale Modelle. Grundsätzlich sind damit Wissensstrukturen gemeint, die Individuen dabei helfen, mit ihrer Umgebung zu interagieren, Entscheidungen zu treffen und Situationen zu bewerten (Mathieu, Heffner, Goodwin, Salas, & Cannon-Bowers, 2000).

Die Herausbildung einer solchen, die Realität widerspiegelnden und damit validen Wissensstruktur kann durch die transparente Übermittlung von Informationen durch den Roboter unterstützt werden, aber auch durch Erfahrungslernen und spezifische Einweisungen. Gerade, wenn Serviceroboter in (halb-) öffentlichen Räumen eingesetzt werden und Kontakt zu vielen unvorbereiteten Personen haben, braucht es innovative Lösungen, um schnell und unkompliziert die Bildung eines adäquaten mentalen Modells zu unterstützen. Dies erleichtert den Personen die adäquate Bewertung der Situation, wie zum Beispiel die Einschätzung der vom Roboter ausgehenden Gefahr, und damit auch den Umgang mit Robotern, da Funktionalität und ihre Grenzen realistischer eingeschätzt werden können und entsprechend darauf reagiert werden kann.

(2) Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass eine Vielzahl verschiedener Personen mit Servicerobotern interagiert, ist das Eingehen auf die verschiedenen

Voraussetzungen, die diese Personen mitbringen, essentiell. Das Grundprinzip der menschenzentrierten Gestaltung – also die Nutzung eines Prozesses, der die Bedürfnisse und Fähigkeiten derjenigen mit einbezieht, für die die Designs gemacht sind (Norman, 2013) – sollte in der Entwicklung robotischer Serviceanwendungen zentral sein. Daher müssen sich die Bedieneigenschaften des Roboters an das Qualifikations- und Kompetenzniveau und an die Bedürfnisse der Nutzergruppen anpassen. So zeigen zum Beispiel Mettler, Sprenger und Winter (2017), dass sich bei Beschäftigten in der Pflege fünf Untergruppen bilden lassen, die jeweils unterschiedliche Anforderungen und Ergebnisse durch die Nutzung von Servicerobotik bei ihrer Arbeit erwarten. Um diese unterschiedlichen Nutzergruppen gleichermaßen von der Nutzung von Robotern profitieren zu lassen, müssen sich deren Bedieneigenschaften ihnen anpassen.

Vorteile dieser Anpassung zeigen sich beispielsweise bei Fasola und Mataric (2010), die zeigen können, dass eine Adaption eines sozial interaktiven Roboters an das Kompetenzniveau des Nutzers zu einer als angenehmer wahrgenommenen Interaktion führt. Was für die Unterschiede zwischen Individuen gilt, sollte auch übertragbar sein auf die Unterschiede zwischen Nutzergruppen: Die Interaktion wird angenehmer, je besser sich die Bedienbarkeit des Roboters an die Voraussetzungen der Gruppe anpasst.

Gerade im Servicekontext bedeutet das, häufig weitgehend unerfahrene und höchstens grundlagengeschulte Personen zu befähigen, mit einem Roboter zu arbeiten und ihn für die eigenen Bedarfe einzusetzen. Da dies nicht immer über eine Qualifikation der Personen von statten gehen kann (zum Beispiel, wenn es sich um dem Roboter lediglich sporadisch begegnende PassantInnen handelt), ist es wichtig, bei der Robotergestaltung darauf zu achten, dass diese die Nutzung durch verschiedene Personengruppen erlaubt, unabhängig von deren Vorwissen.

(3) Insbesondere bei zunehmend autonomen Servicerobotern ist sicherzustellen, dass die Aktionen des Roboters für den Menschen transparent und nachvollziehbar sind. Für eine reibungslose Interaktion zwischen Mensch und Roboter muss für eine positive Wahrnehmung und Verständnis für die Handlungsweisen des Systems gesorgt werden. Anderenfalls droht eine negative, misstrauische und ablehnende Haltung gegenüber dem Roboter (Lange & Frommer, 2011; Paul, Arkin, Aksaray, Roy, & Howard, 2018; Weiss, Igelsböck, Wurhofer, & Tscheligi, 2011).

Zur Erhöhung der Vorhersagbarkeit von Roboterverhalten und damit zur Erhöhung von Nachvollziehbarkeit helfen beispielsweise eine erwartungskonforme Bewegungsplanung oder die Signalisierung von möglichen Interaktionen und auszuführenden Aktionen. Der Begriff des Signalgebers (engl.: signifier) beschreibt jede Art von wahrnehmbarem Hinweis, der dem Benutzer adäquates Verhalten signalisiert (Norman, 2013). Das können zum Beispiel auf dem Roboterkopf angezeigte Augen sein, deren Blickrichtung signalisiert, in welche Richtung der Roboter fahren wird, um dem Menschen das Ausweichen zu erleichtern.

(4) Die gebrauchstaugliche und interaktionsförderliche Gestaltung von Interfaces ist in diesem Kontext besonders wichtig. Einerseits kann so auf die verschiedenen Bedürfnisse eingegangen werden, andererseits eröffnet eine transparente Darstellung nützlicher Informationen einen positiven Mehrwert für die Interaktion mit dem System. Grundlegend hierfür ist die Norm EN ISO 9241 (Norm DIN EN ISO 9241-110:2006) zu

Grundsätzen der Dialoggestaltung in der Mensch-System-Interaktion. Sie hält sieben Prinzipien bereit, die bei der Entwicklung von Benutzerschnittstellen von entscheidender Bedeutung sind, um typische Nutzungsprobleme zu vermeiden: Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Lernförderlichkeit, Steuerbarkeit, Fehlertoleranz und Individualisierbarkeit. Das Prinzip der Individualisierbarkeit erlaubt es beispielsweise, auf die unterschiedlichen Bedürfnisse verschiedener Kontaktgruppen eines Roboters einzugehen (siehe These 2): So können durch verschiedenen Erläuterungs-Umfang das individuelle Wissen der Nutzergruppen einbezogen werden oder durch Anpassung des Interaktionsniveaus verschiedenen Nutzungsbedürfnissen Rechnung getragen werden (Norm DIN EN ISO 9241-110:2006). Das Prinzip der Erwartungskonformität ist unter anderem entscheidend dafür, die Interaktion zwischen Mensch und Roboter zu fördern. Ist das Verhalten des Roboters konform zu den Erwartungen des Operateurs, kann dies das Vertrauen in ihn erhöhen und Handlungen einfacher vorhersagbar machen (siehe z. B. Mayer & Schlick, 2013).

Um ein interaktionsförderndes Interface zu schaffen, benötigt es die Absprache von EntwicklerInnen und NutzerInnen, wobei die menschlichen Faktoren im Vordergrund stehen sollten (Adams, 2002; Memmel & Reiterer, 2008; Wortham & Bryson, 2017). Ein frühzeitiger Einblick in die Bedarfe der zentralen NutzerInnen und, gerade im Servicebereich, weiterer peripherer Kontaktpersonen, und ein iteratives Vorgehen in der Entwicklung erleichtern das Erstellen tatsächlich gebrauchstauglicher Nutzerschnittstellen.

(5) Dafür ist auch essentiell, dass Entwickler und Systemintegratoren befähigt und darin unterstützt werden, bei der Einrichtung von Kooperations- und Kollaborationsszenarien im Betrieb Prinzipien der Gebrauchstauglichkeit umzusetzen und über eine rein technische Problemlösung hinauszugehen. Wie eine Analyse der DARPA-Challenge ergab, fehlt es zumindest den dortigen Teilnehmern an Expertise und Anstrengungen im Bereich des user-interface design (Murphy, 2015). Es ist zu vermuten, dass diese Schwäche in der Gestaltung der Schnittstelle zum Nutzer nicht auf den prestigeträchtigen Roboter-Wettbewerb begrenzt ist.

Gerade da Serviceroboter häufig nachträglich in bestehende Arbeitssysteme integriert werden, zum Beispiel als zusätzliche Unterstützung für Pflegekräfte bei der Versorgung von PatientInnen, müssen bei der Entwicklung und Implementierung die bereits bestehenden Akteure und organisationalen und prozessualen Verknüpfungen mit beachtet werden. Eine solche soziotechnische Sichtweise hilft dabei, dass Systeme nicht nur auf dem Papier oder im Teststand funktional sind, sondern auch in der Praxis aktiv genutzt werden und einen Mehrwert für die Menschen bereithalten, die sie nutzen. Wird diese Sichtweise schon bei der Entwicklung von Robotersystemen berücksichtigt, indem zum Beispiel Entwicklerteams interdisziplinär zusammengesetzt sind und aus ingenieurwissenschaftlicher, informatischer und arbeitswissenschaftlicher Perspektive auf den Roboter und die Gestaltung seines Einsatzes blicken, gelingt es, funktionale und praktisch nützliche und nutzbare Systeme zu kreieren.

(6) Um die mit Servicerobotik verbundene räumliche und funktionale Flexibilität auszuschöpfen, braucht es Vorgehensweisen und Technologien für eine flexible Sicherheitstechnik. Die erforderliche Risikobeurteilung in Abhängigkeit von der vorgesehenen Verwendung und der Anwendung legt schon vor Einsatz mögliche

Gefährdungen und Maßnahmen zur Vermeidung fest (Norm DIN EN ISO 13482:2014-11) und stellt sicher, dass die mit dem Robotereinsatz verbundenen Risiken auf einem hinnehmbaren Level bleiben. Das beinhaltet neben der inhärent sicheren Konstruktion die Umsetzung von Schutzmaßnahmen und die Benutzerinformationen (Norm DIN EN ISO 12482:2014)).

Gerade durch engere Kontakte von Servicerobotern mit verschiedensten Anspruchsgruppen, die häufig nicht umfassend geschult sind, besteht ein hohes Gefahrenpotenzial von Servicerobotik. Hierzu können nicht nur Fehler in Technik oder Programmierung beitragen (inhärente Sicherheit), sondern auch menschliches Fehlverhalten (Vasic, 2013) oder Unwissenheit im Umgang. Durch einen zunehmenden Automatisierungsgrad, einer höheren Beweglichkeit und komplexere Aufgaben steigt zusätzlich das Unfallrisiko, da die Vorhersehbarkeit von Roboterverhalten schwieriger wird (Vasic, 2013). Hieran zeigt sich die Bedeutung von flexiblen Sicherheitsmaßnahmen, die es ermöglichen, auf unterschiedlichste Situationen angemessen einzugehen und Sicherheit in verschiedenen Einsatzszenarien und für die unterschiedlichsten Interaktionspartner des Roboters sicherzustellen. Ideen zur Prävention sehen die Programmierung eines „Gefährdungsbewusstsein“ vor oder aber eine lernende KI, die durch Feedback vermittelt bekommt, wie Gefahren vermieden werden sollen (Ertel, Voss, & Söffker, 2010).

(7) Da es im Bereich der Servicerobotik oft erwünscht ist, dass Roboter verschiedene Aufgaben ausführen und flexibel eingesetzt werden können, muss auch die Aufgabenzuteilung ad hoc und flexibel durch die Bediener geschehen können. Diese Form der dynamischen Aufgabenallokation (siehe z. B. Older, Waterson & Clegg, 1997) ist aktuell noch selten anzutreffen, allerdings beschäftigen sich Forschungsprojekte wie das von R. Müller, Vette und Geenen (2017) oder der BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2020) mit der Übertragung von Zuteilungs-Verantwortung auf den Operateur auf dem Shopfloor. Erste Ergebnisse aus letzterem Projekt zeigen, dass die Zufriedenheit mit dem Zuteilungsprozess am größten ist, wenn die betroffene Person selbst über die Zuteilung bestimmen kann, statt sie vorgesetzt zu bekommen (Tausch, 2019).

Vorteil einer flexibilisierten Aufgabenallokation unter Mitwirkung der Beschäftigten ist, neben einer positiveren Wahrnehmung des Prozesses, dass der Bediener durch den Einbezug in die Aufgabenverteilung Spielräume für die Ausgestaltung des Robotereinsatzes und damit auch seiner eigenen Arbeit erhält. Beim Einsatz eines Getränkeliefer-Roboters in einem Seniorenheim ist vorstellbar, dass nicht vorher festgelegt ist, dass dieser Roboter alle Bewohner im Speisesaal mit Getränken versorgt. Ein Pflegehelfer könnte in der Situation entscheiden, welche BewohnerInnen vom Roboter beliefert werden und welche besser durch ihn selbst versorgt werden sollen. So gewinnt er mehr Zeit für die Interaktion mit einzelnen BewohnerInnen, kann die Schwerpunkte seiner Arbeit selbst setzen und lernt, den Roboter auf eine für ihn nützliche Art und Weise einzusetzen. Eine solche Flexibilisierung des Einsatzes erhöht also nicht nur die Nützlichkeit des Robotersystems, sondern kann auch zu einer Verbesserung der Arbeitsbedingungen für die Bedienpersonen beitragen.

Die hier beschriebene Flexibilisierung der Aufgabenaufteilung beinhaltet eine ad hoc-Auswahl vordefinierter Aufgaben (Gramopadhye, Drury, Sharit & Sudit, 1992), aber nicht zwingend das flexible Schaffen neuer Aufgaben. Die Programmierung von

Teilaufgaben ist von dem Allokationsbegriff zu unterscheiden und ist wesentlich komplexer umzusetzen, wohingegen die freie Zuteilung vorher festgelegter Tätigkeiten im Servicebereich vergleichsweise einfach implementierbar ist.

(8) Serviceroboter, die nicht für jede mögliche Situation innerhalb einer komplexen Umgebung eine zuvor eingeplante und programmierte Verhaltensweise beherrschen, werden künftig präserter im (Arbeits-)Alltag sein als bisher (Haddadin, 2019).

Das schließt zum Beispiel Roboter ein, deren Spracherkennung nicht so vollständig entwickelt ist, dass sie auf jede beliebige Ansprache adäquat reagieren können oder Roboter, die bei der Navigation in einer unstrukturierten Umgebung wie einem Krankenhausflur auf Hilfe von Passanten bei der Überwindung von Hindernissen angewiesen sind. Wie Prassler (2012) zum Auftakt seines Sammelbandes zu Servicerobotik schreibt, sind einige der technischen und wissenschaftlichen Probleme solcher Roboter die, dass sie häufig nur limitierte sensorische Fähigkeiten haben und in der physischen Interaktion mit der realen Welt eingeschränkt sind. Gleichzeitig besteht die Schwierigkeit, dass sie oft nur unzureichend Umgebungsphänomene und Situationen verstehen (Prassler, 2012) und daher nicht adäquat reagieren können.

Für den Umgang mit unvorhergesehenen Situationen, die mit den grundlegenden Fähigkeiten des Roboters nicht zu bewältigen sind, müssen Interaktionsprinzipien entwickelt werden, die adäquat auf mögliche Kontaktpersonen eingehen. Norman (2013) betont in seinem Klassiker der Produktdesign-Literatur „The Design of Everyday Things“ immer wieder die Relevanz, sich bei der Gestaltung auf die Dinge zu fokussieren, die schief laufen können und nicht so geplant waren – gerade, wenn in diesen Situationen die Maschine (also der Roboter) beim Umgang mit dem Problem unterstützt, kann die Zusammenarbeit besondere Zufriedenheit auslösen. Inzwischen beschäftigten sich auch Projekte explizit mit der Frage, wie man mit Situationen umgehen kann, die zum Beispiel ein Roboter nicht aus sich selbst heraus lösen kann, weil etwas Ungeplantes passiert. Aus den ARA1-Projekten ist hier das Konsortium FRAME zu nennen, die sich mit sogenannten „needy robots“, also hilfsbedürftigen Robotern, die mangels Manipulator zum Beispiel beim Warentransport im Krankenhaus vor einer Aufzugtür scheitern, beschäftigen. Den Forschern stellt sich zum Beispiel die Frage, wie so ein Roboter mit Hilfsanfragen auf Beschäftigte in seinem Umfeld zugehen kann, um Hilfeverhalten zu animieren, ohne jedoch Arbeitsabläufe zu stören. Hier zeigt sich unter anderem, dass es bei Robotern, die auf die Hilfe von Menschen angewiesen sind, wichtig ist, dass diese über die Fähigkeit verfügen, geeignete Personen auszuwählen und durch die Nutzung von Dialogstrategien Hilfe zu erhalten (Backhaus, 2018).

(9) Die Übernahme von Aufgaben durch Serviceroboter muss in ihren Auswirkungen auf die verschiedenen Arbeitssystemkomponenten betrachtet werden. Das soziotechnische Systemmodell von Tausch et al. (2020) macht deutlich, wie viele Personengruppen direkt oder indirekt vom Einsatz eines Robotersystems betroffen sind. So müssen nicht nur die Interaktionen mit den direkten Operateuren in den Blick genommen werden, sondern beispielsweise auch sporadische Begegnungen mit anderen Beschäftigten. Hier darf es weder zu Kollisionen kommen noch zu Ängsten und Unsicherheiten bei den Beschäftigten, die nicht hinreichend über den Roboter und seine Funktionen unterrichtet sind und dessen Handlungen deshalb nicht adäquat einschätzen können. Es ist zu vermeiden, dass beispielsweise Beschäftigte ihre

Laufwege umfassend anpassen (müssen), um mobilen Robotern aus dem Weg zu gehen, und so in ihrer Arbeitsroutine beeinträchtigt werden.

Es lassen sich vielfältige ähnliche Situationen vorstellen, in denen Roboter die „normale“ Ausübung der Arbeitstätigkeiten in irgendeiner Form beeinflussen und verändern. Diese Auswirkungen müssen nicht immer zum Nachteil sein, allerdings müssen entsprechende Maßnahmen ergriffen werden, wenn kritische Auswirkungen festgestellt werden. Denkbar ist beispielsweise eine soziale Isolation von Beschäftigten durch den zunehmenden Einsatz von Robotern in ihrem Arbeitsbereich. Hier gilt es, den Einsatz so zu gestalten, dass bestehende soziale Interaktionen nicht verdrängt werden, sondern zum Beispiel durch die Übernahme von Routineaufgaben durch den Roboter Raum für intensivere Absprachen unter den Beschäftigten geschaffen wird.

(10) Durch den Einsatz von Servicerobotern können auch neue Aufgaben geschaffen werden, für die es keine bisherige menschliche Entsprechung gibt. So kann zum Beispiel in der Betreuungsarbeit ein Roboter wie die Therapierobbe Paro eingesetzt werden, um eine Kontaktaufnahme zu dementen Personen zu ermöglichen, die dann der Betreuungskraft die weitere Arbeit und den Aufbau einer Beziehung erleichtert. Serviceroboter bieten unter anderem das Potenzial, Begleiter für ältere oder hilfsbedürftige Menschen zu werden: Dies kann sowohl im Bereich der physischen Gesundheit durch Sturzprävention, der psychosozialen Ebene durch Minderung von Einsamkeit, als auch beim Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit von Vorteil sein. Das damit entstehende „Aufgabenpaket“ eines Roboters umfasst neue und zusätzliche Aufgaben, die von beschäftigten Betreuungspersonen nicht oder nicht in dem Umfang geleistet werden oder werden können. Dennoch gilt, dass auch beim Einsatz von Robotern für über typische Aufgaben herausgehende Funktionen die Wahrung der Privatsphäre, die Selbständigkeit und die Notwendigkeit von menschlichen Kontakten nicht unbeachtet bleiben dürfen (Čaić, Odekerken-Schröder, & Mahr, 2018).

Die Erwartung, dass Roboter allerdings menschliche Arbeit ersetzen, ist hierbei zu widersprechen. Vielmehr werden Roboter in Zukunft Werkzeuge sein, um Entlastungen zu schaffen und somit Freiräume – z. B. für psychosoziale Betreuung – zu haben (Baisch et al., 2018; Haddadin, 2019) oder um eben gänzlich neue Aufgabenfelder zu erschließen und synergetisch entstehende Serviceleistungen anbieten zu können.

(11) Der Aufgabenbegriff muss in der Mensch-Roboter-Interaktion insbesondere im Servicebereich diskutiert und um eine Definition robotischer Aufgaben ergänzt werden. Unter Umständen müssen daher auch neue Formen der Zusammenarbeit definiert werden (siehe Punkt 12), die nicht die gemeinsam ausgeführte Aufgabe im Fokus haben. Das trifft beispielsweise auf Interaktionen wie Instandhaltungsarbeiten zu (bei denen nur der Instandhalter eine Aufgabe verfolgt, der Roboter jedoch nicht), aber auch in der Interaktion von PatientInnen und einem sozial interaktiven Roboter. Die Eignung des Aufgabenbegriffs muss diskutiert werden und es sollten neue, geeignetere Konzepte gesucht werden, die sich zur Zentrierung der Betrachtung einer gemeinsamen Interaktion eignen. In ihrer Heuristik zur Einordnung von Systemen aus Mensch und Roboter schlagen (Schweidler, 2020) die Betrachtung von Merkmalen von Kontext, Person und Roboter vor, um Robotersysteme zu charakterisieren, nicht aber die Betrachtung einer verbindenden Aufgabe. Feil-Seifer und Mataric (2005), die den Begriffsbereich sozial assistiver Robotik abgrenzen, nutzen beispielsweise das Ziel der

Interaktion und den Weg der Zielerreichung als das zentrierende Element der Systembeschreibung. Die Nutzbarkeit dieser Konstrukte für die übergreifende Beschreibung und Einordnung von Mensch-Roboter-Systemen muss geprüft und auch in der Praxis erprobt werden.

(12) Die Interaktionsformen Koexistenz, Kooperation und Kollaboration müssen für den Bereich der Servicerobotik unterfüttert und mit Beispielen verdeutlicht werden. Die Unterteilung dieser Interaktionsformen wird unter anderem in einer Publikation von Onnasch, Maier und Jürgensohn (2016) vorgenommen. Die Autoren entwickeln in diesem Dokument eine Taxonomie der Mensch-Roboter-Interaktion mit einem Fokus auf Einsatzbereichen in der Industrie, die sie inzwischen in Onnasch et al. (2020) weiterentwickelt haben. Die kategoriale Betrachtungsweise führt einerseits dazu, dass Zwischenformen der Zusammenarbeit, wie beispielsweise ein Überreichen von arbeitsteilig bearbeiteten Produkten – wie einem Glas, das der Roboter einschenkt und dem Pflegehelfer zum Überreichen an eine Patientin übergibt – nicht eindeutig einsortiert werden können. Andererseits führt der industrielle Ursprung der Betrachtung dazu, dass sich servicebezogene Beispiele wie die Navigation eines Besuchers in einem Hotel nicht eindeutig einordnen lassen. Einen Aufschlag für eine andere Betrachtung machen Schweidler, Tausch, Oehme und Jürgensohn (2020) in ihrer deutlich offeneren und dimensional gedachten KOPRO-Heuristik.

3.6 Ausblick und Integration der Anforderungen in die weitere Arbeit

Diese Liste an Anforderungen soll nicht als erschöpfende und abschließende Aufzählung von Aspekten betrachtet werden, die zu beachten sind, wenn es um die Gestaltung und Implementierung von Servicerobotik geht. Vielmehr ist sie ein Instrument, um den aktuellen Status der Forschung zu Mensch-Roboter-Interaktion bei Dienstleistungsaufgaben zu skizzieren und blinde Flecken sowie aktuelle Baustellen und Herausforderungen für Forscher, Arbeitsgestalter, Entwickler und Systemintegratoren offen zu legen.

Gleichzeitig zeigt die enge Verknüpfung der Punkte untereinander, wie bedeutsam es ist, den Einsatz von Servicerobotern aus einer ganzheitlichen Perspektive zu betrachten. Dazu kann es hilfreich sein, über den Tellerrand der eigenen Expertise hinaus zu schauen und zu versuchen, Systeme zu schaffen, die für die direkten Nutzer und die darum herum bestehenden Arbeitssysteme einen Nutzen bringen. Damit Serviceroboter sich mittel- und langfristig als ein Mittel zur Entlastung von Arbeitskräften von Routine- und Peripherie-Aufgaben, beispielsweise im Pflegebereich, durchsetzen, muss dabei mehr beachtet werden als nur die direkte Interaktion mit dem Dienstleistungsempfänger.

3.7 Literaturverzeichnis

Adams, J. A. (2002). Critical Considerations for Human-Robot Interface Development. UR - <https://www.semanticscholar.org/paper/Critical-Considerations-for-Human-Robot-Interface-Adams/6952a0565d2e0d3e251e08622dfdbe95313a6d9c>.

Backhaus, N. (2018). "Somebody help me, please?!" Interaction Design Framework for Needy Mobile Service Robots*. Paper presented at the 2018 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO).

Baisch, S., Kolling, T., Rühl, S., Klein, B., Pantel, J., Oswald, F., & Knopf, M. (2018). Emotionale Roboter im Pflegekontext. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 51(1), 16–24. doi:10.1007/s00391-017-1346-8.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. (2020). Mensch-Roboter-Interaktion und Assistenz-systeme - Aufgaben-allokation in der Smart Factory, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Zugriff am 14.04.2020. Verfügbar unter <https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Forschung/Forschungsprojekte/f2418.html>

Buxbaum, H.-J. (Ed.) (2020). Mensch-Roboter-Kollaboration. Wiesbaden: Springer Gabler.

Buxbaum, H.-J. & Häusler, R. (2020). Ladenburger Thesen zur zukünftigen Gestaltung der Mensch-Roboter-Kollaboration. In H.-J. Buxbaum (Hrsg.), Mensch-Roboter-Kollaboration (S. 293–317). Wiesbaden: Springer Gabler.

Čaić, M., Odekerken-Schröder, G., & Mahr, D. (2018). Service robots: value co-creation and co-destruction in elderly care networks. *Journal of Service Management*, 29(2), 178-205. doi:10.1108/josm-07-2017-0179.

Norm, DIN EN ISO 9241-110:2006 (2006). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006). Frankfurt a. M.: Beuth Verlag.

Norm, DIN EN ISO 8373 (2012). Roboter und Robotikgeräte - Wörterbuch. Frankfurt a. M.: Beuth Verlag.

Norm, DIN EN ISO 13482:2014. (2014). Roboter und Robotikgeräte - Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter (ISO 13482:2014). Frankfurt a. M.: Beuth Verlag.

Endsley, M. R. (2016). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 32-64. doi:10.1518/001872095779049543.

Ertel, P., Voss, H., & Söffker, D. (2010). On Risk Formalization of On-line Risk Assessment for Safe Decision Making in Robotics. Paper presented at the IARP Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments, Toulouse, France.

Fasola, J. & Mataric, M. J. (2010). Robot Motivator: Increasing User Enjoyment and Performance on a Physical/Cognitive Task. In IEEE 9th International Conference on Development and Learning (ICDL) (S. 274–279). Piscataway, NJ: IEEE.

Feil-Seifer, D. & Mataric, M. J. (2005). Socially Assistive Robotics. In 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005; June 28 - July 1, 2005, [Chicago, IL (S. 465–468). Piscataway, NJ: IEEE Operations Center. Zugriff am 11.05.2020.

Gramopadhye, A. K., Drury, C. G., Sharit, J. & Sudit, M. (1992). A framework for function allocation in inspection. In International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing and Hybrid Automation (S. 26–28).

- Haddadin, S. (2019). "Roboterassistenten als Alltagshelfer werden so selbstverständlich sein wie unsere heutigen Haushaltsgeräte". In ZQP-Report: Pflege und digitale Technik.
- Lange, J., & Frommer, J. (2011). Subjektives Empfinden und intentionale Einstellung in Interviews zur Nutzer-Companion-Interaktion. In H.-U. Heiss (Hrsg.). Informatik 2011. Bonn: Ges. für Informatik.
- Mathieu, J. E., Heffner, T. S., Goodwin, G. F., Salas, E., & Cannon-Bowers, J. A. (2000). The influence of shared mental models on team process and performance. *The Journal of applied psychology*, 85(2), 273–283. doi:10.1037//0021-9010.85.2.273
- Mayer, M. & Schlick, C. (2013). Improving operator's conformity with expectations in a cognitively automated assembly cell using human heuristics. In S. Trzcieliński, W. Karwowski & G. Salvendy (Hrsg.), *Advances in ergonomics in manufacturing (Advances in Human Factors and Ergonomics Series, 21 - 25 July 2012; proceedings / ed. Gavriel Salvendy ... ; 6, pp. 302–311)*. Boca Raton, Fla.: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12322-36>
- Memmel, T., & Reiterer, H. (2008). User Interface Entwicklung mit interaktiven Spezifikationen. In M. Herczeg & M. C. Kindsmüller (Hrsg.), *Mensch und Computer 2008 // Mensch & Computer 2008* (pp. 357–366). München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Mettler, T., Sprenger, M. & Winter, R. (2017). Service robots in hospitals: new perspectives on niche evolution and technology affordances. *European Journal of Information Systems*, 26(5), 451–468. <https://doi.org/10.1057/s41303-017-0046-1>
- Müller, C. (2019). IFR Press Conference, International Federation of Robotics. Zugriff am 11.05.2020. Verfügbar unter <https://ifr.org/downloads/press2018/IFR%20World%20Robotics%20Presentation%20-%202018%20Sept%202019.pdf>
- Müller, R., Vette, M. & Geenen, A. (2017). Skill-based Dynamic Task Allocation in Human-Robot-Cooperation with the Example of Welding Application. *Procedia Manufacturing*, 11, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.113>
- Murphy, R. R. (2015). Meta-analysis of Autonomy at the DARPA Robotics Challenge Trials. 32(2), 189-191. doi:10.1002/rob.21578
- Norman, D. A. (2013). *The design of everyday things (Revised and expanded edition)*. New York: Basic Books.
- Older, M. T., Waterson, P. E. & Clegg, C. W. (1997). A critical assessment of task allocation methods and their applicability. *Ergonomics*, 40(2), 151–171. <https://doi.org/10.1080/001401397188279>
- Onnasch, L., Maier, X. & Jürgensohn, T. (2016). *Mensch-Roboter-Interaktion - Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle (baua: Fokus)*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. <https://doi.org/10.21934/baua:fokus20160630>

Onnasch, L., & Roesler, E. (2020). A Taxonomy to Structure and Analyze Human–Robot Interaction. *International Journal of Social Robotics*. doi:10.1007/s12369-020-00666-5

Paul, R., Arkin, J., Aksaray, D., Roy, N., & Howard, T. M. (2018). Efficient grounding of abstract spatial concepts for natural language interaction with robot platforms. *The International Journal of Robotics Research*, 37(10), 1269–1299. doi:10.1177/0278364918777627

Prassler, E. (2012). Editorial. In E. Prassler, R. Bischoff, W. Burgard, R. Haschke, M. Hägele, G. Lawitzky et al. (Eds.), *Towards service robots for everyday environments. Recent advances in designing service robots for complex tasks in everyday environments* (Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 76, pp. 3–6). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Rauch, N., Gradenegger, B., & Krüger, H.-P. (2009). Die SAGAT-Methode zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext. In J. Schade (Ed.), *Fortschritte der Verkehrspsychologie* (pp. 197–214). Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Schweidler, P., Tausch, A., Oehme, A. & Jürgensohn, T. (2020). Kontext-Person-Roboter Heuristik KOPROH. Einordnung von MRI-Merkmalen zur Unterstützung von Vergleich, Planung und Bewertung von Mensch-Roboter-Systemen (baua: Fokus). Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. doi: 10.21934/baua:fokus20200711

Tausch, A. (2019). Wer darf die Zuckermasse anrühren? Aufgabenzuteilung in der Mensch-Roboter-Interaktion. Newsletter "Komplexität und Lernen", 14(51), 2–4. Verfügbar unter www.aow.rub.de/mam/content/nl-06-19_spp1921.pdf

Tausch, A., Kirchhoff, B. M. & Adolph, L. (2020). Ein soziotechnisches Systemmodell der Servicerobotik im Pflegekontext. In H.-J. Buxbaum (Hrsg.), *Mensch-Roboter-Kollaboration* (S. 241–255). Wiesbaden: Springer Gabler.

Vasic, M. A. B. (2013). Safety issues in human-robot interactions. Paper presented at the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation.

Weiss, A., Igelsböck, J., Wurhofer, D., & Tscheligi, M. (2011). Looking Forward to a "Robotic Society"? *International Journal of Social Robotics*, 3(2), 111–123. doi:10.1007/s12369-010-0076-5

Wischniewski, S., Rosen, P. H. & Kirchhoff, B. (2019). Stand der Technik und zukünftige Entwicklungen der Mensch-Roboter-Interaktion. In *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA) (Hrsg.), Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten*. 65. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund.

Wortham, R., A. Theodorou, & Bryson, J. (2017). Robot Transparency: Improving Understanding of Intelligent Behaviour for Designers and Users. In Y. Gao, S. Fallah, Y. Jin, & C. Lekakou (Hrsg.), *Towards Autonomous Robotic Systems* (Vol. 10454, pp. 274–289). Cham: Springer International Publishing.

4 Objektivierbare Performancekriterien

Paul Schweidler, Astrid Oehme, Thomas Jürgensohn

Projektpartner: HFC Human-Factors-Consult GmbH

4.1 Die Frage nach objektivierbaren Performancekriterien für Serviceroboter

Stellen wir uns zum Einstieg ein Beispielszenario in der nahen Zukunft vor: Im Sommer 2024 entschließt sich ein größerer Supermarkt, fortan 24 Stunden am Tag für seine Kundschaft geöffnet zu haben. Das neue Angebot soll wirtschaftlich ermöglicht werden, indem anstelle zusätzlichen Personals zwei Service-Roboter in der Zeit von 22-4 Uhr die Gänge befahren, nach dem Rechten sehen und Waren nachfüllen, aber auch, wenn nötig, den Kund*innen als hilfsbereite Ansprechpartner zu Verfügung stehen. Der Filialleiter Herr Krause macht sich nun auf die Suche nach einem geeigneten Robotermodell. Aktuell kann er zwischen 18 Modellen von Servicerobotern für den Einzelhandel auswählen – aber nach welchen Kriterien wird er sich entscheiden? Zum einen muss Herr Krause die technischen Merkmale bedenken: Der Roboter müsste in der Lage sein, selbstständig zu navigieren, eine angemessene Akkulaufzeit haben, erkennen können, wo sich Waren im Regal befinden bzw. wo sie fehlen, ausreichend belastbar sein um Waren zu transportieren, usw. Zum anderen möchte er sichergehen, dass der Roboter flexibel in der Handhabung für wechselnde betriebliche Anforderungen ist: Können einfach neue Routen programmiert werden? Wie können Anpassungen des Sortiments vorgenommen werden? Schließlich muss Herr Krause sicher sein, dass der Roboter sicher ist, Kunden dürfen in keinem Fall gefährdet werden. Ein vierter Punkt, der für ihn eine wirklich entscheidende Rolle spielt, ist jedoch die erfolgreiche Interaktion mit den Kunden des Supermarktes: Kann mit dem Roboter leicht kommuniziert werden? Sieht der Roboter „freundlich“ aus? Wie verhält sich der Roboter, wenn ihm Kund*innen (absichtlich) im Weg stehen? Wird der Roboter von älteren Personen gleichermaßen positiv wahrgenommen wie von jüngeren? Für Herrn Krause wird die Entscheidung nicht leicht, aber er trifft nach sukzessiver Eingrenzung eine Wahl. Manche seiner Auswahlkriterien sind nur in seinem spezifischen Anwendungsfall relevant, andere hätten auch beim Einsatz eines Roboters in der Pflege oder an einer Hotelrezeption ihre Berechtigung.

Mit einigen der o.g. Fragestellungen beschäftigte sich HFC im Projekt ARAIG. Dabei spielten insbesondere die Menschähnlichkeit von Service-Robotern und die Interaktion zwischen Mensch und Roboter eine Rolle. Im Zuge der Forschungsarbeiten wurden drei Laborexperimente mit drei verschiedenen Robotern entwickelt und durchgeführt: ein Experiment zum Anthropomorphismus und Nutzererleben mit einem Leichtbauroboter in einer Assistenzaufgabe, ein Experiment zur sozialen Wahrnehmung im Vergleich eines humanoiden mit einem nicht-humanoiden System und zuletzt ein Experiment zum Vergleich der Wahrnehmung von Robotern in verschiedenen medialen Immersionsstufen. Übergeordnet wurde an einem neuen Klassifizierungssystem gearbeitet, um MRI qualitativ zu bewerten, wobei drei Iterationsstufen durchlaufen wurden: Zunächst wurde ein holistisches Modell der MRI im Gesamtkontext erarbeitet. Daraus wurde eine streng theoriekonforme Taxonomie

abgeleitet. Im letzten Jahr des Projekts wurde dann in einer Synthese aus Theorie, Workshops und Gesprächen schließlich die KOPROH (Kontext-Person-Roboter-Heuristik) entwickelt und in einem gemeinsamen Beitrag mit dem Projektpartner BAuA publiziert (Schweidler et al., 2020).

4.2 Soziale Roboter und Robotereigenschaften

Obwohl Assistenzroboter erst in den letzten Jahren begonnen haben, eine Rolle im täglichen Leben zu spielen, beschäftigt sich die Forschung seit rund 50 Jahren (Raphael, 1972) in zunehmender Intensität mit ihnen. Allerdings ist der Forschungsgegenstand als solcher schwer zu fassen: „Das Konzept des Roboters ist ein *bewegliches Ziel*, wir erfinden ständig neu, was ‚Roboter‘ für uns bedeutet.“³ schreiben Dautenhahn & Ghauoi (2014). Roboter und insbesondere das, was wir darunter verstehen, sind Gegenstand jeweils aktueller kultureller und technischer Entwicklungen. Einige der Forschungsergebnisse implizieren dadurch Zukunftsmodelle oder nehmen Entwicklungsschritte vorweg, die so (bislang) nicht eintraten. Andere sind nur eingeschränkt generalisierbar, da Untersuchungen nur anhand einzelner Robotermodelle vorgenommen wurden, die bis heute nicht als repräsentativ gelten können (da sie oft auch speziell für das jeweilige Forschungsprojekt entwickelt wurden, bspw. Scaselatti, 1998).

Vieles spricht dafür, dass MRI einer sozialen Interaktion oder sogar einer sozialen Beziehung ähnelt (Duffy, 2003; Goodrich & Schultz, 2008; Lee, Peng, Jin, & Yan, 2006), in der wir Verhalten und Reaktionen antizipieren, Annahmen treffen und Inferenzen über unser Gegenüber bilden (Epley, Waytz, & Cacioppo, 2007). Deswegen, und auch weil sich Serviceroboter meist in einer von Menschen und für Menschen geschaffenen Umwelt bewegen und mit dieser interagieren sollen, hat sich die humanoide Form oder zumindest die Aneignung einiger menschähnlicher Gestaltungselemente im Design von Servicerobotern etabliert. Einen besonderen inhaltlichen Schwerpunkt erhielt in ARAIG daher das Thema Anthropomorphismus, die Menschähnlichkeit von Robotern. Die Leitfragen dazu lauteten entsprechend: „Was macht einen guten Serviceroboter aus?“, „Wann wird ein Serviceroboter positiv wahrgenommen?“ und „Welche Rolle spielt die Menschähnlichkeit bei der wahrgenommenen Qualität von Servicerobotern?“.

Aktuell existiert ein reichhaltiger Literaturkorpus, in dem Fragestellungen aufgezeigt oder Rahmenmodelle vorschlagen werden, die als Orientierungspunkt fungieren konnten. Für die Forschung im Projekt leitend waren die initialen Gedanken Brian R. Duffys zum Anthropomorphismus und sozialen Robotern (Duffy, 2003), die Übersicht gebräuchlicher Metriken für die MRI von Steinfeld und Kollegen (2006), die Übersicht über die Herausforderungen und Ziele der MRI von Goodrich und Schultz (2008), die umfassenden Erkenntnisse der Adaptive Systems Research Group um Kerstin Dautenhahn von 2000 bis 2018 (bspw. Dautenhahn, 2007), die von Bartneck et al. (2009) entwickelten und von Ho & MacDorman (2017) überarbeiteten Erhebungsinstrumente für Anthropomorphismus, die Befunde von Kristin Schaefer (2013) zum Vertrauen in Roboter, die MRI-Taxonomie von Onnasch et al. (2016) sowie

³ Übersetzung der Autoren. Original „The concept of robot is a *moving target*, we constantly reinvent what we consider to be 'robot'.“

die Erkenntnisse von Alenljung et al. (2017) zur Anwendbarkeit des Konstruktes User Experience (UX) auf Fragestellungen der MRI.

4.2.1 Soziale Interaktion und Autonomie

Die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter kann in Kooperation und Kollaboration unterschieden werden (Onnasch et al., 2016), wobei der Begriff Zusammenarbeit in diesem Kontext möglicherweise zu Missverständnissen führt, da nicht zwangsläufig von beiden Partnern Arbeit im definitorischen Sinne geleistet wird. Die Angestellte einer Hotelrezeption arbeitet beispielsweise kooperativ mit der Kundin zusammen in dem Sinne, dass beide in getrennten Teilaufgaben das Check-in durchführen. Dabei würde die Kundin wohl weniger von Arbeit sprechen als die Angestellte. Ähnlich verhält es sich für den Pflegemitarbeiter, der einem Parkinson-Patienten Nahrung anreicht und mit diesem kollaborativ an dessen Nahrungsmittelaufnahme arbeitet. In beiden Fällen – Kooperation und Kollaboration – ist die Zusammenarbeit als ein Akt der Assistenz zu verstehen. Ein Roboter wird dabei, zumindest im Betrachtungsfeld der jeweiligen Aufgabe, als ebenbürtiger Partner wahrgenommen und die entstehende Interaktion als eine Form sozialer Beziehung behandelt (Goodrich & Schultz, 2007). In der wissenschaftlichen Literatur ist daher vermehrt der Begriff des Social Robots (Duffy, 2003) oder Socially Interactive Robots (Dautenhahn, 2007) zu finden. Das Gewicht dieser sozialen Komponente wird deutlich durch einen Blick auf ein gemeinsames Merkmal der Anwendungsfelder des Service-Roboters: Alten- und Krankenpflege in der stationären und häuslichen Umgebung, die Betreuung von Gästen in Hotels oder auch Rettungs- und Bergungsoperationen (Hägele et al., 2011) verbindet die Heterogenität der möglichen Interaktionen. Ein Pflegeroboter auf einer Krankenhausstation muss mit Ärzten, Pflegemitarbeitern, Versorgungspersonal, Besuchern und Patienten interagieren, ein Rettungsroboter sowohl mit Suchkräften, Notärzten als auch Katastrophenopfern und ein elektronischer Hoteldiener muss mit Servicepersonal und Gästen in Interaktion treten. Die Fähigkeiten und Anforderungen der einzelnen Interaktionspartner können dabei stark voneinander abweichen, dennoch ist ein Gelingen der Interaktion in der Regel von großer Bedeutung. Ob die Interaktion erfolgreich verläuft, ist dabei stark von der empfundenen Sicherheit und dem Vertrauen gegenüber dem Roboter abhängig (Alenljung et al., 2017). Für die Interaktion zwischen Menschen konstatiert Luhmann (1968) „die Vertrauensfrage schwebt über jeder Interaktion, und die Selbstdarstellung ist das Medium ihrer Entscheidung.“ (S. 46) und schließt, dass erst die Freiheit im Handeln Vertrauen überhaupt notwendig macht. Diese Freiheit des Handelns kann als eine Form von Autonomie bezeichnet werden (Ryan & Deci, 2006; Remmers & Schweidler, 2020), in der Alenljung und Kollegen (2017) das wichtigste Unterscheidungsmerkmal des Roboters gegenüber anderen Arten von Technologie sehen. Es handelt sich also bei dem Service-Roboter um viel mehr als ein technisches Werkzeug oder eine raffinierte Maschine, es handelt sich um einen physischen Agenten, der mit dem Menschen in einer „sozial bedeutsamen Art und Weise interagiert“ (Lee et al., 2006 S. 755) und der vom Menschen an Maßstäben sozialen Miteinanders gemessen wird. Die Qualität dieser Beziehung lässt sich weder allein mit konventionellen Metriken der Mensch-Maschine-Interaktion bewerten (Alenljung et al., 2017; Yanco, Drury, & Scholtz, 2004), noch ist sie allein von der objektiven Qualität der Leistungserbringung abhängig.

4.3 Kriterien und Metriken

Es finden sich verschiedene Metriken zur Bewertung der MRI, die sich in objektive, direkt beobachtbare Kriterien und subjektive, nur indirekt über Hilfskonstrukte operationalisierbare Kriterien unterscheiden lassen. Von besonderem Interesse im Projekt ARAIG war zudem die Interaktion zwischen den objektiven und subjektiven Kriterien. Im Folgenden werden die Erkenntnisse in den drei genannten Bereichen kurz erläutert.

4.3.1 Objektive Kriterien

Objektive Eigenschaften der MRI ergeben sich vorrangig aus den technischen Eigenschaften des Roboters und den daraus abgeleiteten Fähigkeiten zum Erfüllen einer Aufgabe. Dabei ist für den Einsatz jeglicher Roboter die funktionale Sicherheit von übergeordneter Bedeutung. Hierfür liegen bereits entsprechende Richtlinien vor (z. B. EN ISO 12100-1, Maschinenrichtlinie 2006/42/EG).

Für die Interaktion mit Assistenzrobotern sind insbesondere sensorisch-kommunikative Eigenschaften wichtig, die Fähigkeiten wie quasi-natürliche Dialoge oder Gesichts- und Personenerkennung ermöglichen. Die technischen Eigenschaften werden in der Regel vom Hersteller angegeben und müssen daher nicht erhoben werden. Die resultierenden Fähigkeiten können vergleichsweise einfach durch entsprechende Testaufgaben untersucht werden (vgl. Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Beispielhafte Übersicht objektiver Merkmale eines Roboters

Objektive Merkmale	Beispiele
Kerneigenschaften	Mobil/Stationär, Nutzlast, Freiheitsgrade
Konstruktion	Antrieb/Versorgung, Fortbewegung, Getriebearten, Konstruktionsmaterial, Farbe, Formgebung, Oberflächenbeschaffenheit/Haut, Hüllkonstruktion
Bewegungscharakteristik	Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kennlinien, Bahnkurven, Gelenkverteilung, Achsgeschwindigkeit, Achsmomente, Drehwinkel einer Achse, Nachgiebigkeit der Gelenke, Bahngüte & Positioniergenauigkeit, Latenzzeit der Reaktion auf Hindernisse/Gegendruck
Software	I/O Ports, Rechenleistung & Speicher, Lernfähigkeit, HMI (Gebrauchstauglichkeit der Bedienschnittstellen), Kommunikationsprotokolle und Busse, Programmiersprache, Sensorik, Medienfunktionen & Connectivity
Weitere Eigenschaften	Gewicht, Reichweite/Betriebsdauer, Geländegängigkeit, IP-Schutzklasse, Temperaturbereich für Einsatz, Schutzklasse des Handgelenks (erlaubt/verbietet Einsatz bestimmter Manipulatoren), Geräusch, Manipulatoreigenschaften (Greifen, Bohren, Schweißen, Fräsen...), Autonomiegrad (im Sinne der oben erwähnten Freiheit des Handelns), Einsatzgebiet, Aufgabe

Zudem wird die objektive Qualität der Interaktion durch Merkmale des Interaktionspartners bestimmt, also die Expertise, Fähigkeiten und Rolle des Menschen.

Während für Industrieroboter in der Regel die Einhaltung objektiver Leistungsmerkmale hinreichend ist, kommt dem subjektiven Eindruck eines Assistenz- oder Serviceroboters, den er bei seinem menschlichen Interaktionspartner hinterlässt, eine tragende Rolle zu. So kann sich bei gleichbleibender technischer Qualität die wahrgenommene Qualität stark ändern, wenn morphologische oder weitere nichttechnische Parameter des Roboters oder der Interaktion verändert werden.

4.3.2 Subjektive Kriterien

Die subjektiven Eigenschaften der Interaktion entstehen, wenn eine bestimmte Person einen Roboter in einem bestimmten Kontext wahrnimmt. Sie sind nicht direkt beobachtbar, können aber anhand verschiedener Konstrukte untersucht werden. Grundsätzlich kann man dabei zwischen übergeordneten Ansätzen, welche die Gesamtheit der Wahrnehmungseindrücke beschreiben und spezifischen Ansätzen, die (angenommene) Teilaspekte dieses Gesamteindrucks beleuchten, unterscheiden.

Zu den allgemeineren Ansätzen zählen die User Experience (UX) (Hassenzahl, 2013) oder das USUS (Usability, Social Acceptance, User Experience, and Societal Impact) Evaluation Framework (Weiß et al., 2009). Ersteres, die UX, kann die Nutzbarkeit und die Qualität des Nutzungserlebnisses eines technischen Systems quantifizieren, ist gut validiert und vielfältig anwendbar. UX wird als vielversprechend auch für die Anwendung in der MRI diskutiert (Alenljung, 2017), ist jedoch nicht MRI-spezifisch konzipiert. Das USUS-Framework ist ein Versuch, Teilaspekte aus unterschiedlichen bestehenden Bewertungsansätzen für soziotechnische Systeme für die Anwendung in der MRI zu kombinieren. Hier fehlt es jedoch an einem validierten Fragenkatalog; zum anderen weist der Ansatz unserer Ansicht nach einige inhärente Schwächen auf (etwa die theoretisch fragwürdige Trennung von Usability und User Experience). Spezifische Ansätze beziehen sich etwa darauf, wie menschähnlich ein Roboter wahrgenommen wird (Duffy 2003, Ho & MacDorman, 2017), die generelle Einstellung einer Person gegenüber Robotern (Syrdal et al., 2009) oder beispielsweise die Akzeptanz sozialer Roboter unter älteren Menschen (Heerink et al., 2010). Hier liegen vielfältige und (für den jeweiligen Bereich) gut validierte Kriterien vor, die allgemeine Aussagekraft dieser Kriterien ist jedoch nicht einfach zu bewerten. Grund dafür ist, dass die Modellierung des Zusammenhangs zwischen den spezifischen Aspekten und dem Gesamteindruck bislang stark fragmentiert ist. Es existiert, nach unserer heutigen Kenntnis, kein valides Kriterium oder Maß zur Erhebung der allgemeinen subjektiven Komponente der MRI.

4.3.3 Die Interaktion objektiver und subjektiver Kriterien

Um den Zusammenhang zwischen objektiven Robotermerkmalen und dem daraus resultierenden Eindruck zu beschreiben, wurden für das Projekt Forschungskonzepte zu interaktiven Medioumgebungen entliehen. Hier werden objektive Eigenschaften als Quality of Service (QoS, Dienstgüte) bezeichnet; dies sind technische Qualitätsanforderungen, die an die Serviceleistung in medialen Diensten gestellt werden, z. B. ein schneller Verbindungsaufbau oder eine fehlerfreie Informationsübertragung (802.1p-Methode im IEEE 802.1Q Standard). Auf Nutzerseite manifestieren sich diese objektiven Eigenschaften in der Quality of

Experience (QoE), einem mehrdimensionalen Konstrukt von Benutzerwahrnehmungen und -verhalten. QoE ist nach Brunnström et al. (2013, S. 6⁴) der „Grad der Freude oder des Ärgers des Benutzers einer Anwendung oder eines Dienstes. Er ergibt sich aus der Erfüllung seiner Erwartungen in Bezug auf den Nutzen und/oder die Freude an der Anwendung oder Dienstleistung im Hinblick auf die Persönlichkeit und den aktuellen Zustand des Benutzers.“ Der Zusammenhang zwischen objektiven und wahrgenommenen Serviceeigenschaften wurde bereits 2009 von Wu et al. in einem Rahmenmodell vorgestellt. QoS-Parameter werden hier als Teil der Umwelteinflüsse wahrgenommen und verarbeitet. Die QoE stellt dann die verarbeitungs- und verhaltensbezogenen Konsequenzen dieses Prozesses dar. Die kognitive Verarbeitung bezieht sich auf Konstrukte wie die Technologieakzeptanz oder ein Flow-Erleben. Auf Verhaltensebene wird z. B. exploratives Verhalten gezeigt oder langfristig eine neue Technologie angenommen (Verhaltensakzeptanz). UX kann nun als verbindendes Element zwischen objektiven (QoS) und wahrgenommenen (QoE) Serviceeigenschaften betrachtet werden, in dem es konkrete kognitive, emotionale und soziale Konstrukte beiträgt, die die verhaltensbezogenen Konsequenzen modellieren (Pallot et al., 2013).

UX bezieht sich nicht ausschließlich auf Nützlichkeit, Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz, sondern berücksichtigt verstärkt „Gefühle, die von der Techniknutzung erzeugt und geformt werden⁵“ (Alenljung et al., 2017, S. 6). Mithilfe entwickelter Erhebungsinstrumente (Hassenzahl, Burmester, & Koller, 2003; Laugwitz, Held, & Schrepp, 2008) lassen sich vergleichbare und differenzierbare subjektive Werte über diese Gefühle bei der Interaktion erheben. Soziales, emotionales und empathisches Verhalten kann zudem direkt beobachtet werden. UX differenziert dabei zwischen pragmatischen und hedonischen Qualitäten eines Produkts. Eine gewisse pragmatische Qualität besitzt ein interaktives Produkt dann, wenn es Menschen eine effektive und effiziente Zielerreichung ermöglicht. Damit entspricht dieser Faktor der Gebrauchstauglichkeit eines Produktes im Sinne der DIN EN ISO 9241-11. Werte auf diesem Faktor können die empfundene Nützlichkeit des Roboters in seiner Assistenzfunktion quantifizieren. Der hedonische Aspekt beschreibt, ob die Benutzung eines interaktiven Produkts Spaß macht und sich gut anfühlt und erhebt so die nicht-aufgabenbezogene Qualität der Interaktion. Beide Faktoren gelten als starke, unabhängige Prädiktoren für die verhaltensbezogenen und emotionalen Folgen bezüglich der zukünftigen Interaktion mit einem Produkt (Alenljung et al., 2017). Wie genau dieser Zusammenhang beschaffen ist, scheint jedoch noch unklar. De Graaf & Allouch (2013) argumentieren dafür, dass eine positive UX essenziell für die Akzeptanz sozialer Roboter ist. Alenljung und Kollegen (2017) betonen den Forschungsbedarf für die Anwendung des UX-Konstrukts auf die MRI, da sich die in der Mensch-Computer-Interaktion gewonnenen Erkenntnisse möglicherweise nicht ohne weiteres auf die MRI übertragen lassen. Im Projekt ARAIG wurde deshalb in drei Studien der Einfluss der objektiven Eigenschaft „Robotermorphologie“ auf die QoE mit Konstrukten und Erhebungsinstrumenten der UX untersucht. Während in den ersten beiden Studien vorwiegend subjektive Eindrücke erhoben wurden, wurde in der dritten Studie auch das Probandenverhalten beobachtet. Die Studien werden in Kapitel 4.5 überblicksartig vorgestellt.

⁴ Übersetzung der Autoren

⁵ Übersetzung der Autoren

4.4 Anthropomorphismus

Wiederkehrend Aufmerksamkeit in der MRI-Forschung findet in den vergangenen Jahren das Thema Anthropomorphismus (Dalibard et al., 2012; Duffy, 2003; Eyssel et al., 2011; Złotowski et al., 2015). „Der Computer hasst mich heute!“ fluchen Nutzer vielleicht, wenn sich das technische Gerät fortwährend widerspenstig zeigt und unterstellen dem Gerät damit die Fähigkeit, eine affektive Einstellung zu dessen Benutzer entwickelt zu haben. Abgesehen von der Imitation des Menschen bei hoch entwickelten künstlichen Intelligenzen wird eine affektive Reaktion der Maschine jedoch möglicherweise nie stattfinden (Duffy, 2003). Nichtmenschlichem menschähnliche Eigenschaften zuzuschreiben ist eine häufig auftretende und seit Jahrhunderten beobachtete menschliche Neigung (Epley et al., 2007). Dieses Phänomen, Dingen, Tieren oder Gottheiten Intentionen (Gray et al., 2007), komplexe affektive Zustände und emotional motivierte Handlungsabsichten zuzuschreiben (Leyens et al., 2003), ist als Anthropomorphismus bekannt und hilft Menschen, ihre Umwelt und deren Vorgänge zu rationalisieren (Duffy, 2003).

Interessant ist sicherlich, dass Anthropomorphismus sowohl einen gestalterischen Vorgang, also das Darstellen von oder mithilfe von menschlichen Eigenschaften, als auch einen psychologischen Prozess bezeichnet. So ist beispielsweise die Venus von Milo eine anthropomorphe Darstellung der griechischen Göttin Aphrodite, bei ihrer Gestaltung hat also Anthropomorphismus stattgefunden. Dem vorangegangen ist jedoch, dass sich eine Idee einer Göttin als personifizierte, vermenschlichte Form entwickelt hat. Diese Unterscheidung ist besonders wichtig, da auch in der Fachliteratur der Begriff in beiden Bedeutungen verwendet wird: Zum einen für die anthropomorphe Gestaltung von Robotern (bspw. Kim et al. 2016), zum anderen für den zugrundeliegenden psychologischen Prozess des Roboter-als-menschenähnlich-Wahrnehmens (bspw. Eyssel et al., 2011).

4.4.1 Anthropomorphismus in der Mensch-Maschine-Interaktion

Anthropomorphismus im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion kann ebenfalls aus zwei komplementären Perspektiven betrachtet werden. Zum einen etablierten Epley, Waytz und Cacioppo (2007) den Blickwinkel auf die psychologischen Mechanismen des Anthropomorphismus; dieser wird nachfolgend im Abschnitt „Die Mensch-Aspekte“ beleuchtet. Die zweite Perspektive steht wissenschaftlich stark in der Tradition von Masahiro Moris Idee des Uncanny Valley (1970) und befasst sich mit der Frage, welche Eigenschaften eines Roboters Anthropomorphismus bei Menschen auslösen; sie wird zunächst in dem folgenden Abschnitt „Die Roboter-Aspekte“ erläutert.

4.4.1.1 Die Roboter-Aspekte

Punkt, Punkt, Komma, Strich (und weitaus weniger) genügen, um uns ein Gesicht sehen zu lassen, und ein Gesicht genügt, um einem Objekt menschähnliche Eigenschaften zu attribuieren (Kalegina et al., 2018). Einen Roboter durch seine äußeren Erscheinungsmerkmale zu vermenschlichen ist also auf einfachen Wegen zu erreichen (Breazeal, 2003; Dalibard et al., 2012; Lee et al., 2006; Zlotowski et al., 2015). Dass diese Wege aber nicht ungefährlich sind, lehrt uns Moris Theorie der Existenz eines Uncanny Valley (Mori, 1970) und dessen wiederkehrende empirische Evidenz (Ho & Macdorman, 2017) (siehe Abbildung 4.1). Um die Erforschung von gestalterischen

Maßnahmen, mit denen die Vermenschlichung eines Roboters beeinflusst werden kann, spannt sich daher ein weites Feld, stets mit einem wachsamen Auge auf das Uncanny Valley. Das sicherlich größte Teilgebiet darin widmet sich der Gestaltung gesichtsgebender Elemente und Charakteristika wie Augen und Augenbrauen, Mund, Ohren und dem Zusammenspiel dieser Elemente zum Erzeugen einer mimischen Ausdrucksweise (Dalibard

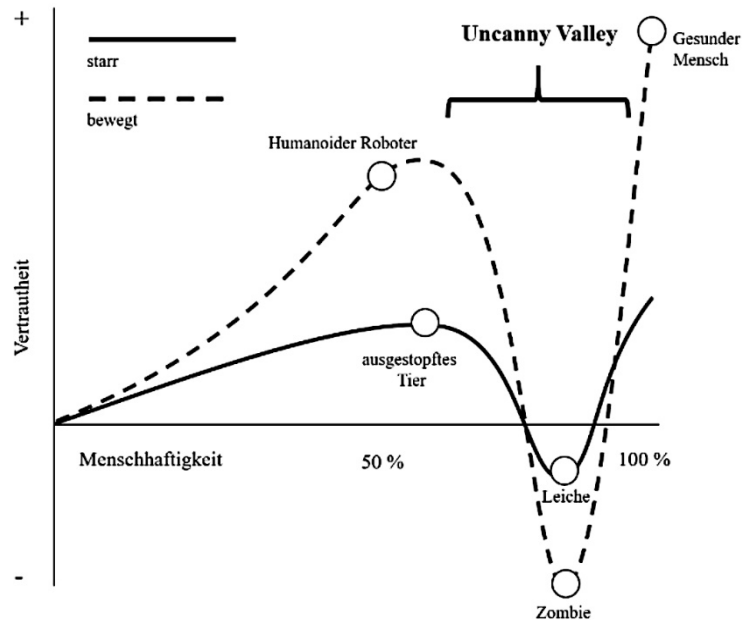


Abbildung 4.1: Das Uncanny Valley nach Mori (1970). Eigene Darstellung

et al., 2012; Eyssel et al., 2011; Kalegina et al., 2018). Ein verwandtes Feld befasst sich mit der gesamten Erscheinung, der Morphologie des Roboters – bekannte Forschungsobjekte sind in diesem Bereich die Pflegerobbe *PARO* (Wada et al., 2005) oder der humanoide Roboter *Pepper*. Als drittes Teilgebiet lassen sich kommunikative und kinetische Einflussfaktoren wie Sprachfunktionen und Natürlichkeit der Bewegungsabläufe zusammenfassen (Dalibard et al., 2012). Ein vierter Bereich untersucht die Framing-Effekte, also eine gezielte Manipulation des Kontexts, die zur Vermenschlichung von Maschinen beitragen, beispielsweise die Vergabe eines Namens für einen Roboter (Darling, 2015) oder die Zuweisung eines Geschlechts (Kim & McGill, 2011). All diese Ansätze bedienen sich dabei inhärent menschlicher oder zumindest tierischer Eigenschaften. Doch wie kommen Menschen beispielsweise zu dem Schluss „Der Computer hasst mich heute!“, obwohl jener keinerlei menschliche Charakteristika zeigt? Um diese Frage zu beantworten ist es hilfreich, die psychologischen Komponenten des Anthropomorphismus zu betrachten.

4.4.1.2 Die Mensch-Aspekte

Der „hassende“ Computer hat kein Gesicht (auch nichts, das daran erinnert), sieht nicht aus wie ein Mensch oder Tier, bewegt sich nicht und unternimmt keinerlei natürliche Kommunikationsversuche. Nichts an diesem Gerät erinnert oberflächlich an ein Lebewesen. Trotzdem kommt es dazu, dass Nutzer ihm unterstellen, der Rechner

würde sich *weigern*, bestimmte Handlungen zu vollführen, oder dass er eben von einem tiefen Groll gegen seine Benutzer erfüllt sei. Epley, Waytz und Cacioppo (2007) argumentieren dafür, dass dies dadurch zu erklären sei, dass Anthropomorphismus ein automatischer „Prozess der Inferenz über nichtbeobachtbare Charakteristika nichtmenschlicher Agenten“ (S. 865) ist, der eine unveränderliche und feste Eigenschaft menschlicher Urteilsbildung darstellt. Ganz allgemein vermenschlichen Menschen also Dinge, wenn sie ein Vakuum füllen möchten, dass durch ihr Erklärungsbedürfnis unerklärlicher Vorgänge in ihrer Umwelt entsteht. Dabei hängt die Wahrscheinlichkeit, dass Anthropomorphismus auftritt, von drei Faktoren ab: *Aktiviertes agentenbezogenes Wissen*, *Selbstwirksamkeitsmotivation* und *Geselligkeitsmotivation*⁶ (Epley et al., 2007). Letzteres beschreibt das basale Bedürfnis nach sozialem Anschluss, das durch die Vermenschlichung nichtmenschlicher Objekte ersatzweise befriedigt werden kann. Ist das Bedürfnis nach sozialem Anschluss höher, steigt die Wahrscheinlichkeit von Anthropomorphismus. *Selbstwirksamkeitsmotivation* beschreibt das Bedürfnis und die wahrgenommene Fähigkeit, sich wirksam mit der Umwelt auseinanderzusetzen. Steigt dieses Bedürfnis und/oder sinkt die wahrgenommene Fähigkeit, so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Anthropomorphismus. Neben diesen beiden motivationalen Faktoren beschreibt *Aktiviertes agentenbezogenes Wissen* als kognitive Komponente, ob objektbetreffende Wissensinhalte aktiviert werden. Existiert beispielsweise kein Wissen über ein wahrgenommenes Objekt, um diesbezügliche Beobachtungen zu rationalisieren, steigt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Anthropomorphismus. Die Theorie erschöpft sich jedoch nicht im Betrachten der mehr oder weniger statischen Variablen innerhalb dieser drei Faktoren, sondern bezieht auch dynamische situative Einflüsse ein. Eine der situativen Variablen ist als Teil des Faktors *Aktiviertes agentenbezogenes Wissen* die wahrgenommene Ähnlichkeit: Wird eine Entität in ihren Bewegungen oder ihrer Morphologie in gewisser Weise als einem Menschen ähnlich wahrgenommen, können menschenbezogene Wissensstrukturen aktiviert werden, obwohl tatsächliches Wissen über das Objekt besteht. Der Grund dafür liegt darin, dass Wissensinhalte hierarchisch nach Grad ihrer Verfügbarkeit aktiviert werden (Barsalou, 1983). Es wird zuerst auf das verfügbare Wissen zugegriffen, das auf einen Stimulus zu passen scheint. Erst dann, wenn ein Konflikt zwischen Stimulusinformation und aktiviertem Wissen besteht, wird nach einer alternativen Erklärung in weniger verfügbaren Wissensstrukturen gesucht. Wissen über uns selbst, über den Menschen, gilt als früh erworben und reichhaltig beschaffen (Higgins, 1996). Das macht es hochverfügbar und prädestiniert, um Vorgänge in unserer Umwelt bedeutsam einzuordnen und zu rationalisieren. Ein Beispiel dafür liefern Morewedge et al. (2007) indem sie zeigen, dass Menschen auch Pflanzen eine Intention und sogar ein Bewusstsein zusprechen, wenn deren Wachstumsbewegungen durch Zeitraffertechnik in einer Geschwindigkeit dargestellt werden, die der menschlichen Bewegungen ähnlich ist.

Die Drei-Faktoren-Theorie (Epley et al., 2007) liefert eine umfassende Beschreibung und Einordnung derjenigen psychologischen Mechanismen, die uns Menschliches im Nichtmenschlichen sehen lassen. Die Forschung um die Theorie des Uncanny Valley (Mori, 1970; Ho & Macdorman, 2017) liefert Antworten auf die Frage, welche Robotereigenschaften diese Mechanismen auslösen können. Für das Projekt ARAIG

⁶ Übersetzungen angelehnt an Schiffbauer (2015). Im Original (Epley et al., 2007): Elicited Agent Knowledge, Effectance Motivation, Sociality Motivation

besonders interessant, sind Untersuchungen, die sich mit der Bedeutung von Anthropomorphismus für die MRI auseinandersetzen.

4.4.2 Anthropomorphismus und Roboter

Duffy erarbeitete 2003 eine Grundidee, die bis heute Bestand hat: Anthropomorphismus ist, korrekt dosiert, ein hilfreiches Werkzeug für bessere MRI. Strait et al. (2017) formulieren es folgendermaßen: „Roboter, die dem Menschen ähnlicher sind [...] können eine natürlichere und effektivere MRI ermöglichen⁷“. Anthropomorphismus wird also grundsätzlich als ein Phänomen gesehen, das die Interaktion von Mensch und Roboter erleichtert. In der Sozialpsychologie stellen Vertrautheit und Ähnlichkeit wichtige Einflussfaktoren für das Zustandekommen und Aufrechterhalten sozialer Beziehungen dar. Byrne und Kollegen zeigten schon 1971, dass Menschen andere Menschen mögen, wenn sie ihnen ähnlich sind. Ein Kernpunkt des Anthropomorphismus ist genau diese wahrgenommene Ähnlichkeit von Dingen zu Menschen (Epley et al. 2007). Die Vermenschlichung führt also dazu, dass Nutzer den Roboter als „Teilnehmer im menschlichen Sozialkreis“ (Duffy, 2003, S. 183) wahrnehmen. Dies erfolgt aber nicht bewusst, sondern als automatische Inferenz, wie im Abschnitt „Die Mensch-Aspekte“ beschrieben wurde. Diese Inferenz kann zu positiven Vermutungen und Erwartungen über die Autonomie, Kompetenz, Intelligenz und Kommunikationsfähigkeiten des Roboters führen (Duffy, 2003; Goetz et al., 2003) und so die gelungene Illusion eines fähigen, intelligenten, sogar emotionalen Interaktionspartners stärken. Werden diese Erwartungen jedoch nicht erfüllt, kann es Nutzer enttäuschen oder verwirren (Lee et al., 2005). Es wäre beispielsweise enttäuschend und verwirrend, also der erlebten Interaktionsqualität abträglich, wenn uns ein humanoider Roboter in einer weitestgehend natürlichen Sprache eine Frage stellt, aber nicht über die technische Ausstattung oder Software verfügte, eine gesprochene Antwort wahrzunehmen oder zu interpretieren.

Einen weiteren Aspekt der Bedeutung der Vermenschlichung von Robotern, das Vertrauen, beleuchtete eine Meta-Analyse über Vertrauen in automatisierte Systeme und fand eine starke Korrelation von Anthropomorphismus mit Vertrauensbildung (Schaefer et al., 2013). Auch Untersuchungen im Bereich des autonomen Fahrens legen nahe, dass Anthropomorphismus tatsächlich zu einer Steigerung des Vertrauens führt (Waytz et al., 2014).

Schließlich soll noch erwähnt werden, dass Anthropomorphismus generell als ein schwer vermeidbares Phänomen gilt, das aufgrund seiner Tragweite für die MRI verstanden und bereitwillig als Gestaltungsmöglichkeit angenommen werden sollte (Duffy, 2003; Walters et al., 2005).

4.5 Experimentelle Untersuchungen in ARAIG

Um das Phänomen der Anthropomorphisierung weiter zu erforschen, wurden im Rahmen von ARAIG drei empirische Versuche durchgeführt, die im Folgenden kurz beschrieben werden sollen. Die erste Studie untersuchte dabei grundlegende Effekte der Vermenschlichung von Robotern, die zweite das Auftreten sozialer Effekte in

⁷ Übersetzung des Autors

Gegenwart eines humanoiden Roboters und die dritte das Auftreten von Anthropomorphismus in verschiedenen medialen Immersionsstufen.

4.5.1 Experiment 1: Grundlegende Effekte der Vermenschlichung von Robotern

In einem ersten Experiment wurden grundlegende Effekte der Vermenschlichung von Robotern und der Einfluss auf das Nutzererleben untersucht. Dazu wurde folgender Aufbau entwickelt: Proband*innen bearbeiteten sitzend eine einfache Montageaufgabe, die darin bestand, verschiedene Bauteile mit den jeweils korrekten Werkstücken zu verbinden. Die Bauteile waren außerhalb der Reichweite der Personen und äußerlich nicht zu unterscheiden. Der Roboter reichte den Personen die Bauteile einzeln und kommunizierte durch die Position der Übergabe, zu welchem der beiden Werkstücke das jeweilige Bauteil gehörte. Die Assistenz des Roboters bestand also aus einer motorischen (dem bloßen Anreichen) und einer kognitiven Komponente (dem Zuordnen). Um die Vermenschlichung zu untersuchen, wurden von allen 27 Proband*innen in randomisierter Reihenfolge zwei verschiedene



Abbildung 4.2: Versuchsperson mit Roboter in anthropomorpher Bedingung

Versuchsbedingungen durchlaufen. In beiden Bedingungen assistierte den Versuchspersonen ein Universal Robots UR5 Leichtbauroboter. Jedoch wurde der Roboter in der Experimentalgruppe von einem textilen Staubschutz ähnlich eines Hemd- oder Pulloverärmels bedeckt, während die Kontrollgruppe den Roboter im unverdeckten Zustand sah (s. Abbildung 4.2). Nachdem die Proband*innen die Aufgabe mit der Hilfe des Roboters etwa 15 Minuten bearbeitet hatten, füllten sie zwei Fragebögen aus, von denen sich einer auf das Nutzungserleben und die empfundene Unterstützung durch den Roboter bezog und der anderen die wahrgenommene Menschlichkeit untersuchte. In der Auswertung der Ergebnisse zeigte sich, dass schon diese vergleichsweise einfache Veränderung des Roboters dazu führte, dass dieser menschähnlicher wahrgenommen wurde. Mit steigendem Anthropomorphismus wurde der Roboter auf der hedonischen Dimension der UX positiver bewertet. Jedoch war, und das ist vielleicht das relevanteste Ergebnis der Untersuchung, die pragmatische Qualität wesentlich prädiktiver für die erlebte Hilfeleistung und die Nutzungsintention.

4.5.2 Experiment 2: Sozialen Effekte humanoider Roboter

Im zweiten Experiment ging es explizit um die sozialen Effekte humanoider Roboter. Der leitende Grundgedanke war hierbei der Folgende: Zwei gut erforschte und belegte Effekte in der Sozialpsychologie sind die der sozialen Hemmung und sozialen Erleichterung. Ersterer sorgt dafür, dass uns schwierige Aufgaben schwerer fallen, wenn wir nicht allein sind, zweiterer dafür, dass uns einfache Aufgaben leichter fallen, wenn wir in Gesellschaft sind. Es wurden bereits Experimente durchgeführt, die daraufhin deuten, dass diese Effekte nicht nur bei Anwesenheit anderer Menschen, sondern auch in Gesellschaft von Robotern zu beobachten sind (Riether et al., 2012). In den durchgeführten Studien wurde jedoch stets nur der Roboter im Vergleich mit

menschlicher oder gänzlich fehlender Gesellschaft untersucht. Im zweiten ARAIG-Experiment interessierte nun, welche Effekte beim Vergleich von einem anthropomorphen mit einem nicht anthropomorphen Roboter bzw. Gerät zu beobachten sind. Zu diesem Zweck wurde ein Aufbau wie folgt errichtet: Die Versuchsperson saß an einem Tisch, ihr gegenüber stand entweder ein Roboter, den wir „Robin“ nannten oder ein von uns „System K“ getauftes, technisch aussehendes Kameragerät. Die Versuchsperson bearbeitete nun einen Intelligenztest (Ravens Matrizen test), der in mehreren, aufeinanderfolgend schwieriger werdenden Stufen aufgebaut war. Die Leistung in jeder Stufe wurde anhand der Fehler und der benötigten Zeit gemessen. Unsere Vermutung war, dass in Robins Anwesenheit die Leistung bei den einfachen Stufen höher und bei den schwierigen Stufen geringer sein müsste, als in Anwesenheit von System K. Beide Bedingungen wurden von allen 25 Versuchspersonen in randomisierter Reihenfolge durchlaufen. Die statistischen Tests der Ergebnisse zeigten zunächst



Abbildung 4.3: Versuchsperson mit Intelligenztest, gegenüber Robin

keinerlei Hinweise auf Unterschieden in den sozialen Effekten zwischen Robin und System K. Die Gespräche mit den Versuchspersonen offenbarten einen möglichen Grund dafür: Das System K selbst wurde zwar nicht als menschlich wahrgenommen, Versuchspersonen fühlten sich dadurch dennoch teilweise beobachtet. Die Präsenz (menschlicher) Agenten wurde also durch das Kamerasystem impliziert. Robin hingegen wurde als niedlich empfunden, jedoch nicht als ein sozialer Agent, was möglicherweise darauf zurückzuführen war, dass mit dem verfügbaren Robotermodell quasi keine echte Interaktion möglich war. Durch das Experiment gewannen wir dennoch einen qualitativen Einblick in das Zusammenspiel von Anthropomorphismus, echter vs. gefühlter Präsenz und sozialen Effekten.

4.5.3 Experiment 3: Mensch-Roboter-Interaktion in verschiedenen Immersionsstufen

In der Erforschung der MRI stellt sich die Herausforderung, dass der Einsatz von Robotern meist teuer und technisch aufwändig ist (van den Brule, Dotsch, Bijlstra, Wigboldus & Haselager, 2014). Roboter werden daher häufig als Simulation auf einem zweidimensionalen (2D) Display präsentiert (Liu, Rakita, Mutlu & Gleicher, 2017), z. B. in Form eines Videos. Durch eine geringe Interaktivität unterscheiden sich 2D-Simulationen wie etwa Videos jedoch stark von realen sozialen Interaktionen (van den Brule et al., 2014). Virtual Reality Simulationen (VR) bieten eine Chance, diese Differenz zu verringern. Durch ihren immersiven, interaktiven Charakter bilden sie möglicherweise eine gute Brücke zwischen einer realen Versuchsumgebung und der simulierten Darstellung auf einem 2D-Display. Wie bei 2D-Darstellungen können in VR auf der einen Seite technische Änderungen flexibel und kostengünstig angepasst werden (van den Brule et al., 2014), sowie eine hohe interne Kontrolle in

experimentellen Untersuchungen gewährleistet werden (Bailenson, Blascovich, Beall & Loomis, 2003). Auf der anderen Seite grenzt sich VR durch die dreidimensionale Raumdarstellung von der 2D-Displaydarstellung ab. Betrachtende können sich, fast wie durch einen realen Raum, frei bewegen und mit anderen (virtuellen) Agenten interagieren. Damit kann in der VR tatsächliches Verhalten beobachtet werden, und nicht, wie in 2D-Umgebungen, bloße Verhaltensintentionen.

Um diese theoretischen Annahmen experimentell zu überprüfen, wurde folgender Aufbau entwickelt: Ein Roboter führte Versuchspersonen durch eine Kunstaussstellung und informierte per Sprachausgabe zu den einzelnen Werken. Die Versuchspersonen konnten dabei selbst entscheiden, wann sie genug zu einem Kunstwerk gehört haben. Anschließend wurden sie dann vom Roboter zum nächsten Punkt in der Ausstellung geführt. Dabei wurde stets gemessen, in welchem Abstand und in welcher Position sich die Personen zu dem Roboter befinden und wie lange sie sich die gesprochenen Texte anhören. Nach Ende des Ausstellungsbesuchs werden Fragebögen u. a. zum Vertrauen in den Roboter oder zum wahrgenommenen Anthropomorphismus ausgefüllt. Zum Vergleich wurde das Szenario in drei verschiedenen Bedingungen durchlaufen: in einem echten physischen Raum, in der VR und als Bildschirmsimulation (ähnlich einem 3D-Computerspiel). Am Experiment nahmen 33 Versuchspersonen teil, wobei alle die Bedingung im physischen Raum und jeweils die Hälfte der Teilnehmer*innen entweder die Bedingung in VR oder am Simulator erlebten. Die Reihenfolge und die Probandenzuweisung zu den einzelnen Bedingungen erfolgten jeweils randomisiert. Aufgrund der COVID-19-Pandemie verschob sich die Studiendurchführung, so dass aktuell die Datenanalyse noch nicht abgeschlossen ist. Die Auswertung der Daten wird jedoch Aufschluss darüber geben, ob die Untersuchung der Interaktion zwischen Menschen und Robotern in verschiedenen Simulationsumgebungen valide erprobt werden kann und ob und inwiefern Phänomene wie der Anthropomorphismus je nach medialer Vermittlung unterschiedlich auftreten.

4.6 Universalität, Klassifikation und Qualität

Auf der Suche nach geeigneten Leistungs- und Performancekriterien für Serviceroboter begegnete dem Projekt ARAIG wiederkehrend ein Problem, das in den vergangenen Abschnitten bereits einige Male angerissen wurde, nämlich, dass der Nutzen und die Nutzbarkeit eines Serviceroboters fast vollständig abhängig sind von dessen Anwendungsbereich. Die Ursache dafür wird sich mit der Zeit vermutlich erübrigen, ist aktuell jedoch noch sehr präsent: Roboter sind sowohl in ihrer historischen Begriffsgeschichte als auch im definitorischen Sinne *universell* einsetzbare Geräte. Von dieser Universalität sind wir technisch jedoch noch ein gutes Stück entfernt. Aktuelle Serviceroboter sind in der Regel entweder gut ausgerüstet für einzelne Aufgaben (wie etwa Rasenmähen oder Besucher begrüßen) oder als adaptive Plattformkonzepte konzipiert, die zwar wesentlich vielseitiger sind, aber für verschiedene Aufgaben händisch angepasst werden müssen. Durch diese fehlende Universalität bilden sich implizit Klassen oder Gruppen von Robotern, die jedoch nicht klar und universell verständlich voneinander abgegrenzt und damit expliziert sind. In einem expliziten Klassifikationssystem ließen sich für die einzelnen Klassen und Unterklassen quantifizierbare Kriterien festlegen, an denen die Güte gemessen werden könnte. Eigene Versuche eines Klassifikationssystems, abgeleitet aus dem Stand der Wissenschaften (Schweidler et al., 2018) waren wegen der eben

beschriebenen Problematik der Breite und zu einem Stück weit Beliebigkeit des Gebrauchs des Roboterbegriffs nur bedingt erfolgreich.

Erfolgreicher war der Ansatz, statt einer wissenschaftlich fundierten Taxonomie ein anwendbares und praxisgerechtes Werkzeug zu schaffen, mit dessen Hilfe die Qualität von Robotern bzw. MRI beurteilt werden kann. Ergebnis ist ein visuelles, heuristisches Werkzeug, die Kontext-Person-Roboter-Heuristik.

4.6.1 Die Kontext-Person-Roboter-Heuristik in aller Kürze

Da KOPROH aktuell in einem bauerfokus Artikel ausführlich vorgestellt wird (Schweidler et al. 2020), soll sie hier nur in aller Kürze umrissen werden. KOPROH zielt auf eine einfache und – sowohl in Bezug auf Einsatzbereiche als auch auf Anwendergruppen – breite Anwendbarkeit. Mit 16 Skalen in drei Kategorien (Kontext, Person und Roboter) hilft die Heuristik dabei, Klarheit über die Charakteristika eines MRI-Szenarios zu schaffen und mehrere MRI-Szenarios schnell und einfach zu vergleichen. Der **Kontext** umfasst dabei die generellen Rahmenbedingungen der Interaktion, die unabhängig von den Merkmalen der Person oder des Roboters bestimmbar sind, und ist charakterisiert durch die (strukturelle) Beschaffenheit der Umwelt, Raum und Zeit der Interaktion sowie die situativen Bedingungen. In der Kategorie **Person** wird betrachtet, welche Rolle die interagierende Person hat wie souverän sie sich gegenüber dem Roboter verhält oder verhalten kann. Die umfassendste Kategorie ist die des **Roboters**, die in Abbildung 4.4 grafisch dargestellt ist. Sie umfasst den Aktionsspielraum des Roboters, seine Kontrolle und sein Aussehen sowie seine Kommunikationsmöglichkeiten.

Die Heuristik besteht aus einer grafischen Übersicht über die Kategorien, die als Arbeitsblatt für verschiedene Anwendungen genutzt werden kann, sowie aus einer Art Spickzettel, der die wichtigsten Aspekte der Heuristik kurz zusammenfasst.

4.6.2 KOPROH-Anwendungsszenarien

Die Heuristik hält vielfältige kreative Einsatzmöglichkeiten bereit. Aus unserer Sicht typische praktische Anwendungsfälle liegen in der Planung (eines Roboters, eines Robotererwerbs, etc.), qualitativen Bewertung (eines Roboters in einem bestimmten Kontext) und im Vergleich (verschiedener Roboter für einen Anwendungsbereich oder auch eines Roboters in verschiedenen Anwendungsbereichen). So hätte Herr Krause mit KOPROH entweder allein oder gemeinsam mit seinem Team planen können, welchen Roboter er für den Supermarkt erwerben möchte. Hierfür könnte er mit Hilfe der Heuristik sein Anwendungsszenario visualisieren, die vorhandenen Dimensionen

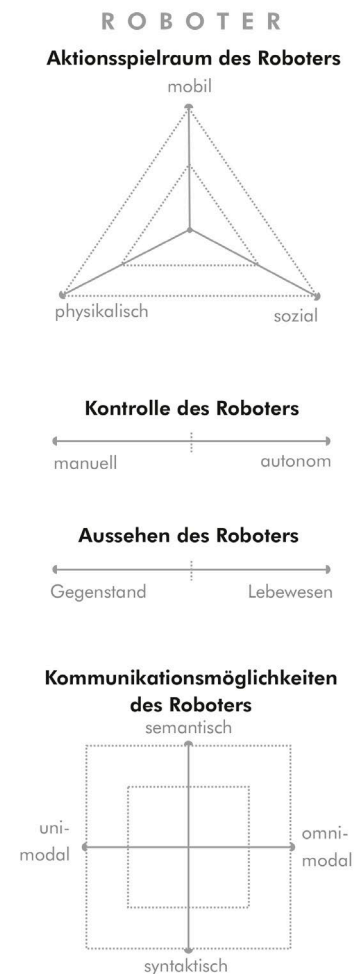


Abbildung 4.4: Die Roboter Kategorie der KOPROH

zur Formulierung von Kriterien nutzen und die Ausprägungen seiner jeweiligen Entscheidungskriterien auswählen (Welches Aussehen? Wie viel Kontrolle? Welche Art von Interaktion? etc.). Nach der Recherche nach aktuell käuflichen Modellen könnte Herr Krause KOPROH auch zur Entscheidungsfindung heranziehen, indem er seine drei Favoriten nochmals einem direkten Vergleich unterzieht.

4.7 Fazit und Ausblick

Im Gegensatz zu Industrierobotern gestaltet sich die Bestimmung sinnvoller objektiver Leistungskriterien für Service-Roboter schwierig. Dies liegt u. a. daran, dass hier Dienstleistungen in direkter Interaktion mit Menschen einen Großteil der Aufgaben darstellen und damit die klassischen Leistungsindikatoren wie Nutzlast oder Bahngüte eine (fast) untergeordnete Rolle spielen. Wichtiger scheinen Aspekte wie die Kommunikationsmöglichkeiten des Roboters, sein Aussehen und Verhalten. Die Wirkung dieser Aspekte, d. h. als wie akzeptabel diese Eigenschaften bewertet werden, hängt wiederum sowohl vom Kontext der Anwendung als auch vom Interaktionspartner ab. Diese Variabilität der Anforderungen, die ein Kontext und die verschiedenen Nutzergruppen an einen Service-Roboter stellen, erschwert die Ableitung genereller Leistungsmerkmale für den „universellen“ Roboter. Auch für die Vermenschlichung lässt sich hierbei keine „Je mehr, desto besser“ Aussage treffen. Letztendlich müssen die Fragen beantwortet werden „Was ist eine gelungene Interaktion?“ und „Was ist eine zufriedenstellende Dienstleistung?“ (eines Roboters). Eine Annäherung hieran kann durch die klassischen Konstrukte Gebrauchstauglichkeit und UX erfolgen, die ihrerseits jedoch eher eine Beschreibung und Bewertung für einen bestimmten Kontext bieten als Kriterien für eine Vorhersage oder Gestaltungsrichtlinien. Zur Einordnung eines bestimmten Roboters in einen bestimmten Kontext für die Interaktion mit einer bestimmten Nutzergruppe wurde im Projekt ARAIG eine Heuristik entwickelt, welche die Systematisierung der Anforderungen an einen Service-Roboter unterstützt und durch Soll-Ist-Vergleiche qualitative Lücken in MRI-Szenarien sichtbar macht. Durch diese Anwendung und den Austausch unter und mit den Anwender*innen, können in Zukunft neue, praktische Ansätze für (quantitative) Performancekriterien gewonnen werden.

4.8 Literaturverzeichnis

Alenljung, B., Lindblom, J., Andreasson, R., & Ziemke, T. (2017). User Experience in Social Human-Robot Interaction. *International Journal of Ambient Computing and Intelligence (IJACI)*, 8(2), 12-31.

Barsalou, L. W. (1983). Ad hoc categories. *Memory & cognition*, 11(3), 211-227.

Bartneck, C., Kulić, D., Croft, E., & Zoghbi, S. (2009). Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots. *International journal of social robotics*, 1(1), 71-81.

Breazeal, C. (2003). Emotion and sociable humanoid robots. *International Journal of Human-Computer Studies*, 59(1-2), 119-155.

Brunnström, K., Beker, S. A., De Moor, K., Dooms, A., Egger, S., Garcia, M. N., ... & Lawlor, B. (2013). *Qualinet white paper on definitions of quality of experience*.

Byrne, D., Gouaux, C., Griffitt, W., Lamberth, J., Murakawa, N. B. P. M., Prasad, M. & Ramirez III, M. (1971). The ubiquitous relationship: Attitude similarity and attraction: A cross-cultural study. *Human Relations*, 24(3), 201-207.

Dalibard, S., Magnenat-Talmann, N., & Thalmann, D. (2012, May). Anthropomorphism of artificial agents: a comparative survey of expressive design and motion of virtual characters and social robots. In *Workshop on Autonomous Social Robots and Virtual Humans at the 25th Annual Conference on Computer Animation and Social Agents (CASA 2012)*.

Darling, K. (2015). 'Who's Johnny?' Anthropomorphic Framing in Human-Robot Interaction, Integration, and Policy. *ROBOT ETHICS 2.0*, Oxford University Press

Dautenhahn, K. (2007). Socially intelligent robots: dimensions of human–robot interaction. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences*, 362(1480), 679-704.

Dautenhahn, K., & Ghauoi, C. (2014). *The encyclopedia of human-computer interaction*.

De Graaf, M. M., & Allouch, S. B. (2013). Exploring influencing variables for the acceptance of social robots. *Robotics and autonomous systems*, 61(12), 1476-1486.

Duffy, B. R. (2003). Anthropomorphism and the social robot. *Robotics and autonomous systems*, 42(3-4), 177-190.

Epley, N., Waytz, A., & Cacioppo, J. T. (2007). On seeing human: a three-factor theory of anthropomorphism. *Psychological review*, 114(4), 864.

Eyssel, F., Kuchenbrandt, D., & Bobinger, S. (2011, March). Effects of anticipated human-robot interaction and predictability of robot behavior on perceptions of anthropomorphism. In *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction* (pp. 61-68). ACM.

Goetz, J., Kiesler, S., & Powers, A. (2003). Matching robot appearance and behavior to tasks to improve human-robot cooperation. In *Proceedings of the 12th IEEE international workshop on robot and human interactive communication* (pp. 55-60). Piscataway, NJ: IEEE Press.

Goodrich, M. A., & Schultz, A. C. (2008). *Human-robot interaction: a survey*. Now Publishers Inc. Gray, H. M., Gray, K., & Wegner, D. M. (2007). Dimensions of mind perception. *Science (New York, N.Y.)*, 315(5812), 619.

Hägele, M., Blümlein, N., & Kleine, O. (2011). Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik-Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung. *Eine Analyse der Fraunhofer Institute IPA und ISI im Auftrag des BMBF, Fraunhofer Gesellschaft*.

Hassenzahl, M. (2013). User experience and experience design. *The encyclopedia of human-computer interaction*, 2.

- Hassenzahl, M., Burmester, M., & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In *Mensch & computer 2003* (pp. 187-196). Vieweg+ Teubner Verlag.
- Heerink, M., Kröse, B., Evers, V., & Wielinga, B. (2010). Assessing acceptance of assistive social agent technology by older adults: the almere model. *International journal of social robotics*, 2(4), 361-375.
- Higgins, E. T. (1996). The „self digest“: self-knowledge serving self-regulatory functions. *Journal of personality and social psychology*, 71(6), 1062.
- Ho, C. C., & MacDorman, K. F. (2017). Measuring the uncanny valley effect. *International Journal of Social Robotics*, 9(1), 129-139.
- Kalegina, A., Schroeder, G., Allchin, A., Berlin, K., & Cakmak, M. (2018). Characterizing the Design Space of Rendered Robot Faces. In *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction - HRI '18* (S. 96–104). ACM
- Kim, S., & McGill, A. L. (2011). Gaming with Mr. Slot or gaming the slot machine? Power, anthropomorphism, and risk perception. *Journal of Consumer Research*, 38(1), 94-107.
- Laugwitz, B., Held, T., & Schrepp, M. (2008, November). Construction and evaluation of a user experience questionnaire. In *Symposium of the Austrian HCI and usability engineering group* (pp. 63-76). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Lee, S. L., Lau, I. Y. M., Kiesler, S., & Chiu, C. Y. (2005, April). Human mental models of humanoid robots. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 2767-2772). IEEE.
- Lee, K. M., Peng, W., Jin, S. A., & Yan, C. (2006). Can robots manifest personality?: An empirical test of personality recognition, social responses, and social presence in human–robot interaction. *Journal of communication*, 56(4), 754-772.
- Leyens, J. P., Cortes, B., Demoulin, S., Dovidio, J. F., Fiske, S. T., Gaunt, R., ... & Vaes, J. (2003). Emotional prejudice, essentialism, and nationalism The 2002 Tajfel Lecture. *European Journal of Social Psychology*, 33(6), 703-717.
- Morewedge, C. K., Preston, J., & Wegner, D. M. (2007). Timescale bias in the attribution of mind. *Journal of personality and social psychology*, 93(1), 1.
- Mori, M. (1970). The uncanny valley. *Energy*, 7(4), 33-35.
- Onnasch, L., Maier, X., & Jürgensohn, T. (2016). *Mensch-Roboter-Interaktion-Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Pallot, M., Eynard, R., Poussard, B., Christmann, O., & Richir, S. (2013, March). Augmented sport: exploring collective user experience. In *Proceedings of the Virtual Reality International Conference: Laval Virtual* (pp. 1-8).

Raphael, B. (1972). *Robot Research at Stanford Research Institute*. STANFORD RESEARCH INST CA.

Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2006). Selfregulation and the problem of human autonomy: Does psychology need choice, self-determination, and will?. *Journal of personality*, 74(6), 1557-1586.

Scassellati, B. (1998), "Imitation and Mechanisms of Joint Attention: A Developmental Structure for Building Social Skills on a Humanoid Robot", In *Computation for metaphors, analogy, and agents*, C. Nehaniv (ed), Lecture notes in artificial intelligence 1562. New York, Springer.

Schaefer, K. (2013). *The perception and measurement of human-robot trust*.

Remmers, P., Schweidler, P. (2020). *Mensch, Roboter und Autonomie – Bereicherung versus Entmündigung in der Arbeit durch autonome Maschinen* [Unveröffentlichtes Manuskript]. Berlin.

Riether, N., Hegel, F., Wrede, B., & Horstmann, G. (2012, March). Social facilitation with social robots?. In *2012 7th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)* (pp. 41-47). IEEE.

Schweider, P., Oehme, A., Jürgensohn, T. (2019). *Hurica: Toward a more general HRI model and taxonomy* [Unveröffentlichtes Manuskript]. Berlin.

Schweidler, P., Tausch, A., Oehme, A., Jürgensohn, T. (2020). *MRI-Szenarien einfach klassifizieren mit der Kontext-Person-Roboter-Heuristik*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. DOI: 10.21934/baua:fokus20200711

Steinfeld, A., Fong, T., Kaber, D., Lewis, M., Scholtz, J., Schultz, A., & Goodrich, M. (2006, March). Common metrics for human-robot interaction. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction* (pp. 33-40).

Strait, M. K., Floerke, V. A., Ju, W., Maddox, K., Remedios, J. D., Jung, M. F., & Urry, H. L. (2017). Understanding the uncanny: both atypical features and category ambiguity provoke aversion toward humanlike robots. *Frontiers in psychology*, 8, 1366.

Syrdal, D. S., Dautenhahn, K., Koay, K. L., & Walters, M. L. (2009). The negative attitudes towards robots scale and reactions to robot behaviour in a live human-robot interaction study. *Adaptive and emergent behaviour and complex systems*.

Yanco, H. A., Drury, J. L., & Scholtz, J. (2004). Beyond usability evaluation: Analysis of human-robot interaction at a major robotics competition. *Human-Computer Interaction*, 19(1-2), 117-149.

Wada, K., Shibata, T., Saito, T., Sakamoto, K., & Tanie, K. (2005, April). Psychological and social effects of one year robot assisted activity on elderly people at a health service facility for the aged. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 2785-2790). IEEE.

Walters, M. L., Syrdal, D. S., Dautenhahn, K., Te Boekhorst, R., & Koay, K. L. (2008). Avoiding the uncanny valley: robot appearance, personality and consistency of

behavior in an attention-seeking home scenario for a robot companion. *Autonomous Robots*, 24(2), 159-178.

Waytz, A., Heafner, J., & Epley, N. (2014). The mind in the machine: Anthropomorphism increases trust in an autonomous vehicle. *Journal of Experimental Social Psychology*, 52, 113-117.

Weiss, A., Bernhaupt, R., & Tscheligi, M. (2011). The USUS evaluation framework for user-centered HRI. *New Frontiers in Human–Robot Interaction*, 2, 89-110.

Wu, W., Arefin, A., Rivas, R., Nahrstedt, K., Sheppard, R., & Yang, Z. (2009, October). Quality of experience in distributed interactive multimedia environments: toward a theoretical framework. In *Proceedings of the 17th ACM international conference on Multimedia* (pp. 481-490).

Złotowski, J., Proudfoot, D., Yogeewaran, K., & Bartneck, C. (2015). Anthropomorphism: opportunities and challenges in human–robot interaction. *International Journal of Social Robotics*, 7(3), 347-360.

Die begleiteten Projekte berichten

5 RoSylerNT – Lernende roboterassistierte Systeme für das neuromuskuläre Training

Maïke Ketelhut, Denis Stogl, Bjoern Braunstein, Nadine Bender, Oussama Benfarah, Taher Ben Slama, Martin Gerlich, Fabian Göll, Stephanie von Maltzan, Mike Nagel, Kiril Safronov, Christian Weiglein, Sebastian Witt, Uwe Zimmermann, Dirk Abel, Björn Hein, Kirsten Albracht

Projektpartner: Buck Engineering & Consulting GmbH (BEC), Institut für Biomechanik und Orthopädie der Deutschen Sporthochschule Köln (IBO), KUKA Deutschland GmbH (KUKA), Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen University (IRT), Koordinaten GmbH (KO), Institut für Anthropomatik und Robotik – Intelligente Prozessautomation und Robotik (IPR) und Zentrum für Angewandte Rechtswissenschaft (ZAR) des Karlsruher Institut für Technologie

5.1 Zusammenfassung des Projekts

Die mit der Alterung verbundenen Pflegekosten, der demographische Wandel und der Pflegenotstand sind Aspekte von höchster gesellschaftlicher Relevanz, die zahlreiche rechtliche, ethische, soziale und ökonomische Fragen aufwerfen. Im Zuge der Alterungsvorgänge kommt es zum Verlust der körperlichen und kognitiven Leistungsfähigkeiten. Regelmäßiges körperliches Training kann diesen degenerativen Prozess verlangsamen und damit die Entstehung chronischer Erkrankungen vermeiden bzw. verzögern. Darüber hinaus kann physische Aktivität das subjektive Wohlbefinden positiv beeinflussen. Effektives körperliches Training führt allerdings zu zusätzlichen Belastungen für den menschlichen Körper, die unkontrolliert zu Überbelastungen und Schädigungen des Bewegungsapparates führen können. Zur Vermeidung dieser nicht physiologisch angepassten Belastung ist die Kontrolle der Belastung des Muskel-Skelett-Systems sowie des Herz-Kreislaufsystems zwingend erforderlich.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden daher Robotersysteme dazu befähigt, mit einem Menschen unter Aufbringung signifikanter Kräfte aktiv und sicher interagieren zu können. Die Interaktion von Menschen und Robotern ist eine komplex zu realisierende Fähigkeit, die sich aus mehreren Grundfertigkeiten zusammensetzt. Eine robuste und sichere Realisierung dieser Grundfertigkeiten eröffnet ein breites Spektrum an neuen Aufgabenstellungen und Applikationsszenarien außerhalb des klassischen industriellen Sektors. Um die Übertragbarkeit der Grundfertigkeiten aufzuzeigen, wurden drei unterschiedliche, sich gegenseitig ergänzende Systeme aus dem gesellschaftlich sehr relevanten Bereich der Rehabilitation (Muskelaufbau und Muskelkoordination) betrachtet, und mit denselben Grundfertigkeiten ausgestattet.

Mit dem **stationären System** werden zunächst grundlegende neuromuskuläre Kapazitäten unter kontrollierten Bedingungen aufgebaut. Das **mobile System** unterstützt den älteren Menschen dabei, die durch das Krafttraining erworbenen neuromuskulären Kapazitäten in verbesserte Bewegungsfertigkeiten umzusetzen,

d. h. z. B. zur Erhöhung der Stabilität beim Gehen und Stehen sowie zu einer besseren Bewegungsausführung bei der Fortbewegung, um die Belastung der Gelenke zu reduzieren. Weiterhin kann das System mit Manipulator als Assistenzsystem im Alltag den Nutzer unterstützen, um zum Beispiel durch das gemeinsame Handhaben von Gegenständen ein selbständigeres Leben zu ermöglichen. Abbildung 5.1 verdeutlicht das Gesamtziel des Vorhabens.

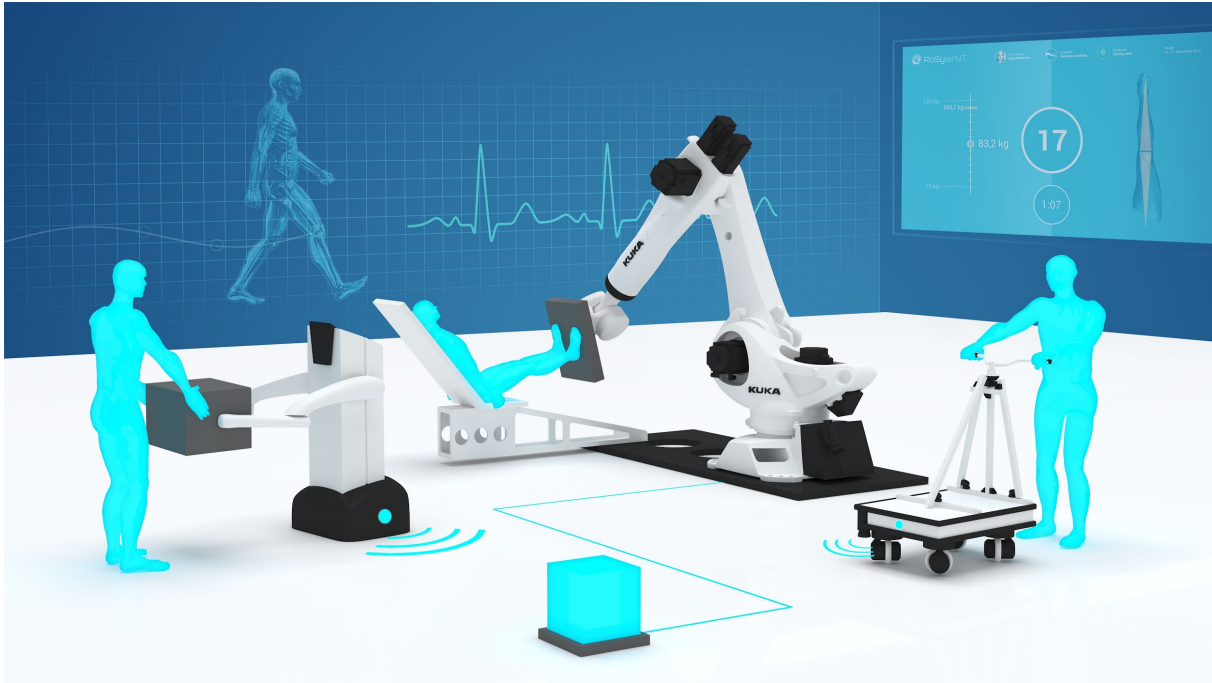


Abbildung 5.1 Das Gesamtsystem basiert auf einer gemeinsamen übertragbaren Wissensbasis, die im Wesentlichen aus einem allgemeinen Modell des Muskel-Skelett-Systems und einem Katalog mit möglichen Interaktionsszenarien besteht. Das allgemeine Modell wird anhand von anthropometrischen Daten sowie den neuromuskulären Kapazitäten skaliert, die über die Robotersysteme ermittelt werden können. Eine weitere Individualisierung der Wissensbasis ist über zusätzliche medizinische Daten möglich. Bildnachweis: Die Koordinauten (KO).

5.2 Hintergrund

Die Wirkungsebene von Krafttraining im Alter ist multidimensional und bietet bei individuell angepasster Anwendung hohes Potential in der Prävention und Therapie altersbedingter Erkrankung und kann somit zu einem gesunden und unabhängigen Lebensstil bis ins hohe Alter beitragen (McAlindon et al., 2014; Zhang et al., 2008). Für Patienten, und insbesondere Senioren, die in der Regel über wenig Erfahrung im Kraft- und Koordinationstraining verfügen, ermöglicht ein Training an Geräten im Vergleich zum Training mit freien Gewichten eine bessere Kontrolle der Bewegung. Ein verbreitetes Gerät zum funktionalen Training der Beinstrecker ist die Funktionsstemma, bei der im Allgemeinen die horizontale externe Kraft, die Bewegungsgeschwindigkeit und das Bewegungsausmaß als Indikatoren für die Belastung zur Steuerung des Trainings verwendet werden. Monfeld (2003) zeigte in einer Studie bei Patienten nach einer Ruptur des vorderen Kreuzbandes allerdings, dass eine vergleichbare horizontale Kraft nicht zwangsläufig eine vergleichbare Belastung für die Muskulatur und die Strukturen des Kniegelenks (z. B. Bänder, Knorpel) impliziert (Monfeld, 2003). Zudem können fehlerbehaftete Bewegungsausführungen zu erhöhten Kompressionskräften im medialen Kompartiment

des Kniegelenks führen, die im Allgemeinen mit einem erhöhten Risiko für die mediale Kniegelenksarthrose assoziiert werden (Andriacchi et al., 2004; Reeves & Bowling 2011; Trepczynski et al., 2014). Eine Abschätzung der Belastungen der internen biologischen Strukturen erfordert zusätzliche Informationen über die resultierenden externen Kräfte (dreidimensional), die Bewegung und die Position des Trainierenden sowie ein biomechanisches Modell des Muskel-Skelett-Systems (Delp et al., 2007).

Bei allen bisher verfügbaren Trainingsgeräten findet jedoch keine Überwachung des Probanden und der Belastung des Bewegungsapparats statt. Trotz des enormen Bedarfs für Krafttraining bei älteren Personen wurden die bisher auf dem Markt erhältlichen Trainingsgeräte den besonderen Anforderungen des Nutzers somit nur unzureichend gerecht.

Die Projektpartner haben im Rahmen einer experimentellen Studie an einer klassischen Funktionsstemme (Beinpresse) gezeigt, dass die Verwendung der Orientierung der Trittplatte als mögliche Stellgröße zur Regelung der Belastungen im Kniegelenk geeignet ist (Kolditz et al. 2016). Darüber hinaus wurden in der Simulation bereits mechanische Modelle des Muskel-Skelett-Systems verwendet, um die Belastungen in den einzelnen Gelenken zu schätzen und mit Hilfe der Orientierung und Position der Platte zu regeln (Kolditz et al., 2015a). Des Weiteren wurde der Aufbau einer flexiblen Forschungsplattform für die robotisch assistierten Rehabilitation der unteren Extremitäten konzeptioniert und simulativ evaluiert, die auf dem Industrieroboter KR 270 R2700 ultra (KUKA Deutschland GmbH) aufbaut und zur Entwicklung neuartiger Trainingsgeräte verwendet werden kann (Kolditz et al. 2015b; Kolditz et al. 2015c; Kolditz et al. 2015d).

Ein guter Überblick über Geräte zur Unterstützung der Fortbewegung wird in Martins et. al. (2012) gegeben. Hier werden verschiedene Geräte, von Exoskeletten über verschiedene passive Geräte bis zu aktiven Rollatoren, betrachtet. Alle dort beschriebenen Systeme unterstützen zwar das Laufen, sind aber nicht in der Lage, den Menschen und seine kognitiven Fähigkeiten gezielt durch „Störungen“ zu stimulieren, um nicht nur eine Unterstützung, sondern auch ein aktives Training zu ermöglichen.

Die Projektpartner KUKA und KIT-IPR haben im Rahmen des Forschungsprojektes Maid (2012-2015, BMBF) einen Mobilitätsassistenten zur Unterstützung bewegungseingeschränkter Personen entwickelt (Irgenfried & Schneider, 2016). Dabei wurden erste Regelungskonzepte für die roboterbasierte Geh- und Aufstehhilfe entwickelt. Im Rahmen des Projektes „Technische Unterstützung zur motorischen Aktivierung von Menschen mit beginnender Demenz“ (2014, HEiKA-Programm) hat das KIT-IPR in Zusammenarbeit mit dem Zentralinstitut für Seelische Gesundheit in Mannheim zudem ein Prototyp-Assistenzsystem für das Training mit Menschen mit beginnender Demenz eingesetzt (Stogl et al. 2014; Stogl et al. 2019a). In einer Pilotstudie wurde das System erfolgreich hinsichtlich der Akzeptanz und Durchführbarkeit von Trainingsszenarien untersucht.

Im Projekt Hybr-iT (Förderkennzeichen 01IS16026C) hat KUKA von einem einarmigen mobilen Roboter zu einem zweiarmigen Manipulator gewechselt, der im Projekt RoSylerNT weiterentwickelt wurde. Die Verwendung eines zweiten Roboterarms hat eine deutliche Verbesserung der Manipulationsfähigkeiten und der Anwendbarkeit des Systems ermöglicht. Außerdem wurden erste Regelungskonzepte basierend auf dem

Operational Space Control-Prinzip verfolgt, deren Weiterentwicklung im Projekt RoSylerNT eine sichere Mensch-Roboter-Interaktion basierend auf der Echtzeit-Erfassung von Bewegungen und Kräften ermöglicht.

5.3 Methodische Herangehensweise

Die Interaktion von Mensch und Roboter ist – wie bereits zuvor geschildert – eine komplex zu realisierende Fähigkeit, die sich aus mehreren Grundfertigkeiten zusammensetzt. In diesem Projekt wirken die Roboter aktiv durch das Aufbringen von Kräften auf den Menschen ein. Hierzu ist ein genaues Verständnis der Biomechanik des menschlichen Körpers und seiner kinematischen und dynamischen Eigenschaften notwendig (Wissensbasis). Darüber hinaus muss der Roboter den Zustand und die Umgebung des Trainierenden wahrnehmen, um sich situationsgerecht verhalten zu können (Perzeption). Techniken des maschinellen Lernens befähigen die Robotersysteme, die Interaktionsmechanismen und das Interaktionsverhalten robust und automatisiert zu lernen. Der Mensch tritt dabei als zu regelnder Prozess in den Mittelpunkt, wobei der Roboter die Aufgabe der Aktorik übernimmt und unter Verwendung der Wissensbasis die optimalen Stelleingriffe zum Erreichen des anwendungsspezifischen Ziels erlernt (Adaptives und lernendes Verhalten). Selbst in unerwarteten Ausnahmesituationen müssen die Roboter durch Extraktion der wesentlichen anwendungsübergreifenden sowie anwendungsspezifischen Gefahrenquellen so reagieren, dass die Menschen nicht verletzt werden (Sicheres Verhalten). Um die Übertragbarkeit der Grundfertigkeiten aufzuzeigen, wurden alle drei Systeme (stationäres System, mobiles System und Manipulator) betrachtet und mit denselben Grundfertigkeiten ausgestattet. Anhand der steigenden Komplexität wurde die Übertragbarkeit der Grundfertigkeiten und der Wissensbasis in den drei Systemen evaluiert. Im Folgenden werden die spezifischen Methoden, die dafür in den einzelnen drei System eingesetzt wurden, genauer erläutert.

5.3.1 Stationäres System - RoboGym

Die Grundlage für die kraftgeregelte Mensch-Roboter-Interaktion bildet eine biomechanische Modellierung des Menschen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten und der technischen Vorgaben der Roboter. Auf Basis der Daten der Menscherkennung können kinematische und kinetische Parameter sowie dynamische Stabilitätsparameter im Modell berechnet werden, welche als Grundlage für Perzeption und Echtzeit-Regelung während der Interaktion dienen.

Im Rahmen des Projektes wurde an der Erkennung bzw. Abschätzung von Gelenkzentren mithilfe maschineller Lernverfahren geforscht. Für die Verarbeitung von Bildern existieren in der Literatur bereits viele Arbeiten in Form von beispielsweise bereits trainierten künstlichen neuronalen Netzen (in diesem Fall Convolutional Neural Networks (CNN)) und umfangreichen, annotierten Datensätzen. Da sich die Pose des Menschen in diesem Fall von Bild zu Bild erwartungsgemäß nicht stark verändern wird, konnten neben dem aktuellen Bild auch vergangene Bilder (dilated convolutions) in den Lernprozess mit einbezogen werden, um die Genauigkeit der Posenbestimmung zu erhöhen. Darüber hinaus wurde auch die Verwendung mehrerer Kameras für die Detektierung der Gelenkzentren analysiert und erprobt. Mehrere Kameras nehmen dabei aus verschiedenen Winkeln Bilder des Patienten auf. Durch z. B. Triangulation können dann die 3D-Koordinaten der Gelenkzentren mit einer höheren Genauigkeit bestimmt werden. Für die Datenfusion wurde ein Filter entwickelt, der die Erfassung

des Patienten auch ermöglicht, sollte eines der Gelenkzentren nicht oder nicht korrekt erkannt werden.

Zur Validierung der entwickelten Algorithmen wurden die Ergebnisse der Bildverarbeitung mit maschinellen Lernverfahren basierend auf den Kameradaten von zwei Intel Realsense D435 Kameras mit den Ergebnissen eines markerbasierten Infrarotkamarasystems verglichen. Dieses besteht aus zwei TRACKPACK/E Kameras, die über die Software DTrack2 angesteuert werden, sechs optischen Markern und einem Koffer mit vier optischen Markern für die Kalibrierung des Systems. Die Intel Realsense D435 verfügt über eine Full-HD Farbkamera für die Aufnahme von Farbbildern sowie ein Global-Shutter-Stereo Kamerapaar und einen Infrarot-Projektor für die Erstellung eines Tiefenbildes.

Die Reaktion von Menschen auf Stimulationen ist hoch individuell und Bewegungen können durch die Aktuierung verschiedener Muskeln realisiert werden. Um dennoch ein optimales Training zu gewährleisten, wurden eine sog. norm-optimale iterativ lernende Regelung und eine modellprädiktive Regelung entwickelt. Iterativ lernende Regelungen nutzten die Wiederholungen der Übungen während des Trainings, um den optimalen Stellgrößenverlauf des Roboters zu erlernen. Dafür wird ein stark vereinfachtes Patientenmodell für die Prädiktion der Belastung während des Trainings verwendet. Um die Modellparameter nicht für jeden Probanden händisch identifizieren zu müssen und da die Modellparameter auch innerhalb eines Trainings stark variieren können, wurde ein Kalman Filter zur Schätzung der Modellparameter eingesetzt. Die modellprädiktive Regelung verwendet das identische, stark vereinfachte Patientenmodell, um das zukünftige Prozessverhalten in Abhängigkeit von den Eingangssignalen zu optimieren. Darüber hinaus wurden verschiedene Ansätze zur robusteren Gestaltung der iterativ Lernenden Regelung durch u. a. Verwendung mehrerer vergangener Zyklen und Schätzung der Unsicherheit des Modells analysiert (Ketelhut et al., 2020).

Für die simulative Erprobung der Regelung wurde das neuromuskuloskeletale Modell des Menschen in Kombination mit einem Modell des stationären Systems verwendet. Beides wurde in OpenSim implementiert und bildet durch die Definition zusätzlicher Beschränkungen eine geschlossene kinematische Kette. Mithilfe der inversen Kinematik und Dynamik sowie einer Annahme für die anliegende Kraft konnte somit die Pose des Menschen sowie die Belastung in Form des externen Adduktionsmomentes bestimmt werden. Die Belastung dient neben dem Kniegelenkwinkel als Regelgröße, während der optimale Plattenwinkel sowie die kartesische Koordinate in y-Richtung die zu optimierenden Stellgrößen darstellen. Für den Nachweis der Machbarkeit wurde ebenfalls eine erste experimentelle Erprobung der Regelungskonzepte durchgeführt.

5.3.2 Mobiles System - RoboTrainer

Im Rahmen des Projektes können entsprechend der untersuchten Grundfertigkeiten die Arbeiten mit dem mobilen System in folgende Kategorien unterteilt werden: Benutzererfassung mittels der Sensorik auf dem Roboter, Regelung und sicheres Verhalten, mechatronischer Aufbau des Systems und funktionale Sicherheit des Gerätes.

Die Erfassung des Benutzers wurde mittels mehrerer Sensormodalitäten durchgeführt. Dabei war eines der wichtigsten Kriterien, dass alle Sensoren und Datenverarbeitungsalgorithmen auf dem mobilen System laufen, da bei der Interaktion ein Nutzer den RoboTrainer entlang vorgegebener Pfade im Raum navigieren soll. Bei der Interaktion spielt die statische (beim Stehen) und dynamische (beim Laufen) Stabilität bzw. das Gleichgewicht des Nutzers eine wichtige Rolle, wofür eine möglichst genaue kinematische Erfassung notwendig ist. Diese Erfassung wurde mittels 3D-Sensoren (Tiefenbildkameras) und 2D Laserscanner durchgeführt. Die erste Tiefenbildkamera dient der Verfolgung des Oberkörpers, wofür mehrere Algorithmen mit dem Referenz-Trackingsystem *Vicon* verglichen wurden. Die zweite Tiefenbildkamera dient der Bestimmung der 3D-Position der Fußspitzen und der 6D-Position von Füßen, von Fersen und den Sprunggelenken des Nutzers. Da die Fersen des Nutzers aus der Kameraperspektive oft nicht sichtbar sind, wurde ein Kalibrierungsvorgang entworfen, der die Länge und die Höhe des Fußes eines Nutzers bestimmt. Zusätzlich kann der Algorithmus die Orientierung des Unterschenkels bestimmen, wenn dieser im Bild zu sehen ist, was nicht in allen Gangphasen der Fall ist (Stogl et al. 2019b). Da die Bearbeitung der Punktwolken sehr rechenintensiv ist und die Daten mit einer Frequenz von nur 5Hz bearbeitet werden können, wurde zusätzlich auch ein Ansatz zur Bestimmung der Position des Unterschenkels aus 2D-Daten der Laser- Abstandssensoren entwickelt. Der Ansatz schätzt dynamische Parameter (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) für das linke und rechte Bein des Nutzers. Benutzt wurde das *Global nearest neighbor* (GNN) Verfahren für die Segmentierung einzelner Beine und der Kalman Filter zur Parameterschätzung. Aus dem Kraft-Momenten-Sensor, der als Interaktionsschnittstelle mit dem Nutzer dient, wurden die Kadenz und die Gangphasen "Toe-off" und "Heel Strike" bestimmt. Die Daten aus diesen vier Sensoren wurden miteinander verglichen und mittels Kalman Filter fusioniert.

Die bereits vorhandene Admittanzregelung des mobilen Systems wurde im Projekt erweitert (Stogl et al. 2020). Dafür wurden zwei Ansätze verfolgt. Zum einen wurde eine neuartige Adaption der Reglerparameter basierend auf den Gangeigenschaften des Nutzers und der aktuellen Robotergeschwindigkeit entwickelt. Zum anderen wurden in der Literatur vorhandene Methoden evaluiert und implementiert, die ein passives Reaktionsverhalten realisieren. Die zwei Parametrierungsverfahren bestimmen einerseits die individuellen Interaktionskräfte eines Nutzers, und andererseits die "natürliche" Laufgeschwindigkeit mit dem RoboTrainer. Die individuellen Interaktionskräfte des Nutzers werden bei der Erstnutzung des RoboTrainers anhand einer statischen Übung ermittelt, kalibriert und später zur online Anpassung während des Trainings verwendet. Die "natürliche" Laufgeschwindigkeit des Nutzers wird aus der Referenzmessung des Abstandes von Nutzer und RoboTrainer bestimmt, wobei der RoboTrainer durch Anpassung der Geschwindigkeit versucht, diesen Abstand einzuhalten. Die Ergebnisse des zweiten Verfahrens wurden dann für eine neuartige nichtlineare Adaption der Admittanzregelung anhand der aktuellen Robotergeschwindigkeit verwendet. Bei einer kraftbasierten Interaktion mit einem aktiven System kann es bei bestimmten Verhaltensweisen des Nutzers zu Schwingungen bzw. Instabilitäten des Mensch-Roboter-Systems kommen. Hierfür wird die Interaktionsenergie bestimmt und so adaptiert, dass diese immer vom Menschen zum RoboTrainer fließt, wodurch das System ein Aufschaukeln vermeiden kann. Hierfür wurde auch ein Verfahren zur Erkennung spontaner Richtungswechsel durch den Nutzer entwickelt, da dieses die unnötige Verlangsamung des RoboTrainers

in einem motorisch-anspruchsvollen Training verhindert. Als letzter Teil der Regelung wurde die bestehende Bewegungsbibliothek mit "Bausteinen" für unterschiedliche Trainingsszenarien erweitert. Diese Bausteine können während der Interaktion aktiviert werden und dienen dazu, das Verhalten des Roboters für den Nutzer unvorhersehbar zu gestalten und ihn mental und physisch zu fordern. Beispiele dafür sind virtuelle Hindernisse, die im realen Raum nicht existieren, aber sich abstoßend auf den RoboTrainer auswirken, oder Kräfte, die versuchen, den RoboTrainer vom vorgegebenen Pfad zu „drängen“, wodurch ein Nutzer wiederum durch Ausgleichsbewegungen korrigierend eingreifen muss.

Im Projekt wurde insbesondere eine neue Version des RoboTrainers entwickelt, die eine ergonomische Anpassbarkeit an die unterschiedlichen Bedarfe der Nutzer ermöglicht. Eine wichtige Eigenschaft war hierbei die werkzeuglose Anpassung der Grundfläche, wodurch wahlweise entweder eine bessere Unterstützung und Stabilität, oder eine höhere Agilität erreicht werden kann. Außerdem wurde bei der Entwicklung insbesondere auf die Sicherheit des Nutzers geachtet. Daher bietet das System den Eingriff durch dritte Personen mittels eines drahtlosen Not-Aus. Der RoboTrainer v2 zeichnet sich auch durch einen modularen Aufbau aus, der die Erweiterung mit Sensoren oder Rechneinheiten ohne großen Aufwand ermöglicht.

5.3.3 Manipulator

Da die Mensch-Roboter-Interaktion der wichtigste Punkt des Projektes ist, haben alle Projektpartner durch die Zusammenarbeit ein dynamisches Menschmodell als zentrale Funktionalität der Wissensbasis identifiziert und entwickelt. Das entwickelte Menschmodell dient als Basis für die Menscherkennung, eine der Hauptfunktionalitäten des Robotersystems.

Um eine stabile Menscherkennung zu entwickeln, wurden eine Reihe von verschiedenen Ansätzen und Verfahren untersucht und analysiert. Als Ergebnis ergibt sich, dass der Machine-Learning-basierte Ansatz bei der Menscherkennung viele Vorteile bringt und ermöglicht, diese Funktion sehr robust zu realisieren. Das entwickelte System ist in der Lage, eine Vielzahl von Menschen pro Szene mit einer großen Menge von Verdeckungen zu detektieren.

Da das Dualarm-Robotersystem über eine 3D-Kamera verfügt, die sowohl Farb- als auch Tiefenbilder generiert, wurde ein Software-Modul entwickelt, die diese Kombination ausnutzt und das die folgenden Funktionen umfasst: Erkennung des Menschen, welcher sich am nächsten zum Roboter aufhält, Berechnung der einzelnen Segmente und 3D-Pose des Menschen und die Bestimmung der relevanten Gelenkwinkel des Menschen.

Das gekoppelte System (aus einer mobilen Basis und zwei Roboterarmen) weist sehr unterschiedliche Dynamik und Massen auf. Als Kandidat für eine Regelungsstrategie wurde das Prinzip der Makro-Mini-Manipulation identifiziert. Hier werden die Redundanzen des kombinierten Systems so genutzt, dass die unterschiedliche Dynamik der Komponentensysteme optimal ausgenutzt werden kann. Gleichzeitig wird die Endeffektormasse (also die gefühlte Masse, die ein Benutzer spürt, wenn er mit dem System interagiert) optimiert. So kann dem Benutzer unabhängig von der Roboterstellung ein bestimmtes Verhalten präsentiert werden.

Grundsätzlich ist mit den Regelungsalgorithmen eine Realisierung von Mensch-Roboter-Kollaborationsszenarien möglich, welche Aufgaben wie Lastaufteilung zwischen Roboter und Mensch oder auch das Handführen von großen und/oder schweren (mobilen) Manipulatoren beinhalten.

5.3.4 Intuitive Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche für die unterschiedlichen Systeme muss zwei Zielgruppen mit unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden: Therapeuten und Nutzern. Therapeuten nutzen einen administrativen Teil zur Bearbeitung, Auswahl und Auswertung von Szenarien, Probanden, Trainings und anderen Therapeuten. Sowohl Probanden als auch Therapeuten nutzen die Echtzeit-Darstellung während des Trainings, allerdings mit unterschiedlichen Perspektiven. Für die Probanden ist die Darstellung im Wesentlichen eine Motivationshilfe, für die Therapeuten bietet sie Kontrolle und eine Datenbasis für die Unterstützung des Trainings.

Um diesen Perspektiven gerecht zu werden, stellt das Trainings-UI einen Mix dar zwischen Parameter-Ansicht und grafischer Darstellung mit Gamification-Elementen (siehe Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2: Frühes Konzept für den Trainingsscreen im Stationären System RoboGym.

Die konzeptionellen Rahmenbedingungen erforderten eine Benutzeroberfläche, die für die Touch-Bedienung optimiert wird, um direkt am Trainingsgerät verwendet werden zu können. Die Relevanz der Trainings-GUI ist für das Stationäre System sehr hoch, für das Mobile System eher ergänzend, und beim Manipulator gering, da hier der Proband mit der Aufgabe völlig ausgelastet ist, keine Hände frei hat und den Blick auf die Umgebung richtet. Hier kamen nur simple grafische Hinweise und unterstützendes Audio infrage.

Der administrative Teil der Benutzeroberfläche konnte für alle drei Systeme eine identische Basis verwenden, die sich in den Trainingsszenarien und in relevanten Probandendaten unterscheidet.

Technisch wurde zunächst Unity 3D als Plattform angenommen, das für die benötigte Echtzeit-3D Darstellung prädestiniert ist. Als Gaming-Engine liegt der Fokus allerdings so stark auf 3D, dass die benötigten 2D-Interfaces nur mit großem Aufwand umgesetzt werden konnten. Im Projektverlauf erfolgte eine Neuorientierung mit dem Ergebnis, dass die GUI durchgängig auf Javascript basiert (siehe Abbildung 5.3).

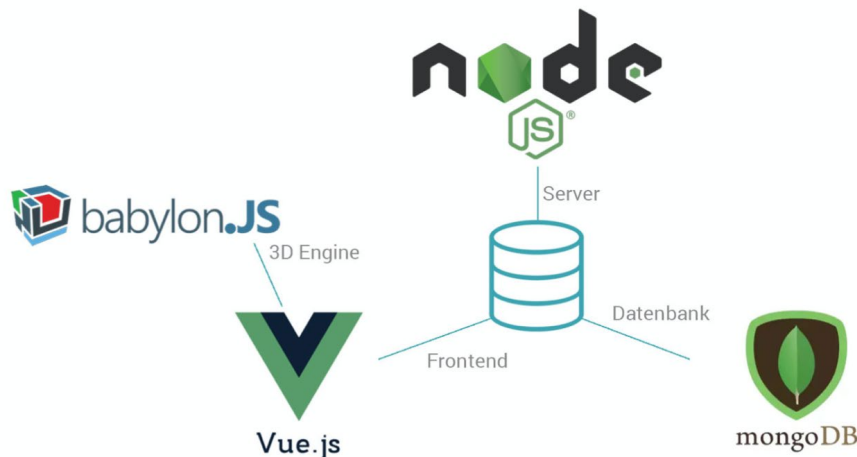


Abbildung 5.3: Technische Komponenten der Benutzeroberfläche

Als 3D-Engine kam die Bibliothek `babylon.js` zum Einsatz, die Web GL direkt im Browser darstellt und dabei fortgeschrittene Techniken wie physikalische Shader und Mesh-Skinning zulässt. Dadurch konnte der 2D Teil der GUI in HTML umgesetzt werden, was vor allem für den administrativen Teil den Vorteil bietet, dass benötigte Formulare besser unterstützt werden als in einer Gaming Engine wie Unity 3D. Als Framework für die HTML-Oberfläche wurde `Vue.js` verwendet. Die Kommunikation mit API und damit der `mongoDB`-Datenbank erfolgt über einen `node.js` Server mit `express` Framework.

Tests mit dem Projektpartner KIT und der Mobilien Plattform führten dazu, dass die Kommunikation zwischen Robotersystemen und GUI per OPC UA-Protokoll erfolgt. Die verwendete Bibliothek, `node-opcua`, kann nur auf dem Webserver laufen, nicht direkt innerhalb der GUI. So existieren neben dem API-Server noch der OPC UA-GUI-Connector, der als OPC UA Client für die OPC UA Server der Robotersteuerungen im stationären und mobilen System fungiert. Zum Manipulator ist keine direkte Verbindung per OPC UA nötig. Hier übergibt das System direkt an eine abgekapselte GUI einen Parameter, der über einfache Screens den Zustand des Roboters anzeigt.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Wissensbasis

Das Menschmodell der Wissensbasis kann in mehreren Individualisierungsstufen auf den Patienten parametrisiert werden. Die erste Stufe beinhaltet eine allgemeine Skalierung auf die Körperhöhe und das Gewicht des Trainierenden bzw. Patienten. In

der zweiten Stufe wird das Modell zusätzlich durch funktionelle Gelenkzentren und Segmentlängen ergänzt. Dazu werden zuvor aufgenommene Referenzbewegungen des Patienten benötigt, auf deren Grundlage die funktionellen Gelenkzentren mit der SCoRE Methode berechnet werden (Taylor et al., 2010). Nach Eintrag der anthropometrischen Daten (z. B. Beinlängen, Körperhöhe, Körpergewicht) und der Messdaten erfolgt die Parametrierung automatisiert. Für die nächste Individualisierungsstufe können patientenspezifische Knochengeometrien aus der medizinischen Bildgebung in das Modell integriert werden. Dieser Vorgang kann, im Gegensatz zu den oben genannten Individualisierungsstufen, nicht automatisiert erfolgen. Alle Einzelkomponenten liegen jedoch für weitere Entwicklungsschritte bereit. Das Real-Time OpenSim Tool (RTOSIM) von Pizzolato et al. (2016) bestehend aus der Real-Time-Anwendung der inversen Kinematik und der inversen Dynamik, wurde als Kernprozess der Wissensbasis integriert.

5.4.2 Stationäres System

Der schlussendlich für das Training verwendete Roboter ist ein Industrieroboter der Firma KUKA vom Typ KR 160 R1570 nano, der über eine serielle Kinematik mit sechs Achsen verfügt. Am Roboterflansch ist eine Kraftmessplatte (BP400600HF, AMTI) befestigt, welche die resultierenden Kräfte in X-, Y- und Z-Richtung aufzuzeichnen, sowie das Drehmoment um jede der Achsen berechnet. Es wurden zwei grundlegend verschiedene kraftbasierte Trainingsmodi realisiert: Isotonisches Training, bei dem die Last konstant bleibt, und isokinetisches Training, bei dem mit konstanter Bewegungsgeschwindigkeit trainiert wird (Ketelhut et al. 2018; Kolditz et al. 2016). Für jede neue Trainingskonfiguration können die Sicherheitsbereiche und Bewegungstrajektorien des Roboters individuell angepasst werden. Dazu verfährt der Bediener (Operator) den Roboter mit dem Bedienpanel in die jeweiligen personenspezifischen Positionen und speichert diese.

Die zugelassenen Bewegungsräume des Roboters wurden modellbasiert bestimmt. Dazu wurde der Roboter in das Kollaborationsmodell integriert und das Menschmodell auf die Körpermaße eines kleinen (5. Perzentil) und großen (95. Perzentil) deutschen Menschen nach DIN33402-2 parametrisiert. Die Bewegungs- und Arbeitsräume wurden vollständig definiert und können somit als sicher angenommen werden. Für das stationäre System (siehe Abbildung 5.4 unten) wurde ein Workflow erarbeitet, der zwei prinzipielle Operationsmodi zulässt (Göll et al., 2019; Göll et al. 2018). Erstens eine rein visuelle Darstellung des Trainings für den Trainierenden und den Trainer bzw. Therapeuten. Zweitens einen automatischen Modus des Roboters, in dem die Modulation des Adapters durch die lernende Regelung übernommen wird. Beide Modi können und sollen während der Rehabilitation kombiniert genutzt werden.



Abbildung 5.4: Integration der RoboGym Trainingsplattform in den Versorgungsalltag von trainierenden Personen. Direktes Biofeedback über gelenkspezifische Belastung erfolgt direkt über das Display oder via Operator.

Abbildung 5.5 zeigt exemplarisch ein Eingangsbild mit 2D-Keypoints (links) sowie die 3D-Rekonstruktion des Eingangsbildes (rechts) des entwickelten markerlosen Systems. Dafür werden zunächst die 2D-Koordinaten der Gelenkzentren durch ein Mask R-CNN lokalisiert. Darauf basierend werden die 3D-Koordinaten mit der VideoPose3D-Methode geschätzt, wobei dilated convolutions zur Berücksichtigung zeitlicher Informationen verwendet werden.

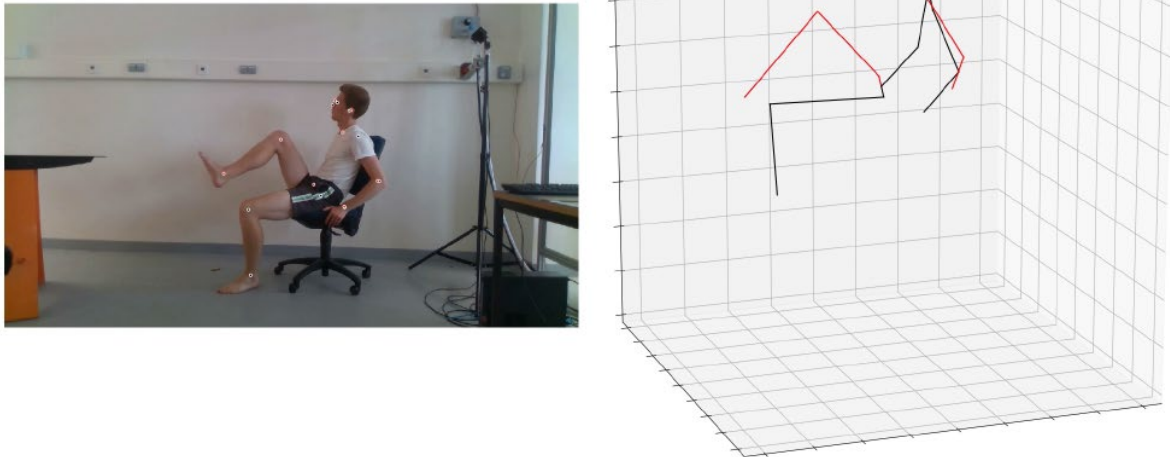


Abbildung 5.5: Eingangsbild mit 2D-Keypoints (links) und daraus rekonstruierte 3D-Darstellung (rechts).

Zur Schätzung des Knieadduktionsmoments sind vor allem die Gelenkzentren der Hüfte, des Knies und des Knöchels relevant. Die Abweichungen des Gelenkzentrums im Knie in Kartesische X-, Y- und Z-Richtung sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

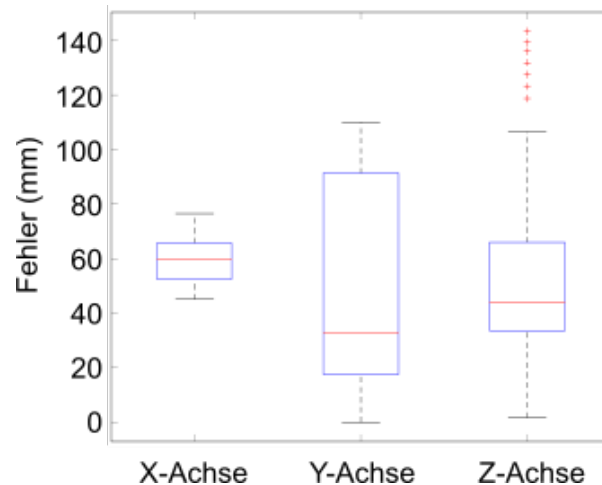


Abbildung 5.6: Abweichung des Gelenkzentrums im Knie in X-, Y- und Z-Richtung zwischen dem markerbasierten Infrarotkameranystem und dem entwickelten kostengünstigen, markerfreien System basierend auf maschinellen Lernverfahren.

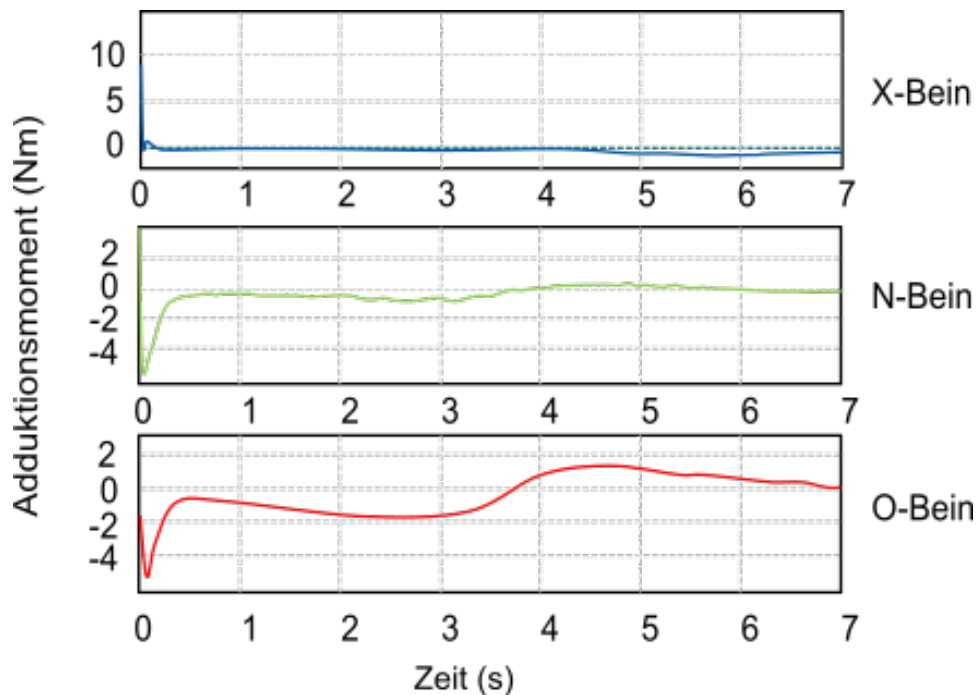


Abbildung 5.7: Externes Knieadduktionsmoment während des Neuromuskulären Trainings mit dem Stationären System für einen Probanden mit X- (oben), O- (unten) und Normalbeininstellung (Mitte) im ersten Zyklus.

Ein reduziertes neuromuskuläres Modell des Menschen für das stationäre System dient zur Schätzung der Belastung des Patienten für die Echtzeit-Regelung während des Trainings. Dieses wurde bereits während der simulativen Validierung der entwickelten Regelungsstrategie verwendet. Darüber hinaus wurden auch erste experimentelle Erprobungen damit durchgeführt.

Die simulativen Ergebnisse der modellprädiktiven Regelung für einen Probanden mit Genu varum (X- Bein), Genu valgum (O- Bein) und normaler Beinachse (N-Bein) sind in Abbildung 5.7 gezeigt. Während die modellprädiktive Regelung den Fehler bereits im ersten Zyklus deutlich reduzieren kann, treten aufgrund der Modellungenauigkeiten Regelabweichungen auf, die die modellprädiktive Regelung nicht kompensieren kann. Die iterativ lernende Regelung hingegen braucht mehrere Zyklen, um den Fehler zu minimieren. Dafür treten jedoch keine bleibenden Regelabweichungen auf, da die iterativ lernende Regelung zyklische Störungen kompensieren kann. Die Ergebnisse der iterativ lernenden Regelung wurden auf der IEEE Conference on Control 2019 veröffentlicht und präsentiert (Ketelhut et al., 2019). Aufgrund dieser simulativen Ergebnisse sowie der Vor- und Nachteile beider Regelungsverfahren erscheint eine Kombination beider Regelungsverfahren sinnvoll.

Abbildung 5.8 zeigt die Ergebnisse beider Regelverfahren in der experimentellen Erprobung im Vergleich. Die aufgezeichneten Verläufe des Adduktionsmomentes des Kniegelenks (oben) sowie den zugehörigen Plattenwinkel (unten) während des neuromuskulären Trainings mit dem Stationären System mit der Modellprädiktiven (links) und der Iterativ Lernenden Regelung (rechts) zeigen, dass beide Regelungskonzepte das Adduktionsmoment über die Zyklen deutlich reduzieren. Die Optimierung der Parametrierung und die Testung der Mehrgrößenregelung steht zurzeit noch aus.

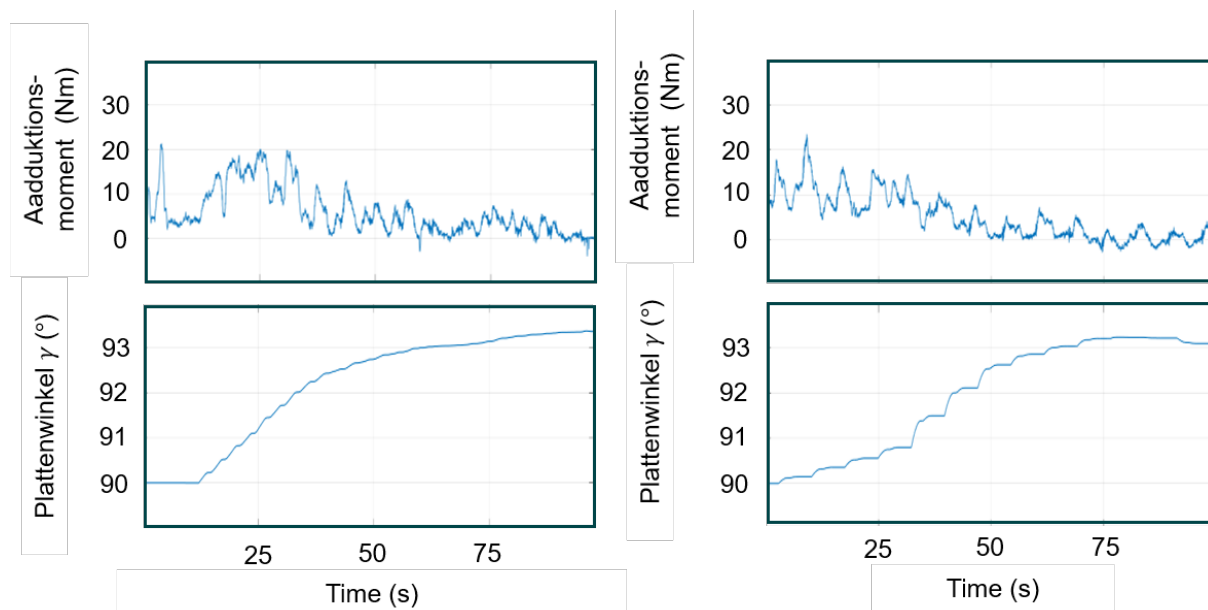


Abbildung 5.8: Externes Adduktionsmoment des Kniegelenks (oben) und Plattenwinkel (unten) während des Neuromuskulären Trainings mit dem Stationären System mit der Modellprädiktiven (links) und der Iterativ Lernenden Regelung (rechts)

5.4.3 Mobiles System - RoboTrainer

Die Hauptherausforderung bei der Erfassung der 3D-Position des Nutzers liegt in der kurzen Distanz zum RoboTrainer (ca. 60 cm) und der dadurch resultierenden ungünstigen Teilsicht auf den Nutzer. Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 (links) zeigen Momentaufnahmen eines Nutzers mit den Kameras des RoboTrainers. Beide Kameras am mobilen System sind Asus Xtion Pro live.

Existierende Methoden zur Bestimmung der 3D-Position des Oberkörpers haben sich nur bedingt anwendbar gezeigt. Der von KUKA entwickelte Algorithmus für die Posendetektion des Menschen zeigt dabei das geringste Rauschen und die geringste Varianz in der Verarbeitungsdatenrate. Allerdings ist die Verarbeitungsdatenrate von weniger als 10 Hz für eine aussagekräftige Erfassung zu gering.

Der am IPR entwickelte Algorithmus zur Bestimmung der 6D-Pose der Füße zeigt sehr gute Ergebnisse im Vergleich zum Referenzsystem Vicon⁸. Abbildung 5.10 zeigt das 2D RGB-Bild (links) und die Punktwolke (rechts) mit den ermittelten Positionen der Füße und Unterschenkel des Nutzers. Bei der Evaluation wurden die Daten mit folgender Genauigkeit bestimmt: Zeh $16 \pm 0,5$ mm, Ferse 34 ± 27 mm, Sprunggelenk: 36 ± 23 mm, Achse des Unterschenkels $6^\circ \pm 1^\circ$. Dabei ist es wichtig zu erwähnen, dass die Ungenauigkeit der verwendeten Kameras bereits bei ± 12 mm liegt und dass es keine genauere Kalibrierung der Position des Referenzmarkers und des Algorithmus gibt. Der dritte Algorithmus für die Perzeption des Unterschenkels mittels Laserscanner zeigt sehr zuverlässige Ergebnisse, die in den Admittanzregler für die

⁸ Dank an dieser Stelle an das H²T (Hochperformante Humanoide Technologien) des KIT für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Parameteranpassung eingehen. Abbildung 5.11 zeigt die verschiedenen Verarbeitungsstufen dieses Algorithmus.

Die Laufparameter des Menschen wurden aus den bisher erwähnten Algorithmen zur Posenbestimmung und der gemessenen Eingabekraft des Nutzers bestimmt. Die Daten wurden dann gegen das Referenzsystem verglichen. Bei einer Kadenz am Testparkour zwischen 1,1-1,3 Hz des Probanden wurden folgende Abweichungen bestimmt: Eingabekraft: 0.12 ± 0.012 Hz, Laserscanner: 0.05 ± 0.001 Hz, Position der Fußspitze: 0.07 ± 0.002 Hz, und Schulterposition: 0.13 ± 0.011 Hz. Die in den Methoden erwähnte Bestimmung der Gangphasen allein aus der Eingabekraft des Benutzers hat sich als unzuverlässig gezeigt.



Abbildung 5.9: Momentaufnahme der Punktwolke (links) und 2D RGB-Bild (rechts) aus Sicht der Oberkörperkamera des mobilen Systems. Die Koordinatensysteme zeigen die Position der Kamera. Dieses Bild entstand während der Evaluation mit einem Vicon System. Letzteres ist anhand der Marker auf der Versuchsperson erkennbar.

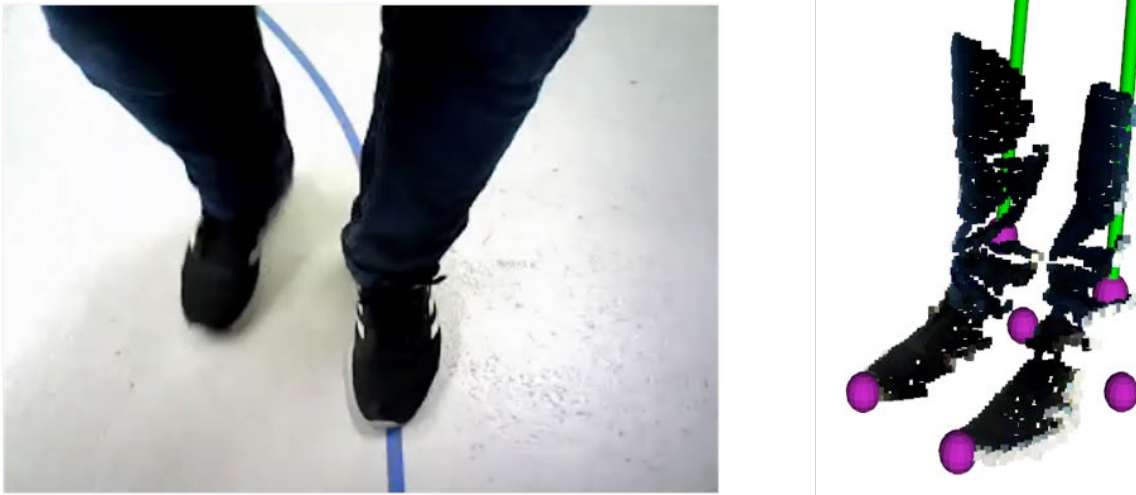


Abbildung 5.10: Der Blick aus der Perspektive der Kamera für die Verfolgung der Fußbewegungen. Links: 2D RGB Bild; Rechts: Darstellung der Punktwolke und daraus gewonnenen Positionen der Fußspitzen, Fersen und Sprunggelenke, welche gekennzeichnet sind durch Kugeln (lila), und der Mittelachsen (grüne Linie) der Unterschenkel.

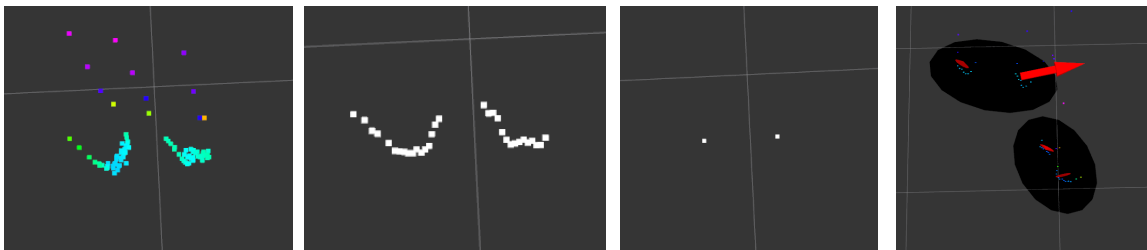


Abbildung 5.11. Algorithmus für die Verfolgung von Menschen in der Umgebung des mobilen Systems. Links: Messungen aus den Laserscannern; Mitte links: gefilterte und geclusterte Daten mittels GNN (global nearest neighbour); Mitte rechts: Mittelpunkte der einzelnen Cluster (Unterschenkel) berechnet mittels RANSAC-Verfahren; rechts: mittels Kalman Filter bestimmte Position (Ursprung der Pfeilen) und Geschwindigkeit (Länge der Pfeilen) der Beine einer Person (dunkles Oval). Im Beispiel zeigt die Erkennung der Beine zweier Personen.

Mit dem Ziel, die automatische Anpassung des mobilen Systems an den Nutzer zu evaluieren, wurden die zwei entwickelte Parametrierungsverfahren von 22 Benutzer in einem kurzen Parkour getestet und bewertet. Insgesamt wurden beide Verfahren als intuitiv und nicht komplex bewertet. 19 Probanden bewerteten das Verhalten des RoboTrainers nach der automatischen Parameteranpassung als "besser". Die mit dem RoboTrainer aufgenommenen Daten zeigten auch, dass Benutzer mit den individualisierten Parametern den Parkour schneller und auch genauer bewältigen konnten. Hierbei erhöhten sich die Abweichungen zwischen den Nutzern hinsichtlich der Interaktionskräfte. Dieser Anstieg lässt auf eine individuellere Art, wie Nutzer mit dem System interagieren, schließen.

Mit dem Ziel, die gefühlte Sicherheit zu erhöhen und das Interaktionsverhalten des Systems zu verbessern, wurde ein Ansatz gewählt, bei dem sich das System steuerungstechnisch passiv verhält und sich damit nicht aufschaukeln kann. Die Einflüsse des entwickelten Passivitätsansatzes wurden qualitativ und quantitativ mit Hilfe des RoboTrainers getestet und ausgewertet und zeigten ein besseres Verhalten als vergleichbare Verfahren im Stand der Technik (Stogl, 2020).

Eine bereits zuvor vorhandene Bibliothek mit Trainingsbausteinen wurde durch die folgenden Bausteine erweitert: virtuelle Wände, virtuelle Bereiche und Pfadverfolgung (Stogl et al. 2019). Die virtuellen Wände ermöglichen die Definition von Hindernissen in der Trainingsumgebung, die der Nutzer mit dem RoboTrainer nicht durchfahren kann und zwischen denen er navigieren soll. Die virtuellen Bereiche ermöglichen eine generelle ortsabhängige Änderung des Verhaltens des RoboTrainers. Unter anderem sind Beispiele hierfür die Beschränkung der Bewegungsfreiheit des RoboTrainers (z. B. Rotation ist nicht möglich / eingeschränkt), die Reduzierung der Geschwindigkeit, die Simulation eines erhöhten Robotergewichts. Die Pfadverfolgung hilft dem Nutzer, den vordefinierten Pfaden im Raum leichter folgen zu können. Dies hat sich insbesondere bei der erstmaligen Interaktion eines Nutzers mit dem System als sehr hilfreich herausgestellt.

Der RoboTrainer v2 mit Nutzer ist in Abbildung 5.12 (links) abgebildet. Abbildung 5.12 (rechts) hebt alle wesentlichen Teile des RoboTrainers hervor. Die Basis besteht aus einer omnidirektionalen mobilen Plattform mit einer verstellbaren Grundfläche. Die Maße des RoboTrainers in der kleinsten und größten Konfiguration der Grundfläche sind in Abbildung 5.13 dargestellt.

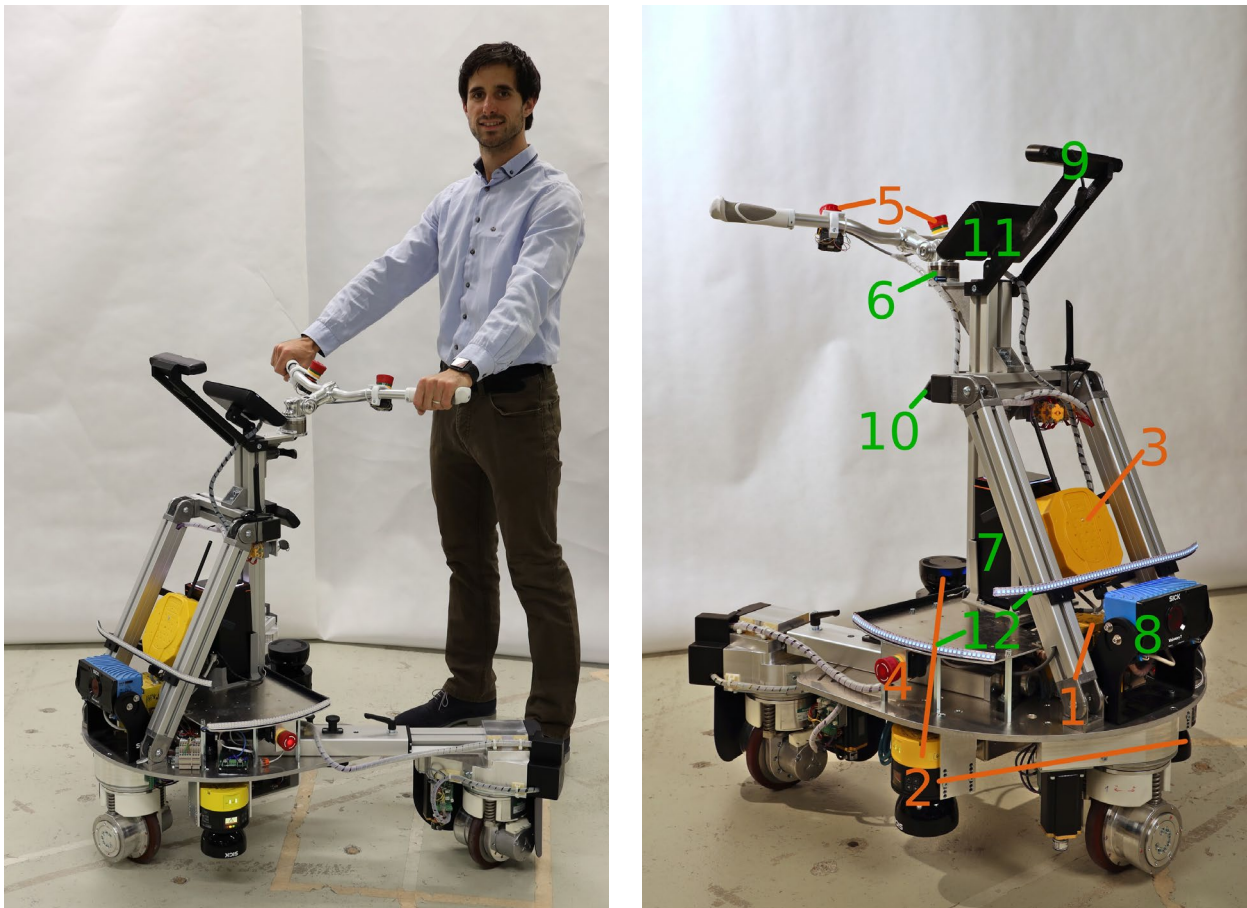


Abbildung 5.12. : Links - RoboTrainer v2 mit Nutzer; rechts - RoboTrainer v2 mit gekennzeichneten Sicherheits- (orange) und nicht-Sicherheitskomponenten (grün). 1 – Safety-CPU; 2 – Safety-Laserscanner; 3 - Empfänger für drahtlosen Not-Aus; 4 - drahtgebundene Not-Aus-Knöpfe an den Seiten; 5 - drahtgebundene Not-Aus-Knöpfe am Lenker für den Nutzer; 6 - Kraft-Momenten-Sensor als Eingabegerät; 7 – Steuerungs-PC; 8 - Tiefenbildkamera für die Umgebung; 9 - Tiefenbildkamera für die Erfassung des Oberkörpers des Nutzers; 10 - Tiefenbildkamera für die Erfassung der Füße und Unterschenkel des Nutzers; 11 - Bildschirm für die Interaktion mit dem Nutzer und Inbetriebnehmer; 12 - LED RGB Streifen als aktuelle Statusanzeige des RoboTrainers.

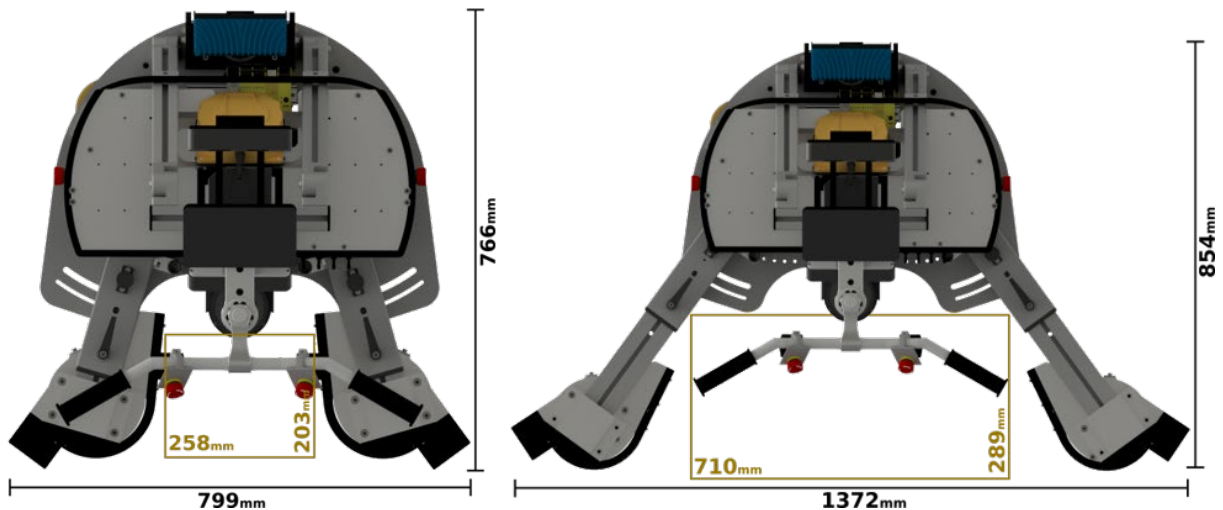


Abbildung 5.13: RoboTrainer v2 in der kleinsten (links) und größten Konfiguration der Grundfläche. Die Außenmaße sind in schwarz markiert und der Bereich zwischen den hinteren Rädern, in dem sich die Füße des Nutzers beim Stehen und Gehen befinden, sind gelb markiert.

5.4.4 Manipulator

Die Regelungsstrategie für den Manipulator muss auf der einen Seite mit Bewegungsredundanzen umgehen können und soll diese auf der anderen Seite auch optimal im Sinne der Unterstützung des Benutzers einsetzen können. Daher wurde zunächst die Berechnung der effektiven Masse des Roboters am Endeffektor, welche ein dort angreifender Benutzer fühlt, implementiert und darauf aufbauend eine optimierende Regelungsstrategie entwickelt, welche in jedem Regelungsschritt die effektive Masse optimieren kann (Abbildung 5.14). Diese Arbeiten führten auch zu einer erfolgreichen wissenschaftlichen Veröffentlichung: „Hand-Guidance of a Mobile Manipulator Using Online Effective Mass Optimization“ bei der ICAR 2019 (International Conference on Advanced Robotics). Neben der Optimierung der effektiven Masse am Endeffektor wurde auch eine Limitierung der maximalen Leistung, welche der Roboter in seinen Achsen aufbringt, eingeführt. Diese führt dazu, dass das Robotersystem auch nahe an Singularitäten stabil operieren kann (hier kommt es ansonsten zu extremen Geschwindigkeitsspitzen in den Robotergelenken, was ein Sicherheitsrisiko in der Mensch-Roboter-Kollaboration darstellt) ohne die Reaktionsfähigkeit und -geschwindigkeit in anderen Bereichen zu beschneiden. Die Regelungsstrategie wurde direkt im Echtzeitteil des Robotersteuerungssystems implementiert und steht somit auch zuverlässig mit den vorhandenen Sicherheitsschaltungen des Roboters zur Verfügung.

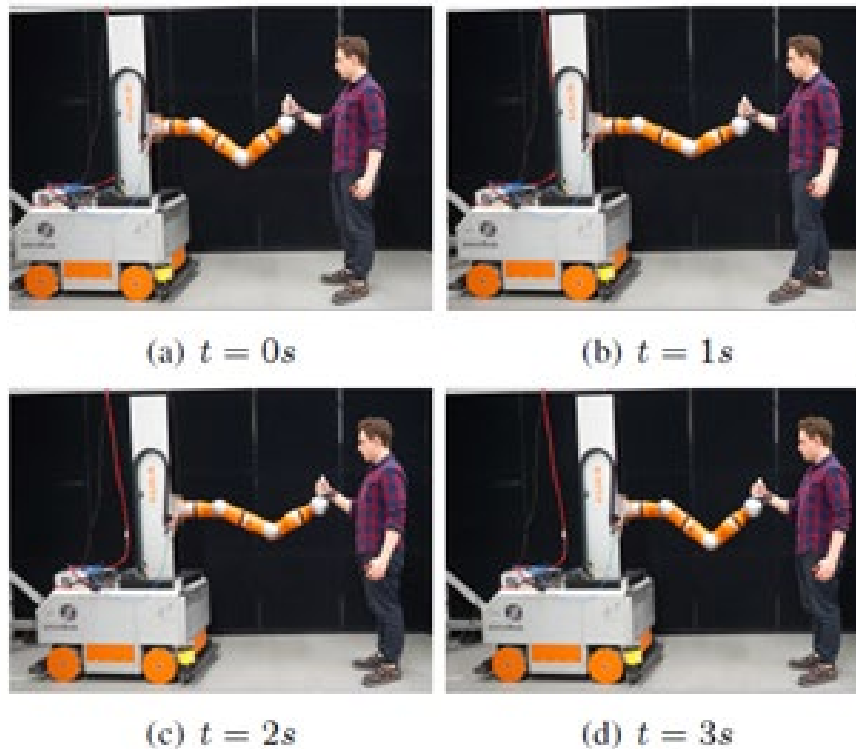


Abbildung 5.14: Regelungsstrategie auf dem Testsystem - (a) Initialkonfiguration, der Mensch bringt eine Kraft auf den Roboter auf; (b) der gesamte Roboter bewegt sich auf den Menschen zu; (c) der Mensch bringt keine Kraft mehr auf; (d) Optimierte Endkonfiguration.

Da im Verbund übertragbare Grundfertigkeiten für alle Robotersysteme entwickelt werden, wurde auch mit dem Projektpartner KIT an der Deutschen Sporthochschule Vergleichsmessungen für die verschiedenen Systeme (Sensoren und Algorithmen) für die Erfassung des Menschen durchgeführt. Gleichzeitig zur Datenaufzeichnung mit den 3D-Sensoren wurde auch die Pose des Menschen durch ein externes Trackingsystem erfasst.

Damit sich der Manipulator bei der Arbeit auf den konkreten Benutzer optimal einstellen kann und dessen Daten aus der Wissensbasis auch verwendet werden können, muss der Nutzer identifiziert werden. Um die Auswahl des Nutzers möglichst einfach zu gestalten und da auf dem System sowieso Kameras verbaut sind, wurde hier eine Gesichtserkennung integriert (s. Abbildung 5.15).



Abbildung 5.15: Identifikation des Nutzers durch Gesichtserkennung (rechts oben) und Erkennung von Gesten (Heben einer Hand)

Die nächste Funktionalität, die auf der Menscherkennung basiert, ist die Intentionserkennung, deren Ziel es ist, die Bewegungsintention des Menschen aus einer Folge von Posen zu bestimmen. Dies erweitert die Menscherkennung insofern, dass nun auch Datenpunkte aus der unmittelbaren Vergangenheit zur Analyse herangezogen werden.

Die Intentionserkennung stellt zudem eine Möglichkeit für die intuitive Steuerung der Roboterapplikation dar. Deshalb wurde ein System implementiert, welches die Definition von grundlegenden Gesten ermöglicht, die dann wiedererkannt werden (s. Abbildung 5.16). Dieses System detektiert definierte Gesten des aktuellen Nutzers und stellt diese dem Programmfluss der Roboterapplikation zur Verfügung. Grundsätzlich können Gesten mit der Hand (Winken, Heben einer Hand, Hände am Tisch, etc.) oder auch mit dem Kopf (z. B. Nicken) durchgeführt werden – es steht hier gesamte Bandbreite der detektierten Menschpose zur Verfügung.

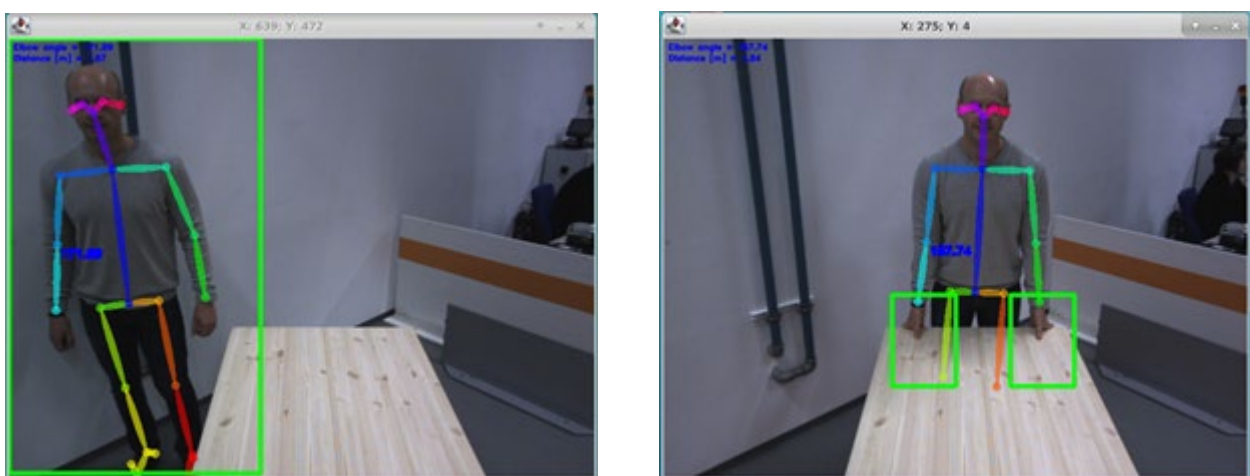


Abbildung 5.16: Nutzung der Menschposenerkennung für die Detektion des Nutzers (links) und für die Bestimmung der Interaktionspose (rechts)

Eine Zwischenevaluierung im November 2019 konnte zeigen, dass das Evaluierungssystem nun grundsätzlich mit den Grundfertigkeiten in der Lage ist, die

gestellte Aufgabe (gemeinsames Tragen eines Tisches) zu erfüllen (s. Abbildung 5.17). Das Evaluierungssystem wurde inklusive des Szenarios bei KUKA intern einem breiten Publikum präsentiert und erfreute sich eines sehr positiven Feedbacks.

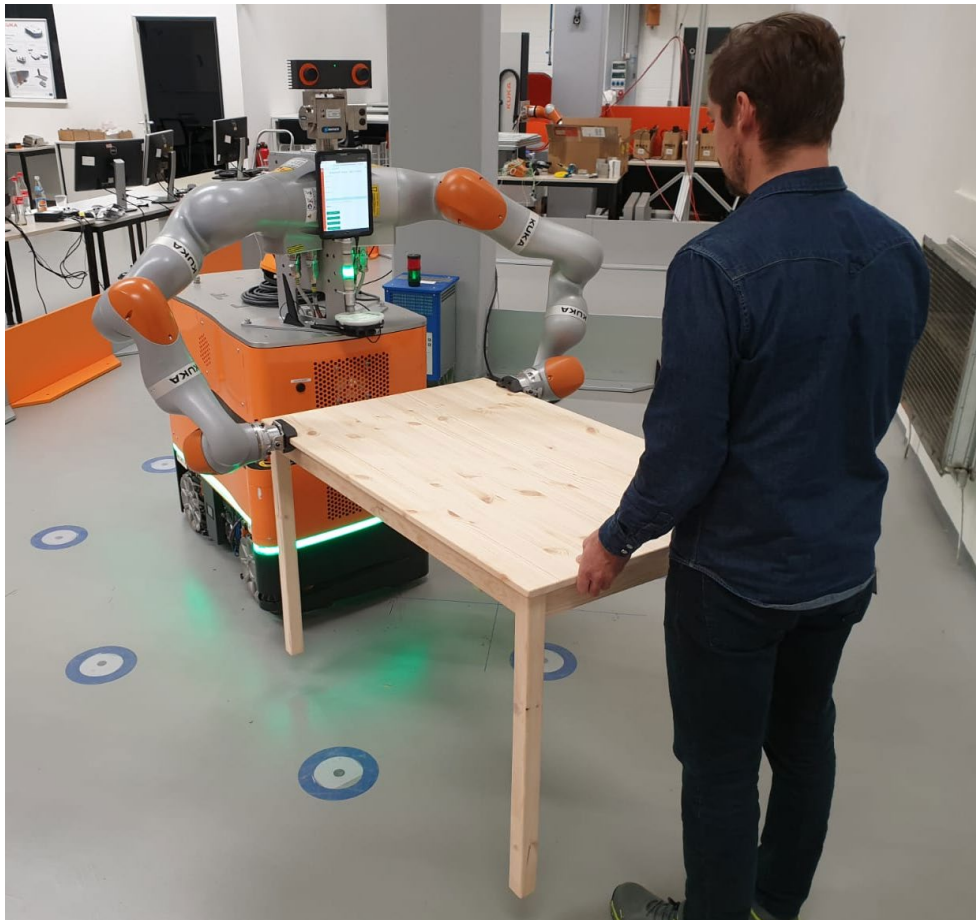


Abbildung 5.17: Gemeinsames Tragen des Tisches mit dem Menschen

5.4.5 Intuitive Benutzeroberfläche

Die gesamte GUI mit ihren einzelnen Modulen Frontend, API, Datenbank und OPC UA-Client läuft in 4 Docker-Containern, also virtuellen Maschinen, die per Docker-Compose gemeinsam gestartet werden können. Dadurch müssen auf den Zielrechnern nur minimal Konfigurationen vorgenommen werden, und die Kompatibilität der einzelnen Module ist gewährleistet. Hintergrund dieser Entscheidung waren Kompatibilitätsprobleme des node-opcua-Pakets auf Systemen bei einzelnen Projektpartnern.

Datenbank und API liegen dabei entweder lokal im Docker-Container oder auf einem Webserver, was während der Entwicklung ortsunabhängige Datenhaltung ermöglicht. Die Authentifizierung erfolgt per JSON Web Token, der nach erfolgreichem Login generiert wird.

In der Administrationsoberfläche können Trainingsdaten, die per OPC UA an die GUI geliefert wurden, eingesehen werden. Kräfte und Positionen werden in 50 ms Intervallen gespeichert, in der Datenbank abgelegt und im Graph visualisiert

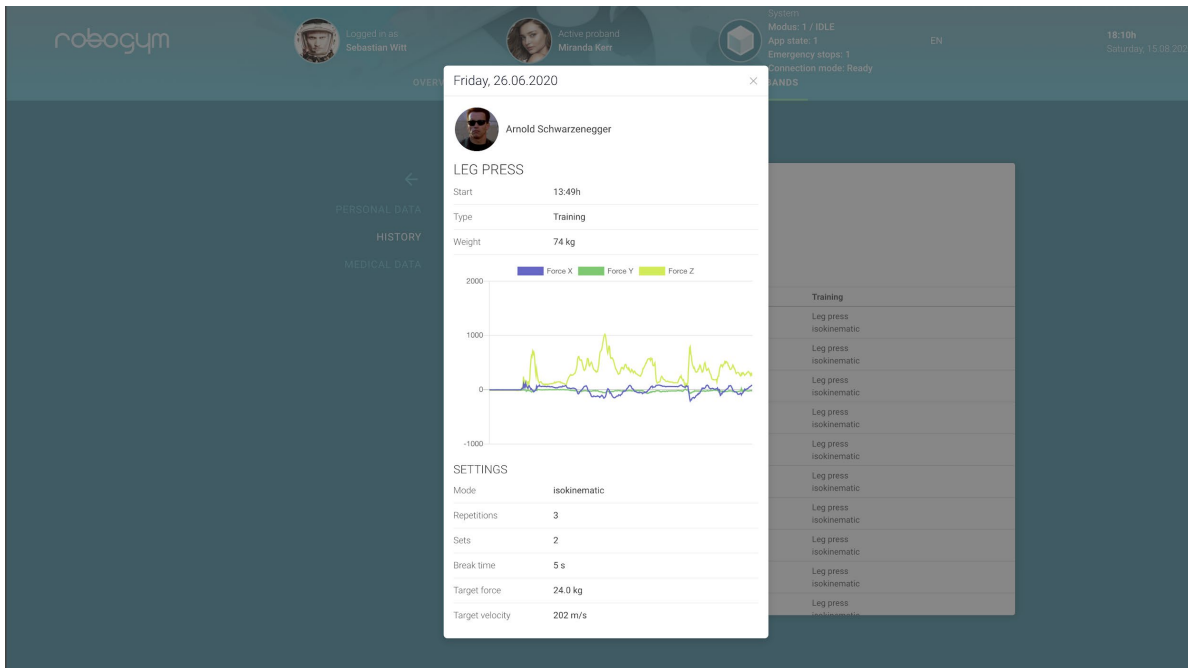


Abbildung 5.18: Auswertung eines Trainings

Die Visualisierung der Trainings erfolgt beim Stationären System mit einem 3D-Avatar, beim mobilen System in der Art eines Navigationssystems, und beim Manipulator über stark vereinfachte Zustandsanzeigen.

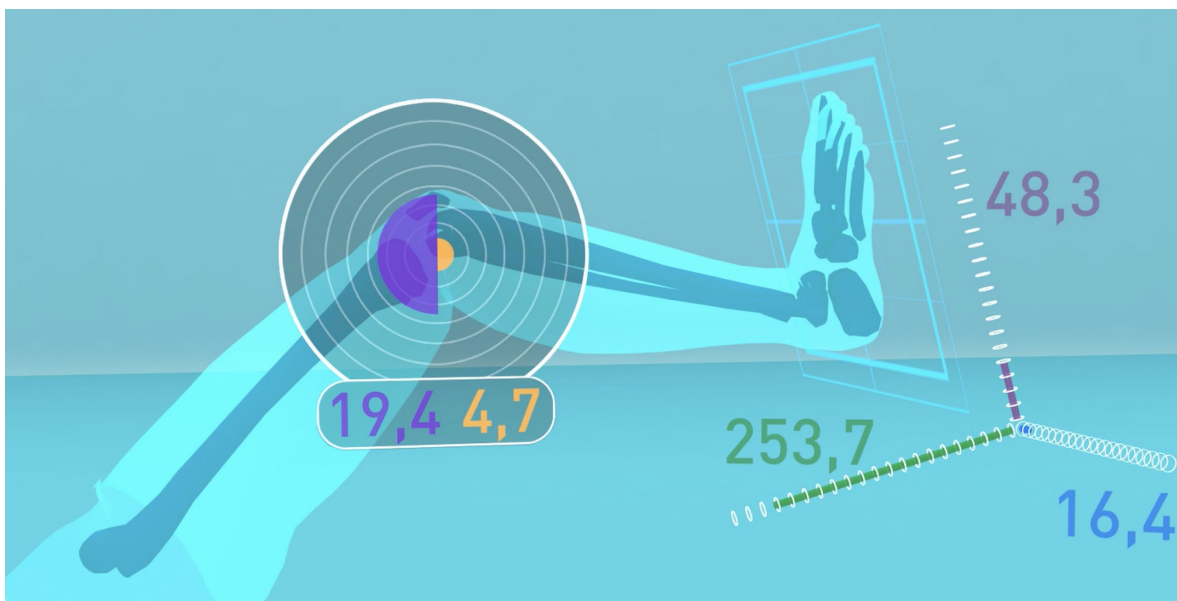


Abbildung 5.19: Visualisierung von Kräften und Momenten in einem Mix aus 2D- und 3D-Anzeige

Die Besonderheit beim Mobilem System ist für die 3D-Echtzeitanzeige der virtuelle Parcours. Die Daten für die Parcours wurden bei Projektpartner KIT in einer eigenen Softwarekomponente erzeugt. Sie können in der GUI dargestellt werden.

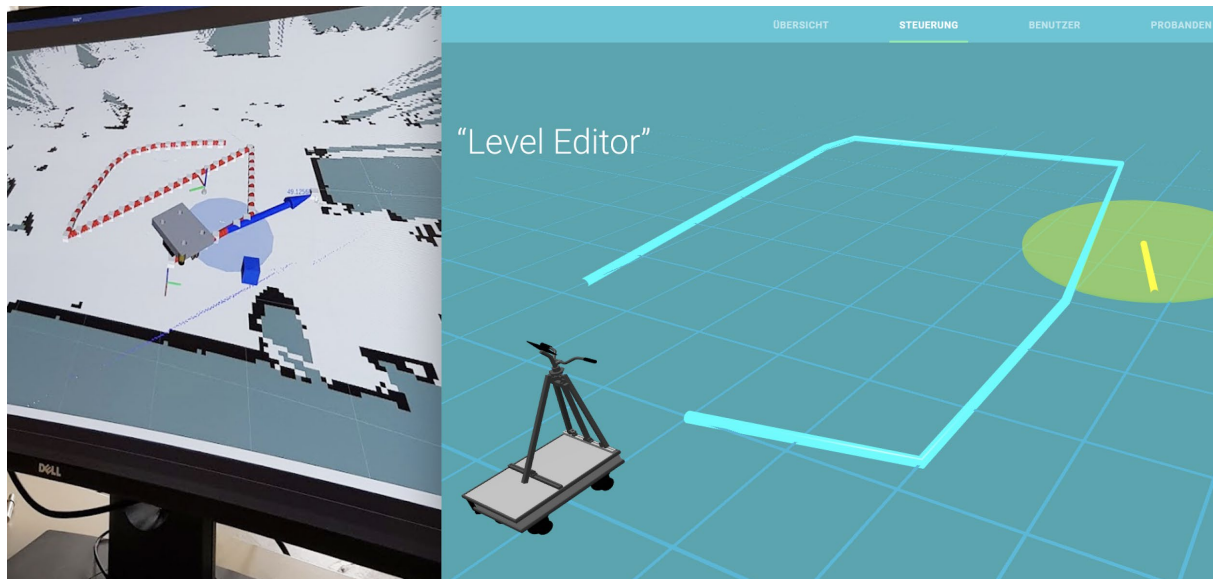


Abbildung 5.20: Parcours-Daten, integriert in die GUI

5.5 Forschungsausblick

5.5.1 Stationäres System

Für die Ziele, die innerhalb dieses Vorhabens anvisiert worden sind, ist jedoch die kinematische und dynamische Erfassung des Menschen ausreichend. Für zukünftige komplexere Anwendungen wäre die Elektromyografie (EMG) Messung sinnvoll, um beispielsweise einzelne Muskelgruppen anzusteuern.

Die Ergebnisse der ersten Erprobung einer iterativ lernenden und einer modellprädiktiven Regelung zur Reduzierung der Belastung des Kniegelenkes in Form des Adduktionsmomentes sind vielversprechend. Untersuchungen zur Kombination beider Regelungsverfahren werden als vielversprechend erachtet, um die Vorteile beider Verfahren zu nutzen.

5.5.2 Mobiles System

Für eine robustere Erfassung des Nutzers wäre in Zukunft der Einsatz eines komplexeren Modells auf Basis der Datenfusion mehrerer Sensoren vorteilhaft. Die größte Herausforderung ist dabei die effiziente Gestaltung der Algorithmen, so dass man einerseits eine hohe Datenverarbeitungsrate erzielt und zum anderen die begrenzten Rechenkapazitäten des RoboTrainers einhält. Ein komplexeres Modell würde auch den Einsatz komplexerer Regelungsansätze erlauben, wodurch ein noch besser an individuelle Nutzer angepasstes Verhalten erzielt werden kann. Im aktuellen Entwurf basiert die Regelung auf den Daten eines Kraft-Momenten-Sensors und dem aus Laserscanner ermittelten Abstand der Unterschenkel des Nutzers. Weiterhin kann das Sicherheitskonzept mit kapazitiven Sensoren in den Griffen erweitert werden. Hierdurch ließe sich beispielsweise die Steuerung des RoboTrainers dahingegen einschränken, dass das System sich nur unter Verwendung beider Hände bewegen lässt. Zudem sollten die individuellen Effekte des Trainings für einzelne Zielgruppen, z. B. gesunde Menschen und Menschen mit unterschiedlichen kognitiven und körperlichen Beeinträchtigungen, in größeren Langzeitstudien evaluiert werden.

5.5.3 Manipulator

Die Intentionserkennung, die im Projekt verfolgt wurde, hat nur eine Basisfunktionalität, z. B. Gestenerkennung, etc. Die Projektpartner haben vor, die Stand-der-Forschung-Methoden, wie Deep Learning, zu verfolgen und die Funktionalität zu erweitern.

Die im RoSylerNT entwickelten Ansätze zur Redundanzoptimierung einer Mobilen Zweiarmkinematik (s. Abbildung 5.21) bilden die Grundlage für weitere Manipulations-Grundfertigkeiten. Neben dem gemeinsamen Tragen von Gegenständen zusammen mit dem Menschen, gibt es vielfältige Aufgaben, die zwei Arme erfordern. Hier müssen neben den kinematischen Randbedingungen diverse andere taskspezifische Constraints eingehalten werden. Mittelfristig arbeitet die KUKA an Verfahren, die es erlauben solche Taskconstraints in Form einer Taskbeschreibung intuitiv von Benutzer eingeben zu können.



Abbildung 5.21: Integriertes zweiarmiges mobiles System als Evaluierungssystem

5.5.4 Intuitive Benutzeroberfläche

Die Ergebnisse der Evaluierung werden zeigen, welche Komponenten und Darstellungsmethoden in der GUI von den Zielgruppen angenommen werden. Hier sind auch Anpassungen während der Evaluierung geplant, um in A-B-Tests verschiedenen Methoden vergleichen zu können, beispielsweise die Gewichtung von 2D- und 3D-Elementen.

Der Ausbau von Gamification-Elementen war im Projektrahmen nicht möglich, bietet aber über die Basisfunktionalitäten hinaus starke Möglichkeiten zu Motivation der

Trainierenden. Ein Versuch, der ausgebaut werden könnte, war ein Spiel in Unity 3D, das mit dem Stationären System gesteuert wird.

Die Tracking-Daten der Probanden könnten auch verwendet werden, um in Virtual-Reality Umgebungen einen glaubhaften Avatar darzustellen. Hier könnte ein Hindernis zu Akzeptanz von VR-Anwendungen überwunden werden, denn der fehlende eigene Körper bzw. das fehlende Feedback bei Bewegungen beeinträchtigt die Glaubwürdigkeit von VR-Welten.

Die gewonnenen Trainingsdaten in Kombination mit 3D-Darstellung und 3D-Avataren lassen es auch zu, dass Trainings vollständig wiedergegeben werden können in Form einer 3D-Echtzeit-Simulation. Wie sich solche Darstellungen bei Therapie und Hochleistungstraining verwenden lassen, könnte in Langzeitstudien untersucht werden.

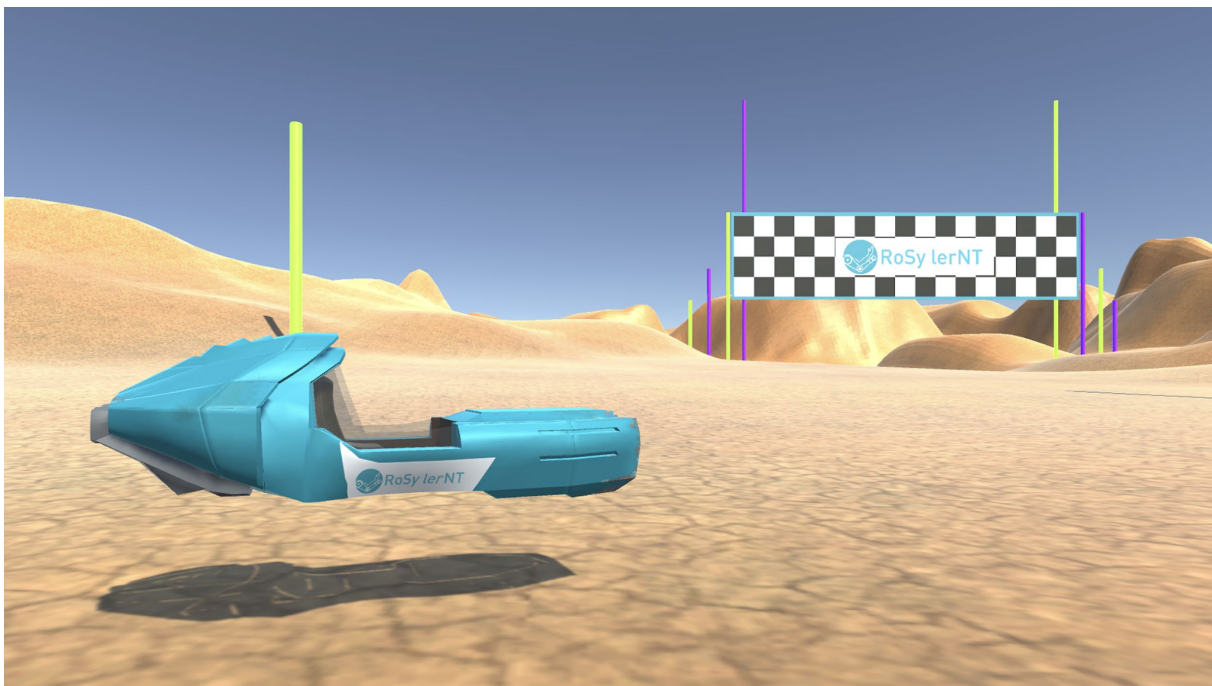


Abbildung 5.22: Über OPC UA gesteuerter Rennspiel-Prototyp

5.6 Implikationen für die Praxis - ELSI

Im Rahmen des RoSylerNT Projekts wurde im ersten Projektjahr eine theoretische Kurzstudie erstellt, die die ethischen, rechtlichen und psycho-sozialen Faktoren der drei verschiedenen Demonstratoren evaluierte. Gleichzeitig dienten die Ergebnisse der Kurzstudie als Grundlage für einen Workshop mit allen Projektpartnern, in dessen Rahmen die Teilnehmer für ELSI Themen sensibilisiert und gemeinsam nach technischen Lösungen für die beschriebenen Herausforderungen gesucht wurden.

5.6.1 Ethische und psycho-soziale Implikationen

Mit dem Ziel der Kurzstudie, konkrete ethische und psycho-soziale Implikationen der drei RoSylerNT-Demonstratoren aufzuzeigen, wurde gleichzeitig auch beleuchtet, vor welche Herausforderungen diese die Gesellschaft stellen können. Bisherige Applikationsfelder, wie beispielsweise in der Industrie, zwangen Entwickler und

Ingenieure bei der Ausgestaltung der technischen Lösung selten zu einer Auseinandersetzung mit ethischen und psycho-sozialen Auswirkungen. Durch den engen Kontakt zum Menschen und die partielle Erweiterung des Einsatzbereichs auf die privaten Räume des Nutzers, ist eine Betrachtung ethischer und psycho-sozialer Folgen der RoSylerNT Demonstratoren unumgänglich.

Der relativen Neuheit des Gebiets der Service-Robotik ist es geschuldet, dass noch kein passendes Konvolut ethischer Prinzipien für den Umgang mit dieser Technik existiert. Für die ethische Reflexion über den Einsatz der Demonstratoren des RoSylerNT Projekts wurde daher das Modell zur ethischen Evaluation sozio-technischer Arrangements (MEESTAR) im Workshop eingesetzt. Ein Charakteristikum dieses Analyseinstruments ist die ausschließliche Betrachtung von negativen Folgen eines Technikeinsatzes. Dadurch, dass lediglich eine neutrale und drei negative Einstufungen verwendet werden, kommt es zu keiner Abwägung von positiven gegen negative Konsequenzen einer Technologie. Das Instrument ist in drei Teile zu teilen und besteht so aus den vier zuvor beschriebenen Stufen der Sensibilität, sieben Bewertungsdimensionen sowie drei Ebenen der Beobachtung (Manzeschke et al., 2013).

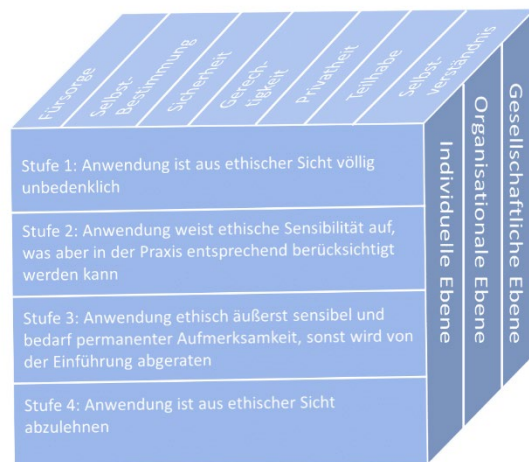


Abbildung 5.23: MEESTAR Modell: x-Achse: Dimensionen der ethischen Bewertung; y-Achse: Stufen der ethischen Bewertung; z-Achse: Ebenen der ethischen Bewertung (Abbildung nach Manzeschke et al. 2013)

Neben den ethischen Implikationen wurden in der Kurzstudie auch mögliche psycho-soziale Implikationen herausgearbeitet. Dabei stellte sich heraus, dass auch ein Erkennen der sozialen und strukturellen Rahmenbedingungen für den Erfolg der Weiterentwicklung der Reha- und Pflege-Robotik maßgeblich sein wird. Die dabei für die drei Demonstratoren maßgeblichen Aspekte wie Akzeptanz, Transparenz, Selbstbestimmtheit und Gerechtigkeit wurden aufgegriffen und zielführend thematisiert. Insbesondere der Megatrend der „Überalterung der Gesellschaft“ nimmt hierbei eine signifikante Rolle ein. Der Pilotstudie im letzten Jahr des Projekts kommt auch dahingehend große Relevanz zu, denn dadurch können spezifischen Erwartungshaltungen bereits im Vorfeld abgefragt werden.

5.6.2 ELSI Workshop mit MEESTAR-Modell und der Zukunftswerkstatt-Methode

Im Laufe eines in der ersten Projekthälfte organisierten Workshops, wurden die in der Kurzstudie erarbeiteten ethischen und psycho-sozialen Implikationen anhand des

MEESTAR- Modells klassifiziert, und in ethisch unbedenkliche und bedenkliche Thesen aufgeteilt. Im Anschluss wurde ein Ranking der ethisch bedenklichen Thesen erstellt und mit der Methode „Zukunftswerkstatt“ nach technischen Lösungen für diese nicht-technischen Herausforderungen gesucht.

Zukunftswerkstatt

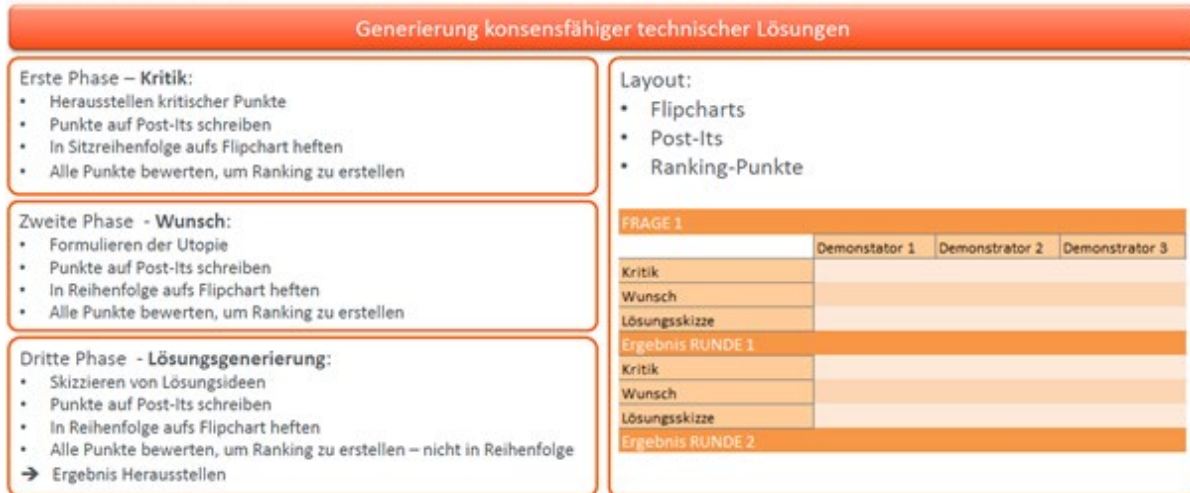


Abbildung 5.24: Überblick der Methode Zukunftswerkstatt und Umsetzung im Workshop

Mit der Methode der Zukunftswerkstatt wurden am Ende drei wesentliche Features herausgearbeitet, die bei den RoSylerNT Demonstratoren wünschenswert wären, um ethische und psycho-soziale Bedenken auszuräumen: Sprachsteuerung und non-verbale Steuerung und die Möglichkeit eines Override-Buttons für den Nutzer. Die Option der non-verbale Steuerung wurde zum Beispiel im dritten RoSylerNT Demonstrator mit dem Use Case des gemeinsamen Tisch Tragens umgesetzt. Die darüber hinaus thematisierten ethischen und psycho-sozialen Implikationen sind für einen erfolgreichen Markteinstieg der verschiedenen RoSylerNT Systeme als relevant erachtet worden und müssen daher bei einer Weiterverwertung der Projektergebnisse beachtet werden.

5.6.3 Rechtliche Implikationen

Über die ethischen und psycho-sozialen Herausforderungen hinaus spielen Fragen betreffend die Haftung sowie den Datenschutz beim Einsatz der drei Demonstratoren eine wichtige Rolle. In diesem Zusammenhang stellen sich insbesondere folgende Fragen:

- Wem kann in einem Schadensfall die Verantwortung zugewiesen werden? Wie wirkt sich der Machine Learning Prozess auf die Verantwortlichkeit des Herstellers oder Betreibers und Nutzers aus?
- Gibt es rechtliche Grenzen der Haftung, wenn der Schadenseintritt objektiv nicht beherrschbar ist?
- Welche Sicherheitsvorkehrungen sind erforderlich, um Schäden zu vermeiden?

Mit der im Projekt erstellten Kurzstudie sowie dem Workshop wurde aufgezeigt, worin die Herausforderungen der Robotik für die Gesellschaft und das Recht bestehen. Einen Schwerpunkt innerhalb der rechtlichen Bewertung robotischer Systeme und deren Vernetzung bilden datenschutzrechtliche Aspekte. Die hierzu erfolgten

Ausführungen haben gezeigt, dass es durchaus rechtliche Instrumente gibt, mittels derer man sich diesen Herausforderungen stellen kann. Vor diesem Hintergrund können insbesondere Maßnahmen des Privacy by Design and Default aber auch des Privacy Preserving Machine Learning eine wichtige Rolle zukommen. Eine Herausforderung stellen jedoch wie im vorliegenden Kontext von lern- und entscheidungsfähigen Robotern die Zurechnung von Schäden dar, die auf robotische Eigendynamik zurückgehen (Lohmann, 2017). Rückblickend ist durch den Machine Learning Prozess eine Feststellung des schadensverursachenden Fehlverhaltens zumeist schwer (Beck, 2012). Nach dem Stand der Technik ist zudem eine vollständige Kontrolle bzw. Überwachung aller Lern- und Problemlösungsfähigkeiten nicht möglich. Trotz Determiniertheit führt das geltende Recht angesichts der besonderen Konstellationen bei Kausalität und Verantwortungszurechnung nicht immer zu sachgerechten Lösungen (Lohmann, 2017). Rechtlich ist vor allem entscheidend, ob der Eintritt des schädigenden Ereignisses bei Anwendung pflichtgemäßer Sorgfalt vorhersehbar und vermeidbar gewesen wäre. Eine einheitliche Beschreibung von Handlung, Kausalität und Konsequenzen ist infolge der steigenden Komplexität sowie Interdependenzen und nichtlinearen Wirkungsketten kaum möglich. Das auf Basis von Klassifizierungsmodellen gelernte Wissen und dessen Auswirkungen auf Entscheidungen im konkreten Kontext sind zumeist nicht vorhersehbar und damit nicht steuerbar (Reichwald et al., 2016). Die Vorhersehbarkeit und Beherrschbarkeit des Risikos ist tragender Gedanke.

Daraus ableiten lässt sich der Gedanke, dass eine nach Risiken klassifizierte Regulierung erforderlich ist. Hiervon abhängig sind spezifische Regelungen zur Haftung ggf. in Verbindung mit Pflichtversicherungen.

Wie dargestellt wirken die sich aus der Nutzung von Robotersystemen ergebenden Herausforderungen über die konservative und konventionelle Perspektive des Rechts hinaus. Die rechtlichen Rahmenbedingungen halten mit dem technologischen Wandel der Robotersysteme nicht Schritt. Bestimmte Rechtsfragen sind nach heutigem Stand noch nicht abschließend geklärt. Dennoch bieten die sich in der Konsultationsphase befindlichen Whitepaper „*Whitepaper on Artificial Intelligence - A European approach to excellence and trust*“ (https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/commission-whitepaper-artificial-intelligence-feb2020_en.pdf) und „*Commission Report on safety and liability implications of AI, the Internet of Things and Robotics*“ (https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/report-safety-liability-artificial-intelligence-feb2020_en_1.pdf) erste Anhaltspunkte einer zukünftigen Regulierung. Diese Regulierungsansätze sind fortwährend im Blick zu behalten.

5.7 Literaturverzeichnis

- Andriacchi, T. P.; Mündermann, A.; Smith, R. L.; Alexander, E. J.; Dyrby, C. O. & Koo, S. (2004). A framework for the in vivo pathomechanics of osteoarthritis at the knee *Annals of biomedical engineering*, Springer, 2004, 32, 447-457
- Beck, S., (2012). *Jenseits von Mensch und Maschine, Ethische und rechtliche Fragen zum Umgang mit Robotern*, 25f.
- Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., Guendelman, E. & Thelen, D.G. (2007). *OpenSim: open-source software to create and*

analyze dynamic simulations of movement. IEE Trans Biomed Eng. 2007 Nov; 54(11):1940-50.

Göll F., Braunstein B., Maike K., Abel D. & Albracht K. (2018). Biofeedback for individualized neuromuscular training and rehabilitation based on musculoskeletal models. Biomedizinische Technik. Biomedical engineering. 2018 Sep 24; 63(S1):S15.

Göll F., Braunstein B., Ketelhut M., Abel D. & Albracht K. (2019). Auf muskuloskelettalen Modellen basiertes Biofeedback für individualisiertes neuromuskuläres Training und Rehabilitation. in 4. Forschungssymposium Physiotherapie: 22. und 23. November 2019; empirische Forschung und Theorieentwicklung verbinden; Abstractband. Deutsche Gesellschaft für Physiotherapiewissenschaft (DGPTW). 2019. S. 32-33.

https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/commission-white-paper-artificial-intelligence-feb2020_en.pdf.

https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/report-safety-liability-artificial-intelligence-feb2020_en_1.pdf.

Irgenfried, S. & Schneider, J. (2016). MAID - Mobilitätsassistent zur Unterstützung bewegungseingeschränkter Personen: Teilvorhaben: Zustands- und intentionsabhängige Steuerung des Mobilitätsassistenten: Abschlussbericht zum Verbundvorhaben. 10.2314/GBV:871706237.

Ketelhut M., Göll F., Braunstein B., Albracht K. & Abel D. (2018). Comparison of Different Training Algorithms for the Leg Extension Training with an Industrial Robot: Current Directions in Biomedical Engineering. Current Directions in Biomedical Engineering. (2018). Sep 24;4(1):17-20. <https://doi.org/10.1515/cdbme-2018-0005>.

Ketelhut, M. Göll, F., Braunstein B., Albracht K. & Abel D. (2019). Iterative Learning Control of an Industrial Robot for Neuromuscular Training. 2019 IEEE Conference on Control 19.08.2019, pp. 926–932.

Ketelhut, M. Göll F., Braunstein B., Albracht K. & Abel D. (2020). Adaptive Iterative Learning Control of an Industrial Robot during Neuromuscular Training. 2020 IFAC World Congress.

Kolditz, M., Albin, T., Brüggemann, G.-P., Abel, D. & Albracht, K. (2015a). Simulative analysis of joint loading during leg press exercise for control applications. IFAC-PapersOnLine.

Kolditz, M., Albracht, K., Fasse, A.; Albin, T., Brüggemann, G.-P. & Abel, D. (2015b). Concept of a Robotic Training System to Enhance Safety of Knee Joint Structures During Rehabilitative Strength Training. Biomedizinische Technik.

Kolditz, M., Albin, T., Abel, D., Fasse, A., Brüggemann, G.-P. & Albracht, K. (2015c). Simulative analysis of joint loading during leg press exercise for control applications. IFAC-PapersOnLine.

Kolditz, M., Albracht, K., Fasse, A., Albin, T., Brüggemann, G.-P. & Abel, D. (2015d). Evaluation of An Industrial Robot as A Leg Press Training Device. 15th International Symposium on Computer Simulation in Biomechanics : 9 th - 11 th July 2015.

Kolditz, M., Albin, T., Brüggemann, G.-P., Abel, D. & Albracht, K. (2016). Robotergestütztes System für ein verbessertes neuromuskuläres Aufbautraining der Beinstrecker.. Special Issue: AutoMed / Olaf Simanski, Thomas Schauer, Robert Riener. at - Automatisierungstechnik.

Kolditz, M., Albin, T., Albracht, K., Brüggemann, G.-P. & Abel, D. (2016). Isokinematic leg extension training with an industrial robot, 6th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2016.

Lohmann, M. (2017). Ein europäisches Roboterrecht – überfällig oder überflüssig? Zeitschrift für Rechtspolitik 6, 168; von Maltzan, S. et. al., 2020. Erklärbare KI – Entmystifizierung der Black Box und Chancen für das Recht, Computer und Recht 1, 66.

Manzeschke, A., Rother, E., Weber, K. & Fangerau, H. (2013). Ergebnisse der Studie "Ethische Fragen im Bereich Altersgerechter Assistenzsysteme", <https://www.technik-zum-menschen-bringen.de/dateien/service/broschuere-ethische-fragen-altersgerechte-assistenzsysteme.pdf>.

Martins, M. M., Santos, C. P., Frizera-Neto, A. & Ceres, R. (2012). Assistive mobility devices focusing on Smart Walkers: Classification and review, vol. 60, pp. 548–562.

McAlindon, T. E., Bannuru, R.R., Sullivan, M. C., Arden, N. K., Berenbaum, F., Bierma-Zeinstra, S. M., Hawker, G. A., Henrotin, Y., Hunter, D. J., Kawaguchi, H., Kwoh, K., Lohmander, S., Rannou, F., Roos, E. M. & Underwood, M. (2014). OARSI guidelines for the non-surgical management of knee osteoarthritis Osteoarthritis and cartilage, Elsevier, 22, 363-388.

Monfeld, C. (2003). Biomechanische Analyse von Trainingsübungen an einer Funktionsstemma in der Rehabilitation nach Knieverletzungen, Dissertation Deutsche Sporthochschule Köln.

Pizzolato, C. Reggiani, M. Modenese, L. & Lloyd D. G. (2017). Real-time inverse kinematics and inverse dynamics for lower limb applications using OpenSim. Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2017 Mar; 20(4):436-445.

Reeves, N. D. & Bowling, F. L. (2017). Conservative biomechanical strategies for knee osteoarthritis Nature Reviews Rheumatology, Nature Publishing Group, 2011, 7, 113-122.

Reichwald, J. & Pfisterer, D. (2016). Autonomie und Intelligenz im Internet der Dinge Möglichkeiten und Grenzen autonomer Handlungen, Computer und Recht 32, 208.

Stogl, D, et al., (2014). A Technical system for physical activation of persons with mild cognitive impairment, Technische Unterstützung für Menschen mit Demenz: HEiKA Symposium.

Stogl, D. et. al. (2019). Overview of a Robot for a Neuromuscular Training – RoboTrainer , 2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR).

Stogl, D., et. al. (2019). Robot-Based Training for People With Mild Cognitive Impairment, IEEE Robotics and Automation Letters 4(2), 1916–1923.

Stogl, D. et. al. (2019). Spatial Control Actions for a Physical Training with a Smart Walker, 2019 International Symposium ELMAR.

Stogl, D. et. al. (2020). Control of a Smart Walker for Training Using Interaction-Energy and Personalized Parameters, 2020 IFAC World Congress

Taylor, W. R., Kornaropoulos, E. I., Duda, G. N., Krutzenstein, S., Ehrig, R. M., Arampatzis, A. & Heller. M. O. (2010). Repeatability and reproducibility of OSSCA, a functional approach for assessing the kinematics of the lower limb. Gait & Posture, 32(2):231–236.

Trepczynski, A.; Kutzner, I.; Bergmann, G.; Taylor, W. R. & Heller, M. O. (2014) Modulation of the relationship between external knee adduction moments and medial joint contact forces across subjects and activities Arthritis & Rheumatology, Wiley Online Library, 2014, 66, 1218-1227.

Zhang, W. et al. (2008). OARSI recommendations for the management of hip and knee osteoarthritis, Part II: OARSI evidence-based, expert consensus guidelines Osteoarthritis and cartilage, Elsevier, 16, 137-162.

6 ASARob – Aufmerksamkeitssensitiver Assistenzroboter

Hannes Bachter, Florenz Graf, Christian Lengenfelder, Jochen Lindermayr, Felix Messmer, Victor Mosmann, Patrick Philipp, Felix Putze, Marija Radic, Daniel Reich, Ulrich Reiser, Massimo Romanelli, Kevin Scheck, Tanja Schultz, Michael Voit, Agnes Vosen

Projektpartner: Fraunhofer IOSB, Fraunhofer IPA, Fraunhofer IMW, Cognitive Systems Lab Universität Bremen, Mojin Robotics, paragon semvox, Klinik für Rehabilitative Geriatrie Diakonissenkrankenhaus Karlsruhe-Rüppurr, GeriNet Leipzig

6.1 Zusammenfassung des Projekts

Das Projektziel des Vorhabens ASARob war die Implementierung einer robusten Aufmerksamkeitserfassung und -lenkung für die Roboter-Mensch-Interaktion. Multimodale Verfahren zur Aufmerksamkeitserfassung und -lenkung wurden hierzu in die bestehende, mobile Roboterplattform Care-O-bot 4 (care-o-bot.de) integriert. Die fusionierten Verfahren dienen als zentrale Grundfertigkeiten des Roboters, um bestehende Assistenzfunktionen, wie z. B. das räumliche Führen zu vorgegebenen Orten oder das Holen und Bringen von Gegenständen, anzureichern und in einem intuitiven Dialog mit dem betroffenen Nutzer durchführen zu können. Die Aufmerksamkeitserfassung diene insbesondere zur erwartungskonformen und kontextangepassten Annäherung des Roboters an Menschen bzw. Gesprächspartner. Durch den Einsatz der multimodalen Erfassungsvielfalt von Menschen und Umfeld sollte insbesondere gewährleistet werden, dass die Aufmerksamkeit von Personen auch in unstrukturierten Umgebungen, wie sie im Alltag zu erwarten sind, robust und fehlertolerant nachvollzogen werden kann. So wurden bspw. durch die Erfassung der Blickrichtung, Kopfdrehung, Sprache, Stimme und Körperhaltung von Nutzern partiell redundante Wahrnehmungskanäle implementiert, die sich gegenseitig ergänzen, insbesondere aber bei etwaigem Ausfall eines Kanals (z. B. durch Hinterkopfansichten, die eine Sicht auf die Augen eines Nutzers verhindern) durch konfidenzbasierte Informationsfusion für Rückfalloptionen sorgen.

6.2 Hintergrund

Assistenzroboter haben das Ziel, Menschen bei der Bewältigung von Alltags- oder Arbeitsaufgaben zu unterstützen. Im Haushalt oder in Pflegeeinrichtungen sind hier bspw. das Reichen oder das Abnehmen von Gegenständen zu nennen. Zur Aktivierung von Personen könnte ein Roboter zu geeigneten Zeitpunkten ausgewählte Individuen ansprechen und ihnen Bewegungsspiele anbieten oder sie zum Folgen auffordern. Um hierbei eine angenehme und effektive Unterstützung durch Assistenzroboter zu gewährleisten, ist eine fehlerrobuste und erwartungskonforme Interaktion des Roboters mit dem Menschen wichtig. Neben den eigentlichen kinematischen Fähigkeiten des Roboters sind so insbesondere auch die Erfassung und Lenkung der Aufmerksamkeit von Nutzern wesentliche Grundfertigkeiten, um die Annäherung an den Nutzer und die Interaktion mit ihm derart gestalten zu können,

dass sie sich intelligent und feinfühlig an seine Situation anpasst und somit eine hohe Akzeptanz erfährt.

Nach Bleuler (1983) bezeichnet *Aufmerksamkeit* dabei die Zuweisung von (beschränkten) Bewusstseinsressourcen auf Bewusstseinsinhalte, bspw. auf Wahrnehmungen der Umwelt oder des eigenen Verhaltens und Handelns. Von außen lassen sich ausprägende Merkmale der Aufmerksamkeitszuwendung einer Person wahrnehmen (bspw. Blickrichtung oder Kopfdrehung). Sprachliche Äußerungen geben zudem Hinweise auf den Kontext, auf den eine Person ihre Aufmerksamkeit legt. Äußere Einwirkungen bewirken sogenannte *exogene Aufmerksamkeitslenkungen*, die die Konzentration der Person unterbrechen und deren Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Für eine erwartungskonforme Interaktion mit Nutzern ist es daher erforderlich, dass Assistenzroboter die menschliche Aufmerksamkeit auf eine multimodale Weise nachvollziehen und auch aktiv lenken können. Dazu sind beobachtbare Verhaltensweisen des Nutzers aber auch die Umgebung, in der er sich befindet, gleichermaßen zu berücksichtigen.

6.3 Methodische Herangehensweise

6.3.1 Die Roboterplattform & Middleware ROS

Bei der Umsetzung der Roboterkomponenten wurde das Open Source Framework *Robot Operating System* (ROS) (Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al., 2018) genutzt, wodurch die entwickelten Komponenten leicht wiederzuverwenden sind. Dabei wurden einzelne Funktionalitäten wie bspw. die Personenerfassung als *Funktionknoten* mit fest definierter Schnittstelle umgesetzt, welche durch Knoten mit identischer Schnittstelle ausgetauscht und auch in anderen Projekten verwendet werden können.

6.3.2 Kamerabasierte Personenerfassung

Um die Aktivitäten und Aufmerksamkeiten der Personen um den Roboter ermitteln zu können ist es zunächst nötig die den Roboter umgebenden Personen zu erfassen. Dafür wird eine 3D-Tiefenkamera verwendet, welche neben der Farbinformation zudem zu jedem Bildpixel die Tiefe bestimmt. Als primärer Indikator für die visuelle Aufmerksamkeit wird die Blickrichtung genutzt. Um diese zu schätzen wird ein markerbasiertes Verfahren auf dem Farbbild verwendet (Baltrušaitis, Zadeh, Lim & Morency, 2018). Ist diese etwa aufgrund einer zu großen Distanz oder durch Abgewandtheit vom Roboter nicht zu ermitteln, wird als sekundärer Indikator die Kopfdrehung verwendet. Zudem wird mit Hilfe von neuronalen Netzen (Cao, Hidalgo, Simon, Wie & Sheikh, 2018) die Körperpose in dem Kamerabild ermittelt und mit Hilfe der Tiefeninformation ein 3D-Körperskelett bestimmt, auf dem die Aktivität geschätzt wird. Außerdem kann durch die Körperpose, im Falle von fehlenden Kopfdrehungsdaten, auf die Zugewandtheit geschlossen werden.

Um eine Person, welche bspw. hinter einer Ecke verloren ging, wiederzuerkennen wird für jede erkannte Person ein anonymer Identifikator erzeugt (Geitgey). Dieser leitet sich aus den Gesichtsmerkmalen der Person ab und die Ähnlichkeit kann durch die euklidische Distanz bestimmt werden. Wird eine Person wiedererkannt, kann bspw. der Lotsenvorgang direkt wiederaufgenommen werden ohne über einen Dialog zu prüfen ob die richtige Person vor Ort ist oder gar den Lotsenvorgang abubrechen.

Die Ergebnisse der Erfassungskomponenten und deren zeitlicher Verlauf werden in einem dynamischen Szenenmodell gebündelt und dienen als Basis für die Aktivitäts- und Aufmerksamkeitsschätzung

6.3.3 Umfelderfassung und Objekterkennung

Die Perzeption der Umgebung ist die Basis für viele Handlungen mobiler Assistenzroboter. Initial wird eine digitale Repräsentation der Umgebung durch Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) basierend auf multisensoriellen Daten des Roboters erzeugt. Neben diesen geometrischen Informationen sind semantische Informationen von großem Interesse um beispielsweise mögliche Aufmerksamkeitsziele von Personen oder Interaktionsgegenstände zu erkennen. Hierzu wurden im Projekt statische Grundstrukturen wie Tische und Wände, sowie dynamische Gegenstände wie Tablets und Stühle innerhalb der 3D-Umgebungskarte extrahiert. Hierbei wurden Methoden der künstlichen Intelligenz auf die Anforderungen mobiler Systeme adaptiert.

Die Verwaltung dieser Umgebungsdaten in einer dokumentenbasierten Datenbank ermöglicht dabei zum einen eine optimale Handhabung der Umgebungsdaten über einen längeren Zeitraum und zum anderen erforderliche Schnittstellen zur weiteren Verarbeitung der wahrgenommenen Umgebungsinformationen.

6.3.4 Spracherkennung

Für die Erkennung, ob zwei aufeinanderfolgende Spracheingaben vom selben Sprecher geäußert wurden, verwenden wir ein rekurrentes neuronales Netz, welches Mel-Spektrogramme einer Audioeingabe in eine sog. „Sprechereinbettung“ abbildet. Diese Einbettung ist ein kontinuierlicher Vektor, dessen Position im Vektorraum die Stimmeigenschaften eines Sprechers darstellt. Für das Trainieren des Modells wird die „Generalisierten End-zu-End-Verlustfunktion“ (Wan, Wang, Papir & Moreno, 2019) verwendet, welche die Kosinus-Ähnlichkeit der Einbettungen von Äußerungen desselben (verschiedener) Sprecher maximiert (minimiert). Nach dem Trainieren des Enkodierers werden zwei aufeinanderfolgenden Äußerungen zum selben Sprecher zugewiesen, falls die Kosinus-Ähnlichkeit ihrer Einbettungen einen Schwellwert überschreitet, der empirisch festgelegt wurde.

6.3.5 Klassifikation der Aufmerksamkeit

Zur Aufmerksamkeitsmodellierung auf der Basis von Kameradaten haben wir eine komplexe Architektur eines tiefen neuronalen Netzes namens „I3D“ (Philipp, Bommersheim, Robert & Beyerer, 2019) verwendet und einen sog. „End-to-End“ Ansatz verfolgt. Hierbei werden beim Training des Modells lediglich die Eingabe und Ausgabe näher spezifiziert – das Modell erlernt während dem durchgeführten Trainingsprozess die erforderlichen Merkmale und Muster, um von der Eingabe auf die gewünschte Ausgabe schließen zu können. Als Eingabe dienen hierbei die von der Kamera erfassten Videodaten, als Ausgabe wird das Aufmerksamkeitsziel der im Video erfassten Person definiert.

Das verwendete „I3D“ Modell stellte 2017/18 den State-of-the-Art für Handlungserkennung aus Video dar. Das zugrundeliegende Modell wurde mit großen Bild- und Video-Datenbanken trainiert und ist in der Lage Videos mittels eines sog.

„3D-ConvNets“ zu verarbeiten und auf die definierten Ausgabeziele entsprechend zu schließen. Durch die Technik des sog. „Transfer-Learnings“ haben wir das für die Aufgabe der Handlungserkennung vortrainierte Modell für die Erkennung verschiedener Aufmerksamkeitsziele weiterentwickelt und mit einem eigens für die Aufmerksamkeitsmodellierung aufgenommenen Datensatz trainiert.

6.3.6 Interaktionsbedarf und Handlungsempfehlung

Zur Bewertung des Interaktionsbedarfs der Nutzer wurde ein wahrscheinlichkeitstheoretisches (probabilistisches) Modell eingesetzt. Eingaben des Modells sind multimodal erfasste Merkmale, welche im sogenannten dynamischen Szenenmodell gebündelt und in Echtzeit zur Verfügung gestellt wurden. Solche Merkmale sind beispielsweise das Aufmerksamkeitsziel einer Person, die Aktivität einer Person, Distanz zum Roboter sowie die Phase der Interaktion (Begrüßung, Lotsenvorgang, ...). Die Ausgabe des Modells ist die geschätzte Wahrscheinlichkeit für einen vorliegenden Interaktionsbedarf einer Person sowie einer erwartungskonformen Roboterhandlung. Diese Analyse kann zeitgleich und individuell für mehrere Personen durchgeführt werden.

Für eine robuste und praxistaugliche Analyse ist die Berücksichtigung der Unsicherheiten der Eingabe an das Modell essenziell, denn diese sind bei einem Einsatz in der realen Welt praktisch unumgänglich. Das Modell nutzt aus diesem Grunde das Konstrukt einer sogenannten virtuellen Evidenz, um Eingaben mitsamt der Unsicherheiten zu bündeln und die Modellausgaben entsprechend anzupassen (Philipp, Bommersheim, Robert & Beyerer, 2019).

6.3.7 Dialogmanager und Interaktionssteuerung

Mit Hilfe des Frameworks geni:OS von paragon semvox wurde ein reaktives Dialog- und Interaktionsmodul implementiert. Die Besonderheit des Frameworks liegt in der durchgängigen Nutzung von deklarativen Methoden zur Beschreibung sowohl der benutzten Daten inklusive der linguistischen Ressourcen, wie auch der definierten Abläufe. So wird z. B. die Datenstruktur Nutzermodell als auch die einzelnen durchzuführenden als Tasks und Interaktionen realisierten aufmerksamkeitsbezogenen Interaktionsstrategien über Klassen und Eigenschaften in einer Ontologie spezifiziert. Für die Ablaufsteuerung werden zusätzlich Bedingung-/Aktionsregeln in einer aufgabenspezifischen Spezifikationssprache formuliert, die über Trigger in einem Blackboard aktiviert und mit vorhandenen oder fehlenden Daten im Hintergrundspeicher abgeglichen werden und die erforderlichen Interaktionen auslösen. Über das Blackboard werden sowohl der Dialogzustand und die Dialoghistorie wie (z. T. aggregierte) Sensordaten (Geschwindigkeit, Entfernung des Nutzers, Handlungsempfehlungen, Spracherkennung) kommuniziert. Der Vorteil dieses deklarativen Verfahrens liegt in der höheren Flexibilität und dem niedrigeren Implementierungsaufwand im Vergleich zu anderen Frameworks, und erlaubt die schnelle Erstellung von Prototypen auch mit geringen Mengen an Beispieldaten.

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Sozioökonomische Analysen

Ein zentrales Element des Projekts ASARob ist die sozioökonomische Forschungskomponente, die insbesondere auf die Themenschwerpunkte Nutzerzentrierung und ethische, legale und soziale Aspekte (ELSI) fokussiert. In einer ersten qualitativen Phase wurden gemeinsam mit den Endanwendern geeignete Szenarien für ASARob entwickelt und die Bedarfe von PatientInnen wie auch Fachkräften im Rahmen von Fokusgruppen und semistrukturierten Experteninterviews erhoben. Um mehr über Mehrwerte und Erfahrungen mit Assistenzrobotern in der Pflege, assoziierte ethische, rechtliche und soziale Faktoren (ELSI), Zeitersparnisse, Zahlungsbereitschaften sowie Chancen und Hemmnisse beim Einsatz von Assistenzrobotern herauszufinden, wurde in einer zweiten quantitativen Phase Ende des Jahres 2018 eine Onlinebefragung unter mehr als 160 Entscheidungsträgern in Kliniken und Pflegeeinrichtungen in ganz Deutschland durchgeführt.

Die Umfrage zeigt, dass im deutschen Gesundheitswesen ein Bedarf am Einsatz von Assistenzrobotern, die positive Effekte für PatientInnen und Fachkräfte haben, besteht. Den höchsten Stellenwert bei den Führungskräften haben aktuell dabei Roboteranwendungen, die das Personal physisch entlasten und ohne soziale Interaktion auskommen. Beispiele sind Reinigungs-, Desinfektions-, Transport- oder Heberoboter. Dies deckt sich mit den in der Befragung identifizierten stärksten Treibern von Roboteranwendungen: Die Verringerung der Arbeitsbelastung des Personals, eine Steigerung der Arbeitgeberattraktivität und eine höhere Effizienz in den Prozessen sind die dominierenden Motive für die Nutzung von Robotern in den teilnehmenden Organisationen. Mehr als die Hälfte der Teilnehmenden sehen jedoch auch gravierende Hürden in der Einführung dieser Anwendungen: Finanzierung, Datenschutz, rechtliche Hindernisse wie beispielsweise Haftungsfragen und die Bedeutung des menschlichen Kontakts.

In der Befragung wurden drei unterschiedliche Szenarien noch einmal gesondert betrachtet: Neben den beiden ASARob-Szenarien „Assistenzroboter als Lotse“ und „Aktivierungsroboter“ wurde noch der Heberoboter als ein physisch entlastendes Roboterszenario hinzugefügt. Den Teilnehmenden der Onlinebefragung wurden hierzu Fragen zu ELSI-Themen gestellt. Folgende fünf Aspekte wurden bei dieser Untersuchung genauer betrachtet: Datenschutz, Reduktion des menschlichen Kontakts, mögliche Arbeitsplatzverluste, personalisierte Kommunikation sowie Verhaltensänderungen durch die Anwesenheit von Robotern.

Die Ergebnisse zeigen, dass Assistenzroboter mehrheitlich als Unterstützung und nicht als Ersatz von Fachkräften gesehen werden. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für deren Akzeptanz. Insbesondere bei Aktivierungsrobotern wird von der eindeutigen Mehrheit eine personalisierte Kommunikation befürwortet. In Bezug auf eine Verhaltensänderung bei Anwesenheit eines Roboters erwartet lediglich die Hälfte der Teilnehmenden überhaupt eine Veränderung, sogar nur ein Sechstel erwartet eine dauerhafte Veränderung durch die Anwesenheit von Robotern. Beim Thema Datenschutz sind die Teilnehmer hingegen sehr gespalten. Die Kliniken sehen den Datenschutz bei beiden ASARob-Roboterszenarien eher unkritisch. Die ambulante Pflege sieht Lotsenroboter am häufigsten als eher unkritisch und

Aktivierungsroboter als eher bedenklich. Die stationäre Pflege sieht beide Roboterarten am häufigsten als eher unbedenklich oder ist unentschieden.

6.4.2 Wizard of Oz-Experiment

Um schon während der Projektlaufzeit die in ASARob entwickelten Konzepte hinsichtlich Aufmerksamkeitssteuerung in Produktivumgebungen testen zu können, wurde eine Testmethode basierend auf dem Wizard-of-Oz Prinzip entwickelt. Hierbei wurde eine Kommandozentrale (s. Abbildung 6.2) aufgebaut, über die die Sensordaten des Roboters (Farb- und 3D-Kameras, Mikrofon, Karten-/Lokalisierungsdaten) in Echtzeit visualisiert wurden und ein menschlicher Operator abhängig vom Interaktionsstatus die Robotermodalitäten (Sprache, Mimik, Lichteffekte, Sounds) sowie Roboterbewegungen (Torso, Fahrwerk) auslösen konnte. Vorteil dieser Vorgehensweise war die Möglichkeit, schon ohne die fertig implementierte ASARob-Komponenten der Aufmerksamkeitschätzung, Planung und Aufmerksamkeitssteuerung Erkenntnisse über die Wirksamkeit der entwickelten Konzepte zu ermitteln. Die Nutzer hatten während des Experiments den Eindruck, dass der Roboter autonom agiert, da der menschliche Agent nicht in Erscheinung trat.

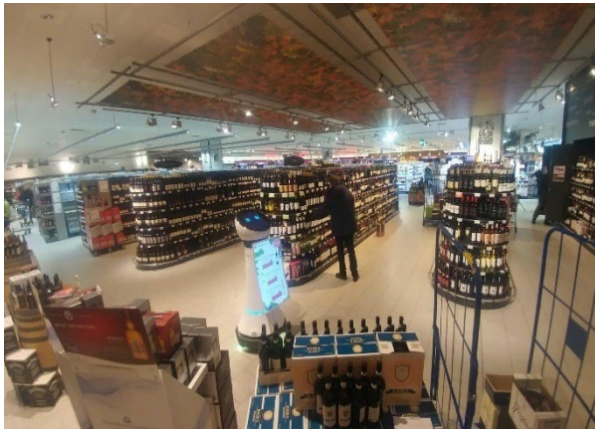


Abbildung 6.1: Wizard of Oz Test in der Weinabteilung. Roboter wird über Kommandozentrale ferngesteuert.



Abbildung 6.2: Kommandozentrale, über die der Roboter gesteuert wird.

Mit dieser Methodik wurden mehrere Tests mit verschiedenen Anwendungen in unterschiedlichen Umgebungen und Branchen durchgeführt, u.a. als Berater in Elektrofachmärkten und im Lebensmitteleinzelhandel, als Promoter von Produkten im Baumarkt und von bestimmten Shops in der Shopping Mall, als Guide im Museum, Concierge und Informations-Assistent im Hotelgewerbe und in einer Bank.

Im Rahmen der durchgeführten Tests konnten zahlreiche Erkenntnisse für die Entwicklung der ASARob-Komponenten gewonnen werden. Zum einen konnte die Projekt-Hypothese bestätigt werden, dass Roboter-Verhaltensweisen die Aufmerksamkeit von Nutzern wesentlich beeinflussen kann. Als stärkster Effekt wurde dabei aktive Annäherung des Roboters in Richtung passierender Personen festgestellt. Es stellte sich sehr schnell heraus, dass der Nutzerkontext, d. h. die aktuelle Situation / Zielstellung des Nutzers, Tageszeit, Stimmung des Nutzers, etc. eine sehr große Rolle spielt und unbedingt in der Aufmerksamkeitssteuerung berücksichtigt werden muss. So sind die Kunden in einem Lebensmittelmarkt am Freitagabend nach Feierabend z. B. sehr viel reservierter gegenüber einer Interaktion

mit dem Roboter als Kunden einer Shopping Mall am Samstagnachmittag. Dabei muss auch berücksichtigt werden, ob es sich um einen Erstkontakt handelt, da in diesem Fall der Nutzen durch die Interaktion mit dem Roboter noch ungewiss ist. Wenn Nutzer erwarten, dass sie durch die Interaktion Vorteile erhalten (z. B. Zeitersparnis, Rabattcoupon, etc.), ist die Bereitschaft, die Interaktion zu starten, viel höher.

Für sensible Informationen und in Situationen, in denen die mit dem Roboter interagierende Person beobachtet wird, ist Sprache als Kommunikationskanal eher ungeeignet bzw. wird von Nutzern nur widerstrebend genutzt. In diesem Fall ist das Angebot weiterer Modalitäten (z. B. Touchscreen, Gestik) essentiell. Ebenso spielt das Timing für Roboter-Reaktionen eine wichtige Rolle: kommt die Reaktion auf eine Aktion des Nutzers z. B. mehrere Sekunden später, nimmt dieser die Reaktion des Roboters entweder nicht wahr oder wird durch sie sogar irritiert.

Die entwickelte Wizard of Oz-Methode ist generell zur Evaluation von Konzepten interessant, die eine Nutzerinteraktion einschließen. Der große Vorteil dieser Methodik ist ein sehr frühes Nutzerfeedback, ohne dass die Konzepte bereits umgesetzt werden müssen. Damit kann die Entwicklung von Mensch-Roboter-Interaktion sehr viel zielgerichteter und ressourcenschonender gestaltet werden. Zur Evaluierung des aufmerksamkeitsadaptiven Roboters war ein Anwendungsszenario in Zusammenarbeit mit dem Geriatrischen Zentrum Karlsruhe in der ViDia-Diakonissenanstalt vorgesehen. In diesem Szenario bestand die Aufgabe des Roboters darin, Patienten und Teilnehmer in Aktivierungsgruppen zu einer Aktivierungssitzung zu begleiten, bei der

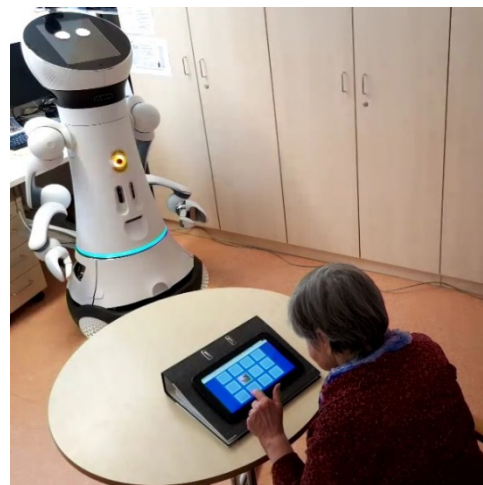


Abbildung 6.3: Wizard-of-Oz-Experiment mit Aktivierungsprogramm.

die Nutzer auf einem Tablet und unterstützt durch den Roboter kognitive und emotionale Aktivierungsprogramme ausprobieren konnten. Die Aufgabe der Aufmerksamkeitskomponente war dabei die Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit. Zur Vorbereitung des Szenarios wurde im Februar 2019 ein Expertenworkshop und ein dreitägiges Wizard-of-Oz-Experiment durchgeführt. Dabei konnte die multimodale Datensammlung im Feld erprobt werden und wichtige Erkenntnisse zur aufmerksamkeitsadaptiven Dialogführung gewonnen werden: Es zeigte sich, dass das Interesse der Teilnehmer an Roboter und Tablet-Aktivierung hoch ist, dass eine aufmerksamkeitsadaptive Interaktion aber unverzichtbar ist, da die Teilnehmer in vielen Fällen nicht proaktiv, sondern abwartend agierten. Darüber hinaus beobachteten wir, dass die von uns simulierten Ablenkungssituationen (z. B. Telefonklingeln) oft zu keiner Abwendung vom Tablet oder Roboter führt, dass aber „mind wandering“ und die Konkurrenz durch menschliche Ansprechpartner die Aufmerksamkeit der Benutzer beeinflussen können.

Aufgrund von Beschränkungen durch Maßnahmen zum Infektionsschutz in der COVID-19-Epidemie war eine Durchführung eines abschließenden Tests mit einem autonomen Roboter im Geriatrischen Zentrum nicht mehr möglich. Um das Potential einer aufmerksamkeitsadaptiven Begleitung einer Tablet-gestützten Aktivierung ausloten zu können, konnten wir auf einen weiteren Datensatz aus dem I-CARE-Projekt (Schultz et al., 2018) zurückgreifen, der multimodale Daten vergleichbarer

Aktivierungssitzungen (ohne Roboter) enthält. Durch neue Auswertungen auf diesen Daten konnten wir zeigen, dass sich unter Nutzung rekurrenter neuronaler Netze die emotionale Dimension des Tablet-Engagements mit einem F1-Score von bis zu 0,83 erfolgreich erkennen lässt. Daraus schließen wir, dass eine adaptive Dialogführung im Aktivierungsszenario möglich ist.

6.4.3 Evaluation der Erkennungskomponenten

Für das Trainieren des Sprechererkodierers verwenden wir den GlobalPhone-Datensatz (Schultz, Vu & Schlippe, 2013), welcher Audio-Aufnahmen von 2000 Sprechern in 20 versch. Sprachen enthält, und eigens aufgenommene Daten von 18 Sprechern (ASARob-Audio). 100 zufällig ausgewählte Sprecher von GlobalPhone und 9 Sprecher von ASARob-Audio werden nicht für das Training des Modells verwendet. Die restlichen Daten werden zufällig in ein Trainings-, Validierungs- und Testset mit dem Verhältnis 80 %, 10 % und 10 % aufgeteilt. Da in ASARob-Audio Nachhall und gelegentliche Nebengeräusche zu hören sind, augmentieren wir GlobalPhone-Daten mit Hintergrundgeräuschen und verwenden ein Raumsimulator (Scheibler, Bezzam & Dokmanic, 2018), um Nachhall zu simulieren. Wir trainieren anschließend den Enkodierer für 2000 Epochen, wobei pro Epoche zufällige Gruppen von $N = 64$ Sprechern mit jeweils $M = 10$ zufällig Äußerungen verarbeitet werden. Bei der Evaluation auf jeweils im Training ungesehenen Sprechern ergibt sich für GlobalPhone-Daten eine Gleichfehlerrate von 1,6 % (saubere Daten) bis 3,6 % (mit Hintergrundgeräuschen und Nachhall), bei den ASARob-Daten eine Gleichfehlerrate von 14,9%. Die höhere Fehlerrate von ASARob-Audio lässt sich darauf zurückführen, dass die Äußerungen dieses Datensatzes wesentlich kürzer sind und unter anderen Bedingungen aufgenommen wurden. Für die Bestimmung des Schwellenwerts für die Klassifikation erstellen wir ein Datensatz, welches für jeden Sprecher im Trainingsset 75 Tupel enthält. 25 dieser Tupel enthalten zwei verschiedene Äußerungen des jeweiligen Sprechers, während 50 dieser Tupel eine Äußerung eines anderen Sprechers erhalten. Mit dem trainierten Enkodierer-Netz berechnen wir für jedes Tupel die Kosinus-Ähnlichkeit der Einbettungen der zwei Äußerungen. Anschließend bestimmen wir den Schwellenwert, welcher die Gleichfehlerrate im Datensatz minimiert. Anhand des bestimmten Schwellenwerts (ca. 0.48) erreichen wir eine Genauigkeit von ca. 96 % mit GlobalPhone-Daten und 78 % mit ASARob-Audio-Daten. Die erreichte Genauigkeit ist niedriger als die entsprechende Gleichfehlerrate am Ende des Trainings (Abbildung 6.4), weil für die Berechnung der Gleichfehlerrate Einbettungen von einzelnen Äußerungen aggregiert werden, was zu einer robusteren Abbildung der Sprechereigenschaften führt.

Für die Auswertung des Aufmerksamkeitsmodells betrachteten wir, wie gut eine Lokalisierung von Aufmerksamkeitszielen einer von der Kamera erfassten Person funktioniert. In den verwendeten Video-Testdaten ist hierbei eine Person gefilmt, die sich in unregelmäßigen zeitlichen Abständen auf verschiedene, definierte Ziele im Raum konzentriert. Die Aufgabe des Modells besteht darin, das korrekte Aufmerksamkeitsziel der Person für Zeitspannen von einer Sekunde zu bestimmen.

Für die Auswertung der Lokalisierung von Aufmerksamkeitszielen (siehe Abbildung 6.4) sind zwei bzw. fünf unterschiedliche Aufmerksamkeitsziele definiert, auf die die Person im Eingabe-Video ihre Aufmerksamkeit richten kann. Bei zwei Zielen unterscheiden wir zwischen den Zielen „ASARob“ und „nicht-ASARob“, d. h. wir möchten unterscheiden, ob die Person im Eingabe-Video ihre Aufmerksamkeit auf

ASARob richtet oder nicht. Bei der Betrachtung von fünf Zielen unterteilen wir die „nicht-ASARob“ Klasse in weitere Unterklassen.

Wie in Abbildung 6.4 zu sehen, wird in beiden Fällen der Referenzwert (horizontale Linie) klar übertroffen. Die Lokalisierung von Aufmerksamkeitszielen der von der Kamera erfassten Person mittels des entwickelten Ansatzes funktioniert mit einer durchschnittlichen Akkuratheit von 89 % bei zwei Zielen. Damit ist es unserem Modell in den meisten Fällen möglich zu erkennen, ob eine Person ihre Aufmerksamkeit dem Roboter zuwendet oder nicht. Die Unterscheidung weiterer „nicht-ASARob“ Klassen gestaltet sich dagegen etwas schwieriger für das Modell, wie das Ergebnis von 0.63 % durchschnittlicher Akkuratheit zeigt.

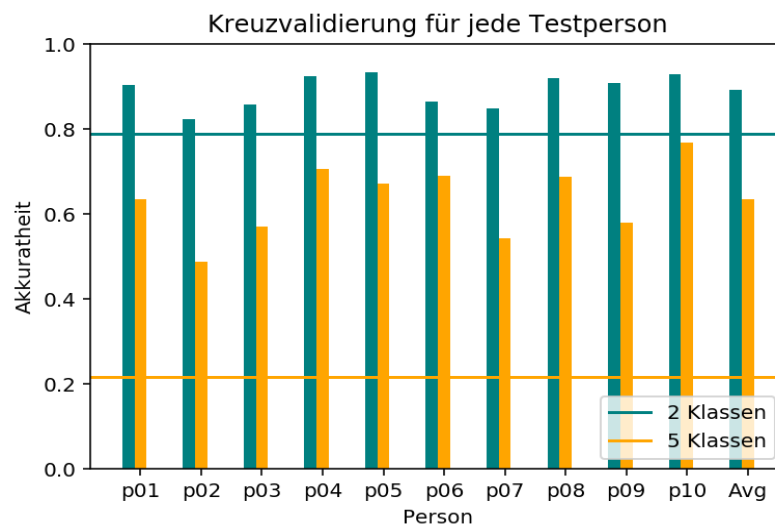


Abbildung 6.4: Auswertung zur Lokalisierung von zwei bzw. fünf Aufmerksamkeitszielen (siehe Fließtext). Akkuratheit einer Kreuzvalidierung über zehn verschiedene Personen (Training mit Daten von neun Personen, Test mit Daten von einer), sowie die durchschnittliche Akkuratheit (Säule ganz rechts, „Avg“). Der Anteil der größten Klasse der Auswertung ist jeweils mit einer gleichfarbigen horizontalen Linie dargestellt und bildet damit den Referenzwert, den es zu schlagen gilt.

6.5 Forschungsausblick

6.5.1 Wie geht es weiter mit dem Dialogmanager?

Zur Zeit werden in geni:OS überwiegend regelbasierte Verfahren zur Implementierung des interaktiven Systems eingesetzt. Zurzeit werden systematisch maschinelle Lernverfahren für verschiedene Komponenten entwickelt, vor allem zur verbesserten Sprach- und Emotionserkennung, zur linguistischen Analyse und Generierung. Des Weiteren wird auch an einem Ansatz gearbeitet, um die Interaktionshistorie in einer generischeren Form darstellen und benutzen zu können. Hinzu kommt die Anbindung verschiedener *Smart Agents*, die spezifische Teilaufgaben, wie z. B. open-domain Frage-/Antwort Assistenz übernehmen.

Für die in ASARob gewonnenen Einsichten zur Aufmerksamkeitserhaltung und -lenkung, sowie die implementierte Funktionalität wird im Moment ein Konzept zur Überführung in einen *Aufmerksamkeits-Agenten*, der dann in verschiedenen Anwendungsszenarien zum Einsatz kommen kann, entwickelt.

6.5.2 Ausblick aus der Conjoint-Analyse

Aktuell gibt es kaum Literatur zu Zahlungsbereitschaften für Robotiklösungen im Gesundheitswesen. Um einen Beitrag zur Schließung dieser Forschungslücke zu leisten sowie wichtige Informationen zu Werttreibern aus Kundensicht und assoziierte Zahlungsbereitschaften für das ASARob-Lotsenszenario zu gewinnen, wurden Anfang 2020 insgesamt 38 relevante Entscheidungsträger aus 28 Kliniken bundesweit persönlich befragt. Im Rahmen der Studie wurde eine Choice-Based Conjoint Analyse (CBCA) zur Ermittlung der Präferenzen von potenziellen Nutzern durchgeführt. Die Conjoint-Analyse zählt zu den indirekten Kundenbefragungsmethoden. Die entwickelten Instrumente zur Schätzung der Preis-Absatz-Funktionen auf Grundlage indirekt erhobener Daten zur Zahlungsbereitschaft bilden reale Kaufsituationen authentischer ab als dies bei direkten Befragungen der Fall ist. Der Preis stellt dabei für den Probanden eines von mehreren für die Kaufentscheidung relevanten Kriterien dar (Meffert, Burmann & Kirchgeorg, 2012). Knapp zwei Drittel der Befragten sind Pflegedirektionen, 18 Prozent kaufmännische Leitungen und 16 Prozent medizinische Leitungen.

Die Analyse ergibt, dass der umsatzmaximierende Kaufpreis für den Lotsenroboter bei Vorhandensein aller bereits vorhandenen Basisfunktionen bei 25.000 € liegt. Fügt man die vorgeschlagenen und teilweise noch zu entwickelnden Zusatzfunktionen wie z. B. die Tragefunktion hinzu, erhöht sich der umsatzmaximierende Kaufpreis sogar auf 50.000 €. In der Befragung zeigt sich ebenfalls, dass die Mehrheit der Befragten ein Mietmodell statt eines Kaufmodells bevorzugt. Im Konsortium zu evaluieren bleibt die Frage, inwieweit das Mietmodell ökonomisch nachhaltig umgesetzt werden kann und ob sich die FuE-Kosten für die Zusatzfunktionen beim Kaufmodell durch den Aufpreis amortisieren lassen.

6.6 Implikationen für die Praxis

Als Hemmnisse für den Einsatz von Assistenzrobotern werden aktuell insbesondere Aspekte wie Finanzierung, Datenschutz und Arbeitsschutz genannt. Hier besteht einerseits politischer Handlungsbedarf mit Blick auf den rechtlichen Rahmen. Andererseits sollten Robotikhersteller eine beratende Rolle bei der Identifikation adäquater Einsatzszenarien sowie bei Fragen zu Datenschutz, Datensicherheit und Arbeitsschutz einnehmen.

Ein erhöhtes Potenzial für die Einführung von Robotikanwendungen liegt bei Krankenhäusern mit einem sehr hohen Digitalisierungsgrad.

Die Aufzugfunktion ist in der Zielgruppe der Kliniken für das Lotsenszenario sehr wichtig, um das Gerät im gesamten Haus einsetzen zu können.

Neben Kaufoptionen sollten auch Mietmodelle angeboten werden, da diese in der Zielgruppe der Kliniken als deutlich attraktiver eingeschätzt werden.

6.7 Literaturverzeichnis

Bleuler, Eugen: Lehrbuch der Psychiatrie. Springer Verlag, Berlin 15. Auflage 1983, bearbeitet von Manfred Bleuler unter Mitarbeit von J. Angst et al.

Cao, Z., Hidalgo, G., Simon, T., Wei, S. E., & Sheikh, Y. (2018). OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields. *arXiv preprint arXiv:1812.08008*.

Carreira, J. & Zisserman, Andrew. (2017). Quo Vadis, Action Recognition? A New Model and the Kinetics Dataset. 4724-4733. 10.1109/CVPR.2017.502.

A. Geitgey. Python Face Recognition. https://github.com/ageitgey/face_recognition

Meffert H, Burmann C, Kirchgeorg M. Marketing – Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung. 11. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012

OpenFace 2.0: Facial Behavior Analysis Toolkit. Tadas Baltrušaitis, Amir Zadeh, Yao Chong Lim, and Louis-Philippe Morency, *IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, 2018

P. Philipp, M. Bommersheim, S. Robert und J. Beyerer: Probabilistic Estimation of Human Interaction Needs in Context of a Robotic Assistance in Geriatrics, 53rd Annual Conference of the German Society for Biomedical Engineering BMT 2019.

Scheibler, R., Bezzam, E., & Dokmanić, I. (2018). Pyroomacoustics: A Python package for audio room simulations and array processing algorithms. *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 351–355. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461310>

Schultz, T., Putze, F., Schulze, T., Steinert, L., Mikut, R., Doneit, W., Kruse, A., Depner, A., Franz, I., Engels, M. A., Gaerte, P., Jünger, S., Linden, R., Ziegler, C., Ricken, M., Dimitrov, T., Herzig, J., Maucher, I., Bernardin, K., ... Simon, C. (2018). I-CARE: Ein Mensch-Technik Interaktionssystem zur Individuellen Aktivierung von Menschen mit Demenz. Tagungsband Der 1. Clusterkonferenz Zukunft Der Pflege.

Schultz, T., Vu, N. T., & Schlippe, T. (2013). GlobalPhone: A Multilingual Text Speech Database in 20 Languages. *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 8126–8130. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6639248>

Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al. (2018). *Robotic Operating System*. <https://www.ros.org>.

Wan, L., Wang, Q., Papir, A., & Moreno, I. L. (2019). Generalized End-to-End Loss for Speaker Verification. *ArXiv:1710.10467 [Cs, Eess, Stat]*. <http://arxiv.org/abs/1710.10467>

7 RoPHa – Robuste Wahrnehmungsfähigkeiten für Roboter zur Unterstützung älterer Nutzer im häuslichen Umfeld

Birgit Graf, Florian Jordan, Gabriele Blume, Ronny Martin, Mona Abdel-Keream, Patrick Mania, Fabian Gronbach, Christian Emmerich, Raphael Schaller, Darko Katić, Benjamin Alt

Projektpartner: Fraunhofer - Institut für Produktsicherheit und Automatisierung (IPA), Roboception GmbH, ArtiMinds Robotics GmbH, Universität Bremen (Institut für künstliche Intelligenz); assoziierte Partner: Stiftung Evangelische Altenheimat, Interaktionswerk

7.1 Zusammenfassung des Projekts

Ziel des RoPHa-Projekts war es, Grundfunktionen für die Unterstützung älterer und pflegedürftiger Menschen bei der Handhabung typischer Alltagsobjekte zu entwickeln. Als Use Case für die beispielhafte Umsetzung und Integration der entwickelten Grundfunktionen wurde die mundgerechte Bereitstellung von Nahrung betrachtet. Dafür wurden zunächst eine systematische Anforderungsanalyse inklusive der Betrachtung von ELS-Aspekten und eine Risikobetrachtung durchgeführt. Danach wurde ein Interaktionskonzept basierend auf einer tabletgestützten GUI und Sprachausgaben entwickelt. Im Bereich der Perzeption wurden Funktionen für die Objekterkennung, die Lokalisierung und Klassifizierung von Speisen, die Wahrnehmung des Menschen und für die aufgabenspezifische Auswahl und Parametrierung von Perzeptionsfunktionen entwickelt und in ein Gesamtsystem integriert. Für die sichere Manipulation wurden unterschiedliche elementare Handhabungsfertigkeiten, bspw. für das Schneiden, Bestreuen, Aufnehmen und Anreichen von Speisen entwickelt. Im Rahmen von zwei Testreihen mit Mitarbeitern aus der Pflege wurden die entwickelten Szenarien evaluiert.

7.2 Hintergrund

Vor dem Hintergrund der demographischen Entwicklung könnte die Unterstützung älterer und pflegedürftiger Menschen zukünftig ein wichtiges Einsatzfeld für autonome Roboter mit Assistenzfunktionen darstellen. Um auch bei abnehmenden Fähigkeiten weiterhin ein selbstständiges Leben zuhause zu ermöglichen, spielt die Fähigkeit der Roboter, den Nutzer nicht nur informatorisch und sensorisch, sondern auch bei der Handhabung typischer Alltagsobjekte zu unterstützen, eine essentielle Rolle.

Um Handhabungsaufgaben nicht nur sicher in der Nähe des Menschen, sondern auch in enger Zusammenarbeit mit diesem auszuführen, müssen die Roboter in der Lage sein, Umgebungsinformationen robust zu erfassen und zu verarbeiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch den Roboter im häuslichen Umfeld erfasste Informationen aufgrund der Komplexität und der Dynamik der Einsatzumgebung und in direkter Nähe des Benutzers unscharf, unvollständig oder gar widersprüchlich sein können. Dementsprechend ist der Roboter für die Planung und Ausführung der

Handhabungsaufgaben auf die Interaktion mit dem Menschen angewiesen. Dessen Inputs können zur kontinuierlichen Verbesserung der Lösung beitragen und ermöglichen es zudem, in zukünftigen Aufgaben die Ausführung noch besser auf den Nutzer und seine individuellen Bedürfnisse anpassen. Die (Weiter-)Entwicklung von generischen Grundfertigkeiten für die interaktive Unterstützung von Handhabungsaufgaben und der dafür benötigten Wahrnehmungs- und Manipulationsfähigkeiten war Kern des RoPha-Projekts.

Als Use Case für die beispielhafte Umsetzung und Integration der entwickelten Grundfunktionen wurde die mundgerechte Bereitstellung von Nahrung gewählt, da das Erbringen dieser Pflegeleistung mit Robotern zwar herausfordernd, aber als technisch machbar eingestuft wurde und bereits eine signifikante Erleichterung im Pflegealltag darstellt. Als Demonstrator für die Erprobung der entwickelten interaktiven Grundfertigkeiten wurde der Assistenzroboter Care-O-bot 4 (www.care-o-bot.de) des Fraunhofer IPA eingesetzt.

7.3 Methodische Herangehensweise

7.3.1 Szenarientwicklung

Eine wichtige Aufgabe gleich zu Projektbeginn war die Analyse der Bedürfnisse von Pflegebedürftigen im Kontext der Nahrungsaufnahme und damit einhergehend die Ausarbeitung möglicher Handhabungsaufgaben, bei denen ein Roboter unterstützen könnte. Dafür wurden in drei Einrichtungen der Stiftung evangelische Altenheim mit unterschiedlichen pflegerischen Versorgungsformen (Tagespflege, junge Pflege, Pflege dementiell erkrankter Personen) eine Vororthospitation organisiert. Zur Vor- und Nachbereitung und der pflegfachlichen, ethischen und diakonischen Begleitung wurden in den Einrichtungen trägerinterne Projektgruppensitzungen unter Beteiligung verschiedener Berufsgruppen (Pflegerwissenschaftler, Diakone, Sozialwissenschaftler und Betriebswirtschaftlern) sowie der Geschäftsführung durchgeführt.

Anhand der Ergebnisse der Hospitation wurden zwei Personas als potentielle Nutzer der robotischen Assistenzlösung identifiziert: eine Persona leidet an den Folgen eines Schlaganfalls (Hemiparese). Sie kann zwar noch selbstständig essen, hat aber Schwierigkeiten mit der Feinmotorik. Die zweite Persona leidet an einer inkompletten Querschnittslähmung ab der Halswirbelsäule und ist dadurch nicht mehr zu einer eigenständigen Nahrungsaufnahme in der Lage. Für beide Personas wurden relevante Assistenzfunktionen identifiziert. Dabei wurde anhand der Nähe zum Benutzer zwischen „Vorbereitenden Aufgaben“, „Assistenz am Tisch“ und „Direkter Interaktion“ unterschieden. In mehreren Workshops wurden einzelne Aktivitäten, die sowohl technisch machbar als auch vom Anwender gewünscht sind, als Entwicklungsschwerpunkte für das Projekt festgelegt.

7.3.2 ELS-Aspekte

Um eine umfassende Analyse ethischer, rechtlicher und sozialer Aspekte zu ermöglichen, wurde nach Festlegung der Personas und Szenarien ein Ethikworkshop anhand des MEESTAR-Modells (2013) unter der Leitung von Prof. Manzeschke durchgeführt. An diesem nahmen zu gleichem Anteil Vertreter der evangelischen Altenheimat und der Technologieentwickler aus dem Projekt teil.

Das MEESTAR Modell behandelt ethische Herausforderungen auf drei Betrachtungsebenen. Auf der individuellen Ebene wurde über die Grenze zwischen Fürsorge und Bevormundung diskutiert. Die nächste Betrachtungsebene stellte die organisatorische Ebene dar. Ein wichtiger Aspekt für die Pflegeeinrichtungen war es, dass der Roboter nur assistierende Funktionen übernimmt und nicht die eigentliche Pflege am Menschen ersetzt. Die dritte Ebene betrifft gesellschaftliche Aspekte. Hier ging es vor allem um die Akzeptanz von Robotern im Allgemeinen.

7.3.3 Risikoanalyse

Für die drei Themenfelder „Vorbereitenden Aufgaben“, „Assistenz am Tisch“ und „Direkte Interaktion“ wurde im weiteren Verlauf des Projektes eine Risikoanalyse durchgeführt. Ziel war es, potentielle Gefahrenquellen frühzeitig zu erkennen und entsprechende Schutzmaßnahmen zur Risikominimierung zu definieren. Dabei wurden für jede Teilaufgabe zunächst anhand der ISO 12100 (2011) relevante Gefährdungen identifiziert und im Folgenden auf Basis der ISO 13849-1 (2016) eine Risikobeurteilung durchgeführt, die unter anderem Kriterien wie das Schadensausmaß, die Eintrittswahrscheinlichkeit, die Häufigkeit und die Vermeidbarkeit berücksichtigt. Zusätzlich wurden Maßnahmen gegen alle identifizierten Ursachen zur Risikominderung bestimmt.

Als besonders relevante Risiken wurden die Handhabung scharfer oder spitzer Gegenstände in Nähe des Nutzers und das Verbrühen durch heiße Speisen identifiziert. Ersterem kann durch die Nutzung von speziellem Pflegebesteck, das Anreichen vor den Mund des Nutzers (nicht in den Mund hinein), durch die örtliche Trennung von Schneidvorgängen vom Nutzer (z. B. Brot schneiden in Küche statt am Tisch, ...), die ständige Überwachung der Nutzerposition und durch das Fixieren des Roboterarms bei der Aufnahme der Nahrung durch den Nutzer entgegengewirkt werden. Die Gefahr des Verbrühens kann durch eine Anlieferung des Essens in akzeptabler Temperatur oder die Integration von Temperatursensoren entschärft werden.

7.3.4 Software- und Systemarchitektur

Als Grundlage für die Integration der von den einzelnen Partnern entwickelten Softwarekomponenten wurde bereits in den ersten Projektmonaten eine Softwarearchitektur definiert. Diese beinhaltete sowohl die Daten, die zwischen einzelnen Softwarekomponenten ausgetauscht werden sollten, als auch das entsprechende Datenformat. Zudem wurde eine erste Version einer Ablaufsteuerung entwickelt, die im nachfolgenden Projektverlauf weiter ausgearbeitet und erweitert wurde. Auf Basis dieser Vorarbeiten war es im nachfolgenden Projektverlauf möglich, die einzelnen Module einfach zu kombinieren und somit die verschiedenen Anwendungsszenarien umzusetzen.

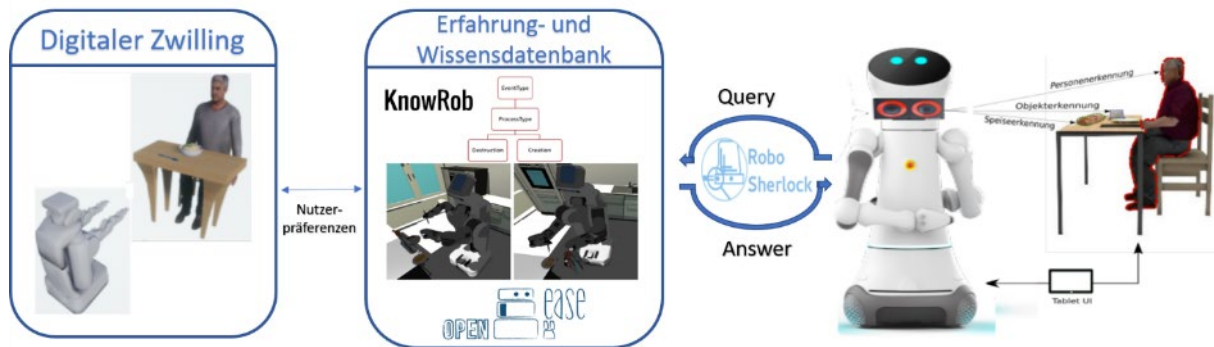


Abbildung 7.1: Übergeordnete Systemarchitektur

Abbildung 7.1 illustriert einen Teil der Komponenten der Perzeptions-Systemarchitektur, welche zentral war für das RoPHa-Projekt. Das Kernstück der Perception bildet eine Kombination der Frameworks RoboSherlock (Beetz et al., 2015) und KnowRob (Beetz et al., 2018) der Universität Bremen. Perzeptionsaufgaben (insbes. Personen-, Objekt- oder Speisenerkennung) können von der Ablaufsteuerung an RoboSherlock gestellt werden, die Lösung dieser erfolgt anschließend durch die intelligente Auswahl bzw. Kombination von Perzeptionsalgorithmen und Hintergrundwissen über Objekte, Umgebungen und die Fähigkeit des Roboters selbst. Das Hintergrundwissen wird in KnowRob repräsentiert, welches neben einer Wissensbasis auch die Inferenz von neuem Wissen aus bestehenden Fakten und Hypothesen erlaubt. Eine weitere Wissensquelle stellen in dem System auch episodische Erinnerungen dar, die entweder von einem echten Roboter stammen oder vom digitalen Zwilling. Der digitale Zwilling stellt ein Abbild des Roboters in einer fotorealistischen, physikbasierten und vollständig semantisch annotierten virtuellen Welt dar. In dieser virtuellen Welt werden unterschiedliche Szenarien der Mensch-Roboter-Interaktionen untersucht, vor allem hinsichtlich Nutzerpräferenzen. Gewonnenes Wissen dient dazu, den Roboter an unterschiedliche Menschenprofile anzupassen.

7.3.5 Umsetzung und Evaluierung

Nach Abschluss der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Analysen wurden die Grundfertigkeiten im Einzelnen (Interaktionskonzept, Perzeptionsfunktionen, mobile Manipulation) entwickelt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 7.4 näher beschrieben. Die Erprobung des Roboters im Kontext verschiedener praxisnahen Anwendungsszenarien erfolgte in zwei Iterationen in den Laboren des Fraunhofer IPA. Die Ergebnisse dieser Labortests sind in Kapitel 7.5 dargestellt.

7.4 Technische Ergebnisse

7.4.1 Entwicklung des Interaktionskonzepts

7.4.1.1 Graphische Nutzerschnittstelle

Auf Basis der beiden zuvor definierten Personas und Assistenzfunktionen wurde das graphische Nutzerinterface für das Tablet, über das die Steuerung des Roboters erfolgt, entwickelt. Für jede Persona wurde ein komplettes Szenario als ein in Teilschritte zerlegter Handlungsstrang, bestehend aus einem Prozess und

Teilschritten, definiert. Der Prozess stellt die gewünschte Unterstützung dar, wie zum Beispiel „Brot schneiden“. Die Teilschritte ermöglichen eine nutzspezifische Parametrierung des Prozesses, in Bezug auf das Brotschneiden beispielsweise die Dicke der Scheiben (Abbildung 7.2).

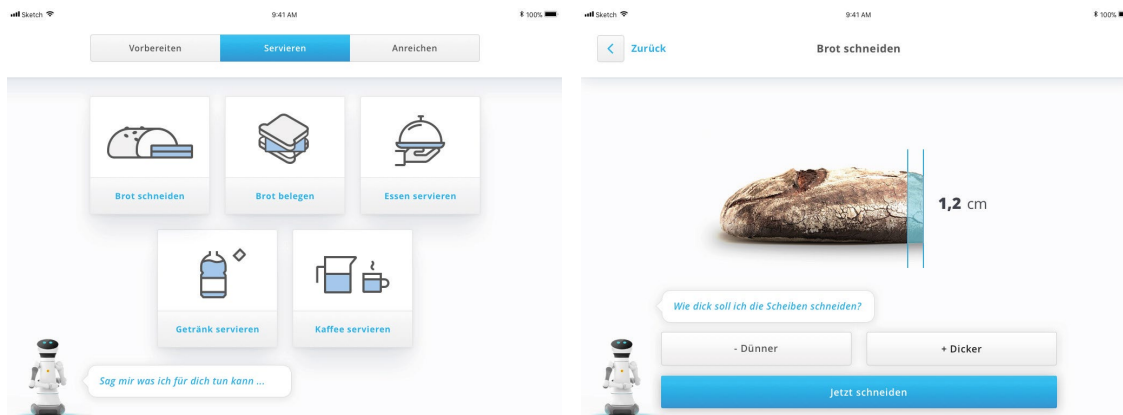


Abbildung 7.2: Beispielansichten der GUI für den Prozess „Brot schneiden“

7.4.1.2 Lernen von Nutzerpräferenzen in VR

Für eine zielgerichtete Unterstützung von älteren Personen ist es essentiell, dass die Roboter auf deren unterschiedliche und individuelle Fähigkeiten und Präferenzen eingehen. Für das Erlernen von Nutzerpräferenzen wurde im Projekt eine virtuelle Umgebung genutzt. Die zugrundeliegende Idee ist, dass potenzielle Nutzer die Assistenzfunktionen des Roboters virtuell erleben und dabei relevante Details, z. B. bei der Zubereitung von Mahlzeiten, beeinflussen können. Dies kann entweder durch Spracheingaben oder über die Bewegungsmuster von Händen erfolgen. Angesichts der Personas im RoPHA-Projekt war es nicht praktikabel, eine Präferenzerkennung zu entwerfen, welche die Interaktion mit Armen oder Händen beinhaltet, da diese möglicherweise nicht oder nur eingeschränkt von den avisierten Nutzergruppen bewegt werden können. Wir fokussierten uns dementsprechend auf die Entwicklung einer Gestenerkennung die aus Kopfbewegungen eine Ableitung von Nutzerpräferenzen im Aufgabenkontext des Roboters erlaubt. Der Prototyp der entwickelten Gestenerkennung setzt auf ein modifiziertes Dynamic-Time-Warping-Verfahren, welches für die eingesetzte VR-Umgebung implementiert und angepasst wurde. Der Ansatz ist allgemein gehalten und erlaubt das Trainieren und Erkennen von beliebigen Kopf-Gesten in VR.

7.4.2 Entwicklung robuster Perzeptionsfunktionen

7.4.2.1 Stereovision zur robusten Umgebungswahrnehmung

Zur robusten Erfassung der Umgebung bzw. von Menschen und Objekten wurde im Projekt die Stereokamera *rc_visard 160* von Roboception eingesetzt. Mittels des Stereomatching-Verfahrens *Semi-Global Matching (SGM)* (Hirschmuller, 2008) werden aus Stereobildpaaren Disparitätsbilder errechnet, welche wiederum in 3D-Punktwolken umgewandelt werden können. Diese an sich passive Erfassung wird im Projekt durch den zusätzlichen Einsatz eines Projektors ergänzt. Dieser projiziert ein zufälliges Muster in die Szene und versorgt so auch strukturarme Oberflächen mit einer künstlichen Textur, die vom SGM verwendet werden kann. Dem SGM

nachgelagert sind Verarbeitungsschritte, welche die erstellten Disparitätsbilder verbessern, indem sie Löcher f llen, Rauschen unterdrücken und die Punktwolke mittels eines Primal-Dual-Algorithmus (Chambolle & Pock, 2010) glätten. Ein beispielhaftes Resultat dieser Bilderfassung ist in Abbildung 7.3 zu sehen.



Abbildung 7.3: Die Roboception Stereokamera rc_visard mit Projektor (links). Eine Beispielszene mit projiziertem Muster (Mitte). Die mittels SGM und dem Primal-Dual-Algorithmus rekonstruierte und geglättete 3D-Szene (rechts).

7.4.2.2 Objekterkennung

Um den verschiedenen visuellen Charakteristika von alltäglichen Objekten im Haushalt zu genügen, wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Objekterkennungspipelines in das System integriert. Jede Erkennungspipeline ist dabei als sog. Annotator in RoboSherlock eingebettet und reichert automatisch die eingehenden Bild- und 3D-Tiefendaten mit Informationen wie Größe, Position oder Kategorie der erkannten Objekte an.

Für die Erkennung von texturierten Gegenständen, wie z. B. verpackter Ware aus dem Supermarkt, werden zunächst natürliche Bildmerkmale (z. B. AGAST (Mair et al., 2010) oder BRISK (Leutenegger et al., 2011) aus dem 2D-Bild extrahiert, zusammen mit der Tiefeninformation in 3D-Merkmale umgerechnet und mit in einer entsprechenden Datenbank abgelegten Objektmodellen abgeglichen. Die daraus berechneten 3D-Objekt-Hypothesen werden schlussendlich noch einmal mit den Tiefeninformationen verfeinert und validiert. Ein Ergebnis einer solchen Erkennung ist in Abbildung 7.4 dargestellt.



Abbildung 7.4: Erkennung und Lokalisierung von texturierten Objekten in einem Table-Top-Szenario: Grauwertbild der Roboception Stereokamera (links). Punktwolke mit erkannten Objekten gerendert als Farbmodelle (rechts).

Für die Erkennung von nicht-texturierten Objekten, wie z. B. Geschirr, ist der Einsatz des Musterprojektors erforderlich, da diese Objekte typischerweise keinerlei verwendbare Merkmale aufweisen. Algorithmisch basiert das Vorgehen auf globalen, formbasierten Ansätzen zur Objekterkennung. Dabei werden zunächst durch eine Vorsegmentierung der Punktwolke – z. B. durch die Table-Top-Annahme – Objekt-Cluster erstellt. Für jedes Cluster werden geometrische Merkmalsdeskriptoren (z. B. OUR-CVFH2 (Aldoma et al., 2012) oder PFH (Rusu et al., 2008)) berechnet und in ein Histogramm überführt. Ein Vergleich dieses Histogramms mit vorher (z. B. künstlich aus CAD-Modellen) generierten Modelldaten liefert die Objektklassifizierung und eine erste Schätzung der Objektpose, die daraufhin nochmals validiert wird. Beispielhafte Ergebnisse dieses Vorgehens sind in Abbildung 7.5 dargestellt.

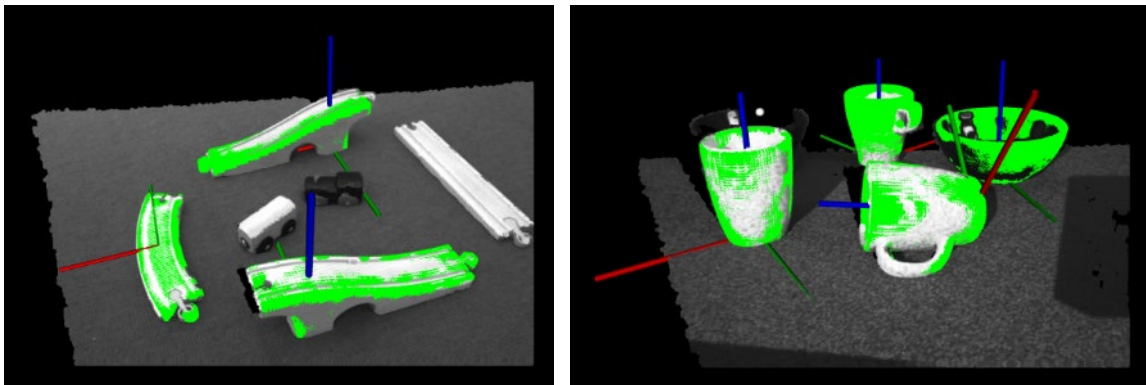


Abbildung 7.5: Erkennung und Lokalisierung von nicht texturierten Objekten in einem Table-Top-Szenario. Beide Abbildungen zeigen die unter Zuhilfenahme der Musterprojektion generierte Punktwolke mit grün markierten erkannten und lokalisierten Objekten.

Sowohl für die texturbasierte als auch die formbasierte Erkennung sind Objektmodelle erforderlich, die in einer Objektdatenbank abgelegt und zum Vergleich von Merkmalsdeskriptoren herangezogen werden können. Im Rahmen einer Kooperation der Projektpartner mit der Firma Kaptura (kaptura.de) konnte die Entwicklung einer ScanStation für die Erstellung von farbigen 3D-Modellen beliebiger Objekte vorangetrieben werden. Die Technologie wird im RoPHa-Projekt dazu verwendet, Objektmodelle von allen Objekten, die später in der Szene wiedererkannt werden sollen, zu erstellen.



Abbildung 7.6: Prototyp der ScanStation (links) mit integrierter Stereokamera rc_visard und Musterprojektor von Roboception (Mitte). Ein beispielhaftes mit der ScanStation erstelltes Objektmodell (rechts).

7.4.2.3 Erkennung und Lokalisierung von Speisen auf Tellern

Für eine zuverlässige und auf den Nutzer angepasste Assistenz bei der Nahrungsaufnahme ist es notwendig, die verschiedenen Speisen auf dem Teller zu erkennen und zu lokalisieren. Für diesen Zweck wurde dabei eine attributbasierte Klassifizierungsmethode entwickelt. Als beschreibende Attribute wurden Farben und Texturen ausgewählt, da die meisten Speisen hiermit gut auseinandergelassen werden können.

Für die Farben wurde entschieden, zusätzlich zu den allgemeinen Farben (Rot, Grün, Blau, Gelb, Orange, Violett, Schwarz, Weiß, Grau) Mischfarben (wie rötliches-Orange oder grünliches-Gelb) in die Modelle aufzunehmen, so dass eine detailliertere Beschreibung der zu erkennenden Objekte möglich wird. Es wurden verschiedene Machine Learning Algorithmen implementiert, welche mithilfe von Beispielen lernen sollen, die einzelnen Farbklassen zu erkennen. Das erfolgreichste Verfahren basiert auf künstlichen neuronalen Netzen (Abbildung 7.7).

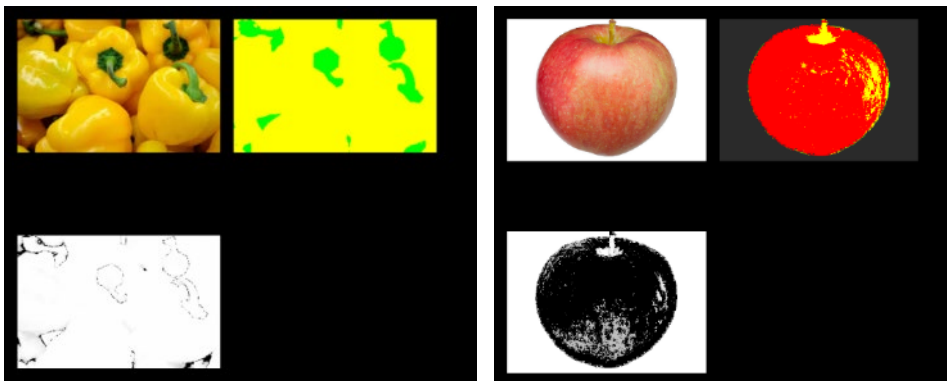


Abbildung 7.7: Ergebnisse der Farbklassifizierung. Links oben: Ursprungsbild, rechts oben: resultierende Farbklassifizierung (dunkelgraue Pixel wurden ignoriert), unten: resultierende Wahrscheinlichkeiten für die Farben (je heller desto wahrscheinlicher).

Zusätzlich zu den Farben hat sich in der Literatur die Textur von Objekten als sehr wichtiges Attribut bewährt, siehe z. B. Farinella et al. (2014). Eine Möglichkeit, die Texturinformationen zu integrieren, ist das Texturattributsystem von Bormann et al. (2016), welches verschiedene Attribute der Texturen erkennt und auf einer Skala von 1-5 darstellt wie stark dieses Attribut im aktuellen Fall zutrifft. Die Erkennung der Texturattribute wird durch die Berechnung von SIFT Deskriptoren in einzelnen Bildern mit einer anschließenden Berechnung eines „Improved Fisher-Vector“ (IFV) ermöglicht.

Für die Speisenerkennung werden die verschiedenen Farb- und Texturklassen für ein Objekt extrahiert und als Vorgabe für kombinierte Klassifizierungsalgorithmen genutzt. Hierbei kommt der „k-means“ Algorithmus zum Einsatz. Dabei konnte eine Genauigkeit von 81,8% für die Speisentypen Brotlaib, Brokkoli, Blumenkohl, Käse, Kartoffelbrei, Pasta, Erbsen, Porridge, Reis, Wurst und Steak erzielt werden.

Neben der Erkennung der Speisen ist es für die nachfolgende Handhabung notwendig, diese präzise auf dem Teller zu lokalisieren. Der hierzu umgesetzte Algorithmus nutzt das Konzept von Superpixeln. Dieses Verfahren teilt das vorgegebene Bild in viele Einzelsegmente auf, wobei die Kanten im Bild als Grenzen dieser Segmente eingehalten werden. Die Superpixel der einzelnen Teile der Speise sind dabei meist

sehr ähnlich zueinander und unterschiedlich zu anderen Speisen, was eine weitere Verarbeitung der Ergebnisse ermöglicht, indem man ähnliche Teile zu einer Region zusammenfasst (Abbildung 7.8).

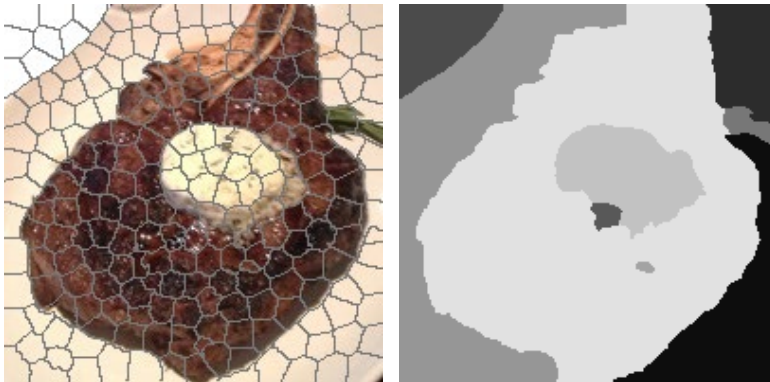


Abbildung 7.8: Initiale Segmentierung unter Verwendung von Superpixeln. (links), finale Segmentierung der Speise auf dem Teller (rechts).

Da die Größe der Superpixel nicht zu klein gewählt werden sollte, können sehr feine Details des Essens zu einem sogenannten „leakage problem“ führen, das unter anderem dazu führt, dass der Teller mit der Speise als ein zusammenhängendes Segment angesehen wird. Um dieses Problem zu umgehen, bieten sich sogenannte Konturdetektoren an, welche die Kanten zwischen verschiedenen Objekten erkennen können. In der Literatur haben sich dabei DeepLearning Methoden als besonders effektiv für die Erkennung von Objektkonturen bewährt, die im Rahmen des Projektes auf die neue Anwendung angepasst wurden. Dies passierte durch eine Erstellung von Trainingsdaten basierend auf dem Food-101 Datensatz (Bossard et al., 2014) und einem Training der künstlichen Neuronalen Netze auf Basis der Arbeit von Yang et al. (2016) (Abbildung 7.9).

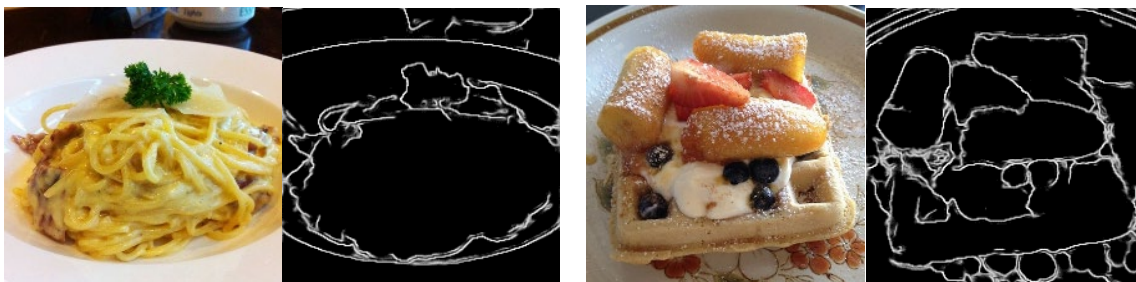


Abbildung 7.9: Zwei Zwischenergebnisse des trainierten Konturdetektors. Links ist das Originalbild, rechts die detektierten Konturpixel (je heller ein Pixel, desto wahrscheinlicher ist er ein Konturpixel).

7.4.2.4 Wahrnehmung des Menschen

Für das Anreichen von Nahrung ist es wichtig, dass der Roboter die Position des Menschen am Tisch erkennen kann. Diese Information kann zum einen für die Erkennung der Mundposition und andererseits für die Kollisionsvermeidung mit dem Menschen verwendet werden. Im Rahmen des Projekts wurde dafür eine Methode umgesetzt, welche auf dem Mask R-CNN (He et al., 2017) Algorithmus basiert. Diese definiert einerseits die grobe Position des Menschen mithilfe einer sogenannten Bounding-Box und zusätzlich alle Pixel innerhalb dieser Box, die zu dem erkannten Menschen gehören.

Da Mask R-CNN nur auf zweidimensionalen RGB Bildern arbeitet, war es notwendig, die extrahierten Informationen in den dreidimensionalen Raum zu überführen, damit die relative Position von Roboter zum Nutzer bekannt ist. Da die in diesem Projekt verwendete `rc_visard` Kamera von Roboception bereits kalibrierte Tiefen- und Farbdaten bereitstellt, ist es möglich, die Pixel der RGB Bilder direkt den Pixeln der Tiefenbilder zuzuordnen. Daher ist es ausreichend, die von Mask R-CNN markierten Pixel aus dem Tiefenbild auszuschneiden, damit die Tiefendaten des Oberkörpers des Nutzers extrahiert werden können (Abbildung 7.10).

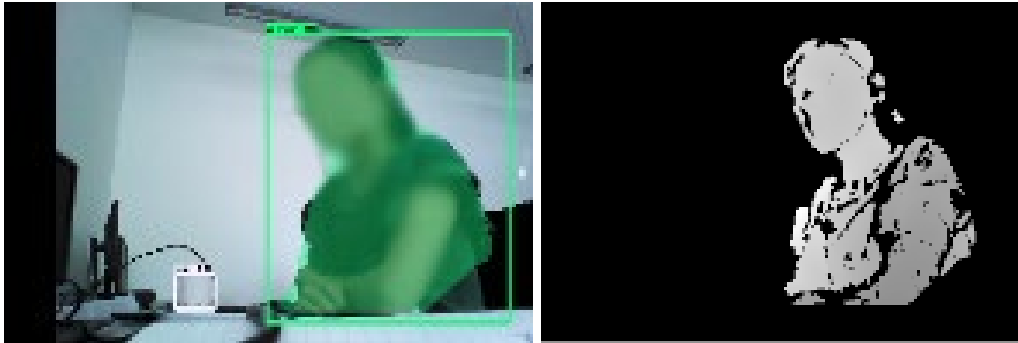


Abbildung 7.10: Der durch den angepassten Mask R-CNN Ansatz erkannte Oberkörper mit einer entsprechenden Segmentierung in einem RGB Bild (links), Die ausgeschnittenen Tiefenwerte auf Basis der von Mask R-CNN erkannten Segmente. Die Grauwerte geben dabei an wie weit ein Pixel von der Kamera entfernt ist, wobei ein höherer Wert (hellere Pixel) eine größere Entfernung bedeutet (rechts).

7.4.2.5 Aufgabenspezifische Auswahl / Parametrierung von Perzeptionsverfahren

Die Perzeption in unstrukturierten häuslichen Umgebungen ist mit einigen Herausforderungen verbunden. Beispielsweise kann es immer wieder vorkommen, dass die Erscheinung von Objekten durch neue Designs verändert wird oder neue, bisher unbekannte Objekte genutzt werden sollen. Das in RoPHA eingesetzte RoboSherlock-System bietet dafür einen Rahmen zur wissensbasierten Anwendung verschiedener „Perzeptionsexperten“, die Teile der eingehenden, unstrukturierten Sensordaten anhand ihrer jeweiligen Kompetenzen mit gewonnenen Informationen annotieren und darauf basierend eine abschließende Prädiktion des Umgebungszustands errechnen (Gliozzo et al., 2013) (Abbildung 7.11).

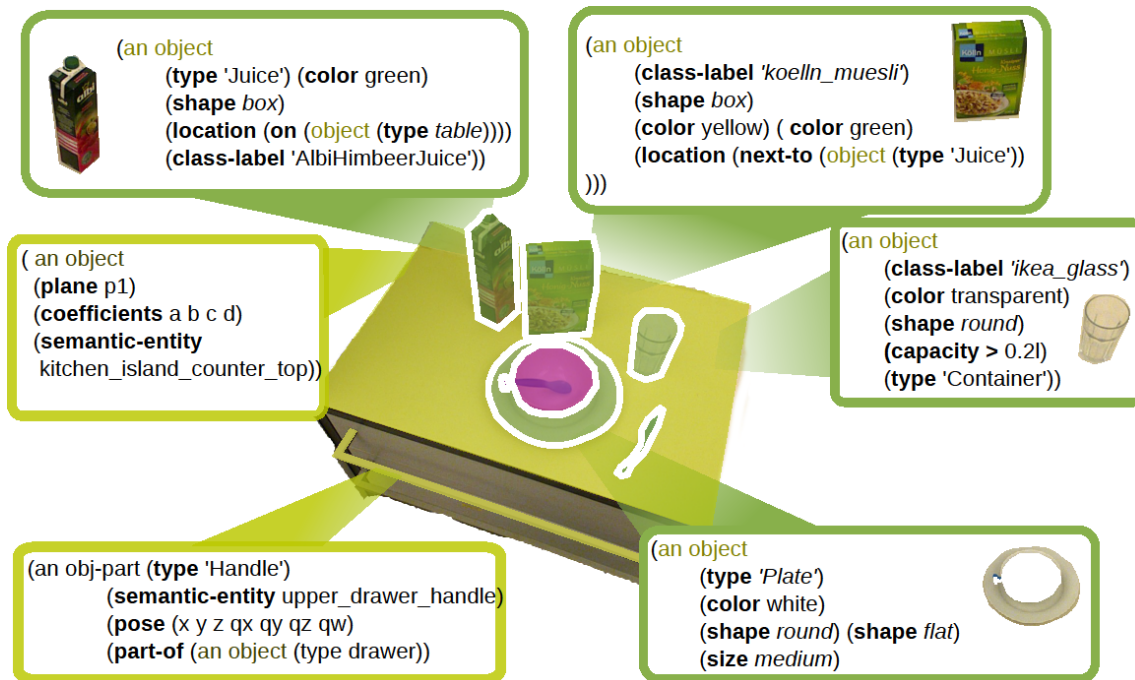


Abbildung 7.11: Haushaltsszene, in der die Annotationen der eingegangenen Bilddaten mit RoboSherlock in einer gemeinsamen, typisierten Datenstruktur namens Common Analysis Structure (CAS) repräsentiert werden.

Beginnend mit der Segmentierung des Eingabebildes werden Objektkandidaten ausgemacht, die durch nachfolgende Algorithmen genauer auf bestimmte Charakteristika untersucht werden. Dabei können je nach Problemstellung bereits unterschiedliche Algorithmen von Nöten sein. So können beispielsweise große Objekte wie eine Müsli-Box oder ein Becher mit 3D-basierten Verfahren und Sensordaten von preiswerten, rauschbehafteten 3D-Sensoren erkannt werden, während flache Objekte wie Besteck oder transparente Objekte wie Gläser mitunter besser anhand ihrer Konturen mit 2D-Bild-basierten Verfahren zu erkennen sind. Auf den segmentierten Objekthypothesen können die eingesetzten Perzeptionsalgorithmen extrahierte Informationen, wie beispielsweise Form, Farbe, Verortung oder Typ, hinterlegen.

7.4.3 Umsetzung der sicheren mobilen Manipulation

Im Rahmen des Projekts wurde eine Bibliothek elementarer Handhabungsfertigkeiten erstellt und implementiert. Dazu gehört insbesondere das Schneiden von Nahrungsmitteln, wie etwa Brot, Kuchen und Obst. Mit dem linearen und sägeartigen Auftrennen wurden dabei zwei unterschiedliche Schneide-Strategien untersucht (Abbildung 7.12).

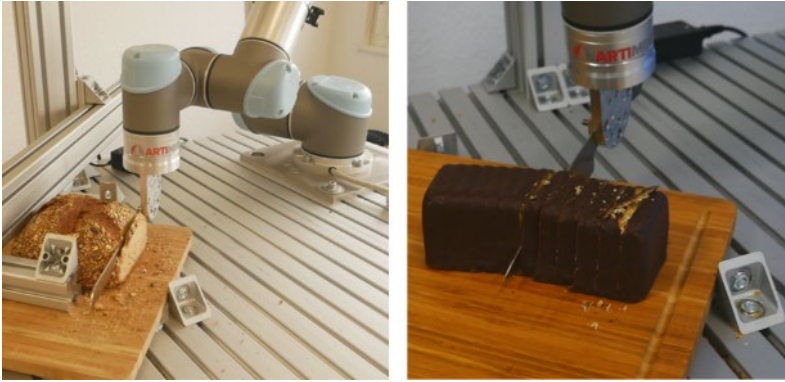


Abbildung 7.12: Sägendes Schneiden (links), lineares Schneiden (rechts).

Als weitere Grundfertigkeiten wurden das Darreichen eines Getränks und das Aufnehmen von Nahrung mit einem Löffel entwickelt (Abbildung 7.13).

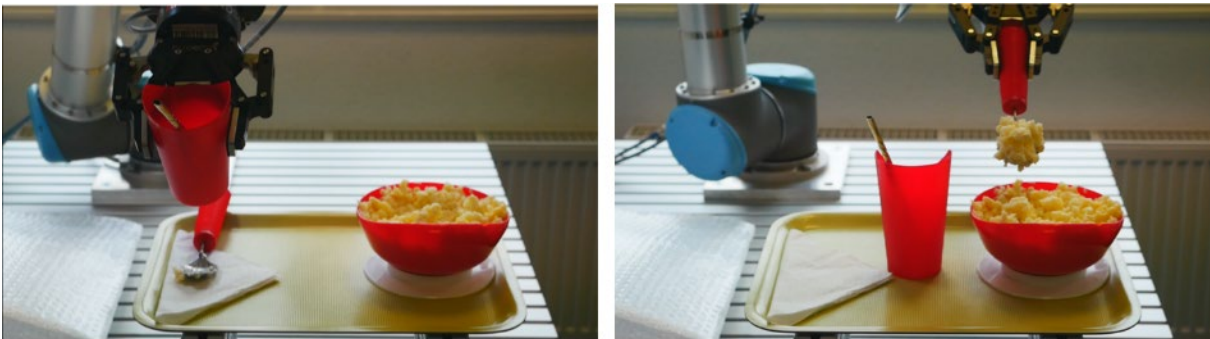


Abbildung 7.13: Darreichung eines Getränks (links), Auslöffeln und Abschüttern von Milchreis (rechts).

Des Weiteren wurden die Grundfertigkeiten Bestreichen (etwa von Butter oder Marmelade auf Brot), flächiges Ausschütten (etwa von Pfeffer oder Zucker) und das Ausbringen viskoser Flüssigkeiten (etwa Honig auf ein Brot) umgesetzt. Dabei sind die Kenngrößen der Bewegung, also etwa die Anzahl der Streichbewegungen, die Streichrichtung oder die zu bedeckende Fläche, vom Nutzer parametrierbar. Auch werden dynamische Parameter berücksichtigt, die für die Funktionalität der Bewegung bedeutend sind. Insbesondere wird beim Ausschütten mit starken Be- und Entschleunigungen gearbeitet, um das Material (z. B. Salz oder Zucker) mit Kraft aus dem Behälter zu befördern.

Zur Sicherung der Natürlichkeit der Bewegung wurden Gütekriterien entwickelt, die diese hinsichtlich Menschenähnlichkeit bewerten. Diese beruhen auf Heuristiken wie minimale Anstrengung / Kraftaufwendung oder minimale Krafteinwirkung auf die Gelenke. Diese Herangehensweise ist dadurch motiviert, dass Menschen sehr effiziente Bewegungen durchführen und dabei instinktiv Belastungen auf Gelenken vermeiden. Im Umkehrschluss ist davon auszugehen, dass Bewegungen, die diese Kriterien berücksichtigen, auch natürlich wirken. Auch kann der Mensch in die Bahnplanung mit einbezogen werden. So wird etwa bei der Zeigegeste die Position des Menschen und dessen Blickrichtung einbezogen, um sicherzustellen, dass die Geste gut gesehen werden kann.

Grundlage für die Bibliothek ist die ArtiMinds RPS (Robot Programming Suite), mit der die Grundfertigkeiten flexibel angepasst werden können. Dabei wird insbesondere die

Bahnplanung und Kollisionserkennung bzw. -vermeidung der RPS genutzt, so dass unterschiedliche Kinematiken und Robotersysteme die Grundfertigkeiten nutzen können.

7.5 Nutzertests

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Testreihen mit Mitarbeitern der Stiftung evangelische Altenheimat in den Laboren des Fraunhofer IPA durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien vorgestellt und konnten von den Besuchern auch selbst erlebt und ausprobiert werden. Für die erste Testreihe wurde im Kontext der „Direkten Interaktion“ das Anreichen von Speisen realisiert. Dabei hatte der Nutzer die Wahl zwischen zwei verschiedenen Speisen, die er mithilfe des Roboters essen konnte. Die Wahl fiel dabei auf Kartoffelbrei und Erbsen, da diese beiden Speisen technisch gesehen handhabbar sind und gleichzeitig gut zusammenpassen. An der Evaluierung nahmen 10 Personen teil, 5 davon testeten den Roboter selbst, die restlichen beurteilten die Interaktion anhand der gemachten Beobachtungen. Die zweite Testreihe beschäftigte sich mit dem Bereich der „Assistenz am Tisch“ und im Speziellen mit dem Bestreuen und Schneiden von Waffeln (Abbildung 7.14). Hier wurde der Roboter von acht Personen, aufgeteilt in zwei Gruppen, getestet.



Abbildung 7.14: Betrachtete Szenarien: Anreichen, Bestreuen und Zerschneiden von Speisen

Nach Abschluss der Tests füllten alle Teilnehmer einen Fragebogen aus. Dieser war in allgemeine und szenariospezifische Fragen unterteilt. Bei den allgemeinen Fragen wurde der Roboter als angenehm beurteilt und sowohl die Bedienung über das Tablet als auch die Rückmeldungen, die der Roboter per Sprache gab, als intuitiv und verständlich bewertet. Kritik gab es bezüglich der Wartezeiten und bezüglich des projizierten Musters. Bei den szenariospezifischen Fragen wurden die Bewegungen des Roboters als vorhersehbar und angenehm beurteilt. Verbesserungspotenziale wurden insbesondere in Bezug auf die Geschwindigkeit und auch die Möglichkeit, Essen vom Besteck (hier Löffel) entgegenzunehmen, gesehen, die sich noch nicht im Bereich einer gewöhnlichen Handhabung bewegen.

7.6 Implikationen für die Pflegepraxis

Im Rahmen der Nutzertests unter Beteiligung einiger Pflegepraktiker, aber auch Heimberätern, wurde klar, dass für den Einsatz von Assistenzrobotern im häuslichen Umfeld noch einige technische Herausforderungen zu bewältigen sind. Insgesamt

können sich die Anwendungspartner einen Einsatz des Systems im häuslichen / privaten Umfeld gut vorstellen. Die Robotik kann, wenn ausgereift und weitere bereits geplante Optionen implementiert wurden, eine große Unterstützung in den eigenen vier Wänden darstellen, um einen gewissen Grad der Autonomie trotz Einschränkungen möglichst lange zu erhalten. Einschränkend muss angemerkt werden, dass diverse Voraussetzungen an die Nutzer-Compliance zu beachten / einzuhalten sind. Außerdem muss das häusliche Umfeld den technischen und räumlichen Anforderungen des Systems, u. a. für eine störungsfreie Anwendung, angepasst werden. Individuelle Präferenzen von Nutzern können den Einsatz des Systems beschleunigen oder auch ausbremsen.

Die bisherigen Erkenntnisse stützen sich alleine auf Annahmen, Beobachtungen und Feedbacks von gesunden Personen ohne Handicaps und von der Grundlage auf Testsituationen im Labor. Inwiefern tatsächlich eingeschränkte Menschen (wie in den beiden Szenarien beschrieben) in der Häuslichkeit auf die Nutzung eines Assistenzroboters zurückgreifen würden, ist schwer vorauszusagen. Wenn sich das System nach Nutzerpräferenzen und -bedarfen konfigurieren ließe, bspw. unterschiedliche Handicaps in somatischer, sprachlicher oder auch psychischer Hinsicht berücksichtigt würden, würde sich der vom Nutzer empfundene Mehrwert und dadurch auch die Bereitschaft zur Nutzung erhöhen. Zudem sollte die Interaktion mit dem Nutzer „flüssig“ und sehr leicht nachvollziehbar gestaltet sein.

Selbst für einen Assistenzroboter, der eine Vielzahl adaptierbarer Assistenzfunktionen anbietet und die Anforderungen an eine intuitive Bedienung erfüllt, gibt es noch Hürden auf dem Weg in die Praxis. Insbesondere müsste die Refinanzierung des Roboters geklärt werden. Zum Beispiel ist zu beachten, ob es hier Verordnungen als Hilfsmittel via Krankenkasse geben wird oder ob der Roboter als Eigenleistung angeschafft werden muss, was das Spektrum an möglichen Nutzern reduziert.

7.7 Forschungsausblick

Als ein generelles Fazit aus den Ergebnissen im Bereich der Objekterkennung im Projekt lässt sich sagen, dass sich robuste Perzeptionsfunktionen in unstrukturierten Umgebungen nur schwer bis gar nicht allein mit klassischen, modellbasierten Objekterkennungsmethoden umsetzen lassen. Auf der einen Seite zeigt das Beispiel eines mit Nahrung befüllten Tellers, dass, selbst wenn ein genaues Objektmodell (CAD-Modell) vorliegt, dessen zuverlässige Erkennung mit klassischen konfidenzbasierten Erkennungsverfahren nicht gewährleistet werden kann. Darüber hinaus ist eventuell nicht für jedes spezifische Objekt im Haushalt ein entsprechendes Objektmodell gegeben. Auf der anderen Seite versprechen die enormen Entwicklungen im Bereich des maschinellen Lernens generell Lösungsmöglichkeiten für die im Forschungskontext gegebenen Problemstellungen. Hier liegt aus unserer Sicht noch großes Potential für die Entwicklung und Verbesserung von robusten Perzeptionsfunktionen, zum Beispiel durch virtuell erstellte Trainingsdaten, oder ad-hoc durch Interaktion mit Menschen erlernte Objektmodelle.

Eine zuverlässige Erkennung von Objekten und Speisen vorausgesetzt, bietet das Themenfeld „Food Robotics“ auch in umfassenderem Sinne Potential für Folgeaktivitäten. Dabei könnten neben den hier adressierten pflegebedürftigen Nutzern auch gewerbliche Einsatzfelder eine Rolle spielen, bspw. durch die Nutzung

der entwickelten Grundfertigkeiten für automatisierten Buffets in Hotels oder Gaststätten.

7.8 Literaturverzeichnis

Aldoma A, Tombari F, Rusu, R.B, & Vincze, M. (2012) OUR-CVFH – Oriented, Unique and Repeatable Clustered Viewpoint Feature Histogram for Object Recognition and 6DOF Pose Estimation, Joint DAGM-OAGM Pattern Recognition Symposium.

Beetz, M., Bálint-Benczédi, F., Blodow, N., Nyga, D., Wiedemeyer D. & Márton Z. (2015). "Robosherlock: Unstructured information processing for robot perception." International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, 2015, pp. 1549-1556, doi: 10.1109/ICRA.2015.7139395.

Beetz, M., Beßler, D., Haidu, A., Pomarlan, M., Bozcuoğlu, A. K. & Bartels, G. (2018). "KnowRob 2.0 -- A 2nd Generation Knowledge Processing Framework for Cognition-enabled Robotic Agents", In International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, QLD, 2018, pp. 512-519, doi: 10.1109/ICRA.2018.8460964.

Bormann, R., Esslinger, D., Hundsdoerfer, D., Haegele, M., & Vincze, M. (2016, June). Texture characterization with semantic attributes: Database and algorithm. In Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics (pp. 1-8). VDE.

Bossard, L., Matthieu, G., & Van Gool, L. (2014) "Food-101–mining discriminative components with random forests." European Conference on Computer Vision. Springer, Cham.

Chambolle, A. & Pock, T. (2010). "A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging".

Norm DIN EN ISO 12100:2011-03. (2011). Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010). Frankfurt a. M.: Beuth Verlag.

Norm DIN EN ISO 13849-1:2016-06. (2016). Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2015). Frankfurt a. M.: Beuth Verlag.

Farinella, G., Moltisanti, M., & Battiato, S. (2014). Classifying food images represented as bag of textons. In 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (pp. 5212-5216). IEEE.

Gliozzo, A., Biran, O., Patwardhan, S, & McKeown, K. (2013). "Semantic technologies in IBM Watson." Proceedings of the Fourth Workshop on Teaching NLP and CL. 2013.

He, K., Gkioxari, G., Dollár, P. & Girshick, R. (2017). Mask r-cnn. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision (pp. 2961-2969).

Hirschmuller, H. (2008) "Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information," In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.

Leutenegger, S., Chli, M., Siegwart, R. Y. (2011). BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints. In Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision, Barcelona, Spain, 6–13 November 2011; pp. 2548–2555.

Manzeschke, A., Weber, K., Rother, E., & Fangerau, H. (2013). Ethische Fragen im Bereich altersgerechter Assistenzsysteme: Ergebnisse der Studie.

Mair, E., Hager, G. D., Burschka, D., Suppa, M. & Hirzinger, G., (2010). Adaptive and generic corner detection based on the accelerated segment test. In: Computer Vision ECCV 2010, Springer, pp. 183–196.

Rusu, R. B., Marton, Z.C., Blodow, N. & Beetz, M. (2008) Learning Informative Point Classes for the Acquisition of Object Model Maps, International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV).

Yang, Jimei, Price, B., Cohen, S., Lee, H. & Yanget, M-H. (2016). "Object contour detection with a fully convolutional encoder-decoder network." Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016.

8 MoblLe – Physische Mensch-Roboter-Interaktion für ein selbstbestimmtes Leben

Annalies Baumeister, Marion Gebhard, Jens Gerken, Felix Goldau, Axel Graeser, Ralf Hornscheidt, Barbara Klein, Matthias Krinke, Max Pascher, Sarah Stalljann

Projektpartner: Westfälische Hochschule (WHS), Friedrich-Wilhelm-Bessel-Institut Forschungsgesellschaft m. b. H. (FWBI), Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS), Hidrex GmbH (Hidrex), pi4_robotics GmbH (pi4)

8.1 Zusammenfassung des Projekts

Im Projekt MoblLe werden interaktive Grundfertigkeiten von Robotern erforscht und realisiert, um die Interaktion zwischen Mensch und Roboter zu verbessern. Dabei werden Szenarien ohne und mit direktem Kontakt zwischen Mensch und Roboter betrachtet. Die entwickelten Grundfertigkeiten der Roboter werden genutzt, um Personen mit unterschiedlichen körperlichen Einschränkungen, wie z. B. Tetraplegiker, im Alltagsleben und bei der Arbeit zu unterstützen. Mit Hilfe von Kopf- und Augenbewegungen im Szenario ohne Körperkontakt und mittels Messungen der Kontaktkraft im Szenario mit Körperkontakt steuert die Person den Roboter im dreidimensionalen Raum. Für die Roboter-Mensch-Interaktion kommen u. a. Augmented Reality Brillen und verschiedene visuelle und akustische Signale zum Einsatz. So wird die beabsichtigte Handlung des Roboters visuell für den Nutzer dargestellt. Durch ein nutzerzentriertes Interaktionsdesign mit intuitiv nutzbaren Befehlen werden Aufmerksamkeitsverluste minimiert und der mentalen Ermüdung vorgebeugt. Zur Evaluierung werden die entwickelten interaktiven Grundfertigkeiten in einem Szenario „Unterstützung beim Trinken“ untersucht. Dazu wird das Trinken mit und ohne direkten Körperkontakt betrachtet. Die Anforderungen an die Sicherheitssysteme unterscheiden sich wesentlich für die beiden Szenarien. Für den Fall „Trinken ohne Körperkontakt“ wird der Becher in die Nähe des Nutzers geführt. Ein Strohhalm dient als Trinkhilfe. Beim Szenario mit Körperkontakt bewegt der Roboter den Becher so lange in Richtung Mund des Nutzers bis Körperkontakt hergestellt ist. Die Nutzer können mit den Lippen die Kontaktkraft variieren und so den Roboter steuern, um einen natürlichen Trinkvorgang zu ermöglichen. Das Szenario Trinken wurde gewählt, da hier bei Körperkontakt besonders hohe Anforderungen an die Begrenzung der Kontaktkräfte, den Anstieg der Kontaktkräfte und das Sicherheitssystem bestehen. Es wurde die Hypothese formuliert, dass die Beherrschung dieses Szenarios als Referenz dienen kann für andere Szenarien mit Körperkontakt.

8.2 Hintergrund

Menschen, die durch einen Unfall oder aufgrund von Multipler Sklerose, Muskeldystrophie, Tetraplegie oder Krankheiten mit ähnlichen Auswirkungen (im Folgenden Tetraplegiker genannt) unter multiplen körperlichen Beeinträchtigungen leiden, sind auf Unterstützung im Alltagsleben angewiesen. Diese Unterstützung wird von pflegenden Personen geleistet. Assistenzroboter mit interaktiven Grundfertigkeiten können den körperlich beeinträchtigten Personen mehr

Selbstständigkeit und den pflegenden Personen Entlastung bieten. In mehreren Vorläuferprojekten, die aus Sicherheitsgründen alle keinen Körperkontakt beinhalteten, wurden die grundsätzlichen positiven Auswirkungen beim Einsatz von Unterstützungsrobotern bereits nachgewiesen.

8.3 ELSI Fragestellungen der Mensch-Roboter-Interaktion

Annalies Baumeister, Barbara Klein (FRA-AUS)

8.3.1 Methodische Herangehensweise

In Moblle wurde eine ethnografische Analyse durchgeführt mit dem Ziel, ein tieferes Verständnis für die Lebensweise, Werte und Einstellungen der zukünftigen NutzerInnen zu entwickeln. U. a. wurden die Bedarfe und Befürchtungen gegenüber einer robotischen Trinkhilfe erhoben. Dabei wurden Interviews, Videographie und eine fotografische Dokumentation bei 15 Personen eingesetzt. Die Auswertung erfolgte qualitativ inhaltlich nach Mayring (2015) mit einem Fokus auf akzeptanzfördernde und -hemmende Aspekte. Die Videoanalyse wurde hermeneutisch wissenssoziologisch angelehnt nach Reichertz (2011) und die Fotoanalyse nach Pilarczyk und Mietzner (2010) durchgeführt. Die Ergebnisse flossen als Handlungsempfehlungen in die technische Weiterentwicklung von Moblle ein und waren die Basis für die Anpassung des MEESTAR Modells nach Manzeschke et. al. (2013), das in den drei ExpertInnen-Workshops zu den ethischen Implikationen eingesetzt wurde.

8.3.2 Ergebnisse

Ergebnisse der ethnografischen Analyse mündeten in Handlungsempfehlungen für die technologische Entwicklung mit folgenden Kernaussagen:

- **Akzeptanz:** Alle ProbandInnen standen der Idee, einen Roboterarm als Trinkhilfe zu nutzen, offen gegenüber. Da sie aus gesundheitlichen Gründen täglich 2-3 Liter Flüssigkeit trinken müssen, erhoffen sie sich damit mehr Selbstständigkeit und Privatsphäre.
- **Trinken mit und ohne Körperkontakt:** Empfohlen wurde weiterhin die Szenarien mit und ohne Körperkontakt zu bearbeiten. Die meisten ProbandInnen bevorzugten es, mit dem Strohhalm zu trinken. Ein Strohhalm ist jedoch ungeeignet, wenn es sich um warme Getränke handelt oder man das Getränk genießen möchte.
- **Steuerung/ Interaktionsdesign:** Die Nahrungsaufnahme erfolgt im Rollstuhl und im Bett liegend. Ein Roboterarm sollte daher in liegender und sitzender Position bzw. vom Bett und vom Rollstuhl aus nutzbar sein. Häufig wurde die Bedienung über Sprachsteuerung und eine „plug and play“-Anwendung gewünscht.
- **Anbringung des Roboterarms:** Die Befestigung des Roboterarms sollte den individuellen Anforderungen gerecht werden, z. B. am Rollstuhl oder Bett. Aus Platzgründen wird ein mobiles Modul mit Roboterarm meistens abgelehnt, da bereits andere große Hilfsmittel wie z. B. Lifter vorhanden sind.
- **Design:** Das Design sollte sich zwischen Lifestyleprodukt und schlicht / unauffällig bewegen, um nicht stigmatisierend zu wirken. Dennoch soll der Roboterarm als technisches Hilfsmittel erkennbar sein und nicht einem menschlichen Arm ähneln.
- **Sicherheit und Datenschutz:** Benötigt werden Sicherheitsprotokolle für körpernahes Arbeiten, damit die Nutzung des Roboterarms für Primär- und SekundärnutzerInnen gleichermaßen sicher ist. Es sollte transparent sein, welche

Daten gesammelt werden und die NutzerInnen sollten die Nutzung und Speicherung ihrer Daten kontrollieren können.

In den drei ExpertInnen-Workshops wurde die Anwendung einer robotischen Trinkhilfe mit den in MoblLe entwickelten Modalitäten überwiegend positiv bewertet – allerdings unter den Voraussetzungen, dass es keinen Zwang zur Nutzung gibt, individuelle Anpassungen möglich sind und die Anwendung sicher ist. Nach dem MEESTAR-Modell erfolgte die Einordnung auf der individuellen Ebene in Stufe 1: „Anwendung ist aus ethischer Sicht völlig unbedenklich“ und Stufe 2: „Anwendung weist ethische Sensibilität auf, was aber in der Praxis entsprechend berücksichtigt werden kann“. Das Tragen einer Datenbrille zur Steuerung des Roboterarms wurde von zwei Primärnutzerinnen als ethisch äußerst sensibel (Stufe 3) eingeordnet. Befürchtet wurde eine stigmatisierende Wirkung und eine neue Abhängigkeit, z. B. wenn die Brille häufig zurechtgerückt werden muss.

8.3.3 Forschungsausblick

Bei der Durchführung der ethnografischen Analyse wurde deutlich, dass Sekundärnutzerinnen, also formelle und informelle Pflege- und Assistenzkräfte, eine zentrale Rolle bei der Akzeptanz assistiver Technologien spielen können. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, der das gesamte sozio-technische System in die Analysen der ELSI-Fragestellungen einbezieht.

8.3.4 Implikationen für die Praxis

Der Forschungsprozess orientierte sich an der Lebensrealität und den Bedarfen der zukünftigen NutzerInnen, damit die entwickelten Modalitäten später eine hohe Akzeptanz finden. Um die MoblLe-Ergebnisse einem breiteren Publikum zu öffnen, werden diese für die Ausstellung „Hallo Freiheit! Zusammen über Barrieren“, die zusammen mit dem Sozialverband VdK Hessen-Thüringen e.V. und der Frankfurter Stiftung für Gehörlose und Schwerhörige betrieben wird, und für das Innovation Lab 5.0 des interdisziplinären Forschungszentrums FUTURE AGING aufbereitet. Darüber hinaus fließen sie in die Lehre u.a. des Masterstudiengangs „Inclusive Design M.Sc. – Zukunft interdisziplinär gestalten“ der Frankfurt University of Applied Sciences ein.

8.4 Mensch-Roboter-Interaktionstechnologien, Interaktionsdesign und Usability

Marion Gebhard, Sarah Stalljann (WHS)

8.4.1 Methodische Herangehensweise

Im Projekt MoblLe werden neue Interaktionstechnologien erforscht und entwickelt. Verschiedene Sensoren, die an einer Brille angebracht sind, werden zur Steuerung von Roboterarmen bei der Umsetzung interaktiver Grundfertigkeiten untersucht.

Die Kopfbewegungen werden mittels MARG-Sensorsysteme (Magnetic Angular Rate Gravity) erfasst. Die daraus geschätzte Orientierung des Kopfes (Janckowski et al., 2018; Wöhle & Gebhard, 2018) wird zur geschwindigkeitsproportionalen Steuerung des Roboterarms genutzt (Rudigkeit et al., 2015) Die Erfassung der Augenbewegung erfolgt über eine leichtgewichtige am Markt erhältliche Eyetracker-Brille. Mittels

Erfassung der Pupille kann der Nutzer den Cursor über einen Bildschirm verfahren bzw. ereignisbasiert ein Interaktionselement anklicken (Schäfer & Gebahrd, 2019).

Die Evaluierung der Gebrauchstauglichkeit der multimodalen Steuereinheit erfolgte in einer Vor- und einer Usability-Studie. Ein Becher wird mit Hilfe eines Roboterarms mit

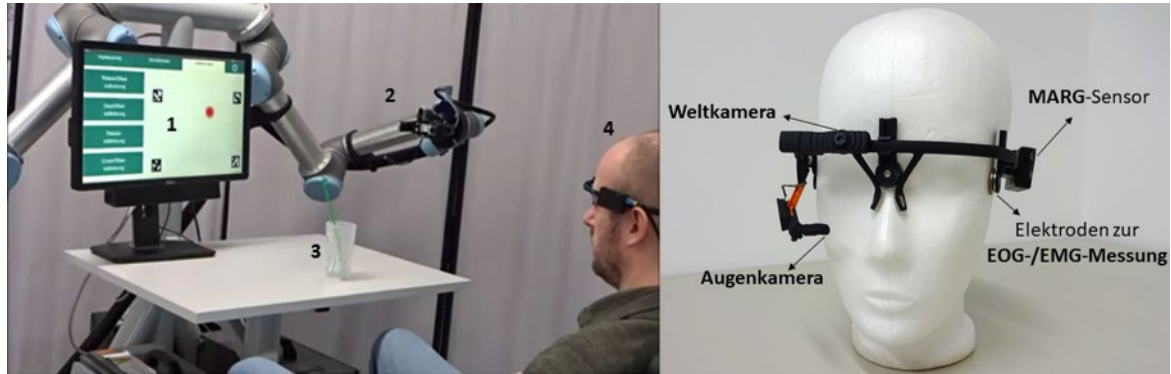


Abbildung 8.1: a): Versuchsaufbau im Szenario „Trinken ohne Körperkontakt“ mit grafischer Benutzeroberfläche zur Auswahl der Buttons (1), Roboterarm mit Greifer (2), Trinkgefäß mit Strohhalm (3) und Proband mit multimodaler Steuereinheit (4) ; b): Multimodale Steuereinheit

Zweifinger-Greifer gegriffen und in Nutzerrichtung bewegt, sodass durch einen Strohhalm getrunken werden kann (Abbildung 8.1 a). Es werden Zeit und Fehlerrate, sowie der Durchsatz als Maß für die Leistungsfähigkeit mittels dem Fitts`-Law Paradigma erfasst. Über einen NASA-TLX-Fragebogen wird die empfundene Beanspruchung sowie die Bewertung der Steuerung evaluiert. Die multimodale Steuereinheit besteht aus einem in das Brillengestell integrierten MARG-Sensorsystem mit eigens entwickelter Auswertesoftware, kommerziellen Eyetracker-Komponenten, EMG-Elektroden und der Signalverarbeitungselektronik (Abbildung 8.1 b).

8.4.2 Ergebnisse

In der Vorstudie wurden MARG-Sensoren und Eyetracker von Probanden getestet und die Performance bzgl. der Steuerung verglichen. Es haben zehn gesunde Personen und eine Tetraplegikerin an der Studie teilgenommen. Auf Basis der Sensordaten der multimodalen Steuereinheit kann der Roboterarm kontinuierlich im dreidimensionalen Raum bewegt werden, ein Cursor auf einem Display verschoben oder Buttons und andere in der graphischen Benutzeroberfläche visualisierte Interaktionselemente aktiviert werden. Folgende Ergebnisse haben sich beim Vergleich der Modalitäten MARG-Sensorsystem und Eyetracker ergeben:

a) Das MARG-Sensorsystem ist beim kontinuierlichen Steuern des Roboterarms überlegen. b) Die Zeit zur Aktivierung der Buttons unterscheidet sich nicht signifikant bei gesunden Personen. Zu beachten ist, dass die Tetraplegikerin wesentlich weniger Zeit mit dem Eyetracker-System benötigt hat. Dies lässt den Schluss zu, dass das Krankheitsbild Einfluss auf die Beweglichkeit des Kopfes haben könnte. Die Usability Studie mit einer größeren Anzahl an Tetraplegikern wird dieser Hypothese nachgehen. Die Fehlerrate beim Aktivieren ist für die Eyetracking Modalität für alle Probanden sehr viel größer. Geistige Anforderung, Anstrengung und Frustration schneiden beim Eyetracker-Einsatz signifikant höher ab. c) Bei der kontinuierlichen Steuerung des Cursors auf dem Display zeigt sich kein signifikanter Unterschied im Durchsatz, dafür

aber bei der Fehlerrate, die beim Eyetracking sehr viel höher liegt. d) Die mentale-, physikalische- und zeitliche Beanspruchung, sowie der Aufwand und die Frustration beim Steuern im Szenario „Unterstützung beim Trinken“ wurden von allen Probanden als gering betrachtet.

Zusammengefasst ist die Beanspruchung und Ermüdung für die NutzerInnen am geringsten, wenn sie den Roboterarm im dreidimensionalen Raum und den Cursor auf dem Display kontinuierlich mit Kopfbewegungen steuern. Das Aktivieren von Buttons kann mit Kopf- oder Augenbewegungen gleichermaßen umgesetzt werden.

8.4.3 Forschungsausblick

Es zeigt sich deutlich die Notwendigkeit einer Usability Studie mit einer größeren Anzahl an Tetraplegikern. Die Probanden werden das Aktivieren der Buttons erproben, die mittels Kopf- und Augenbewegungen oder Augenzwinkern aufgenommen werden. Übergeordnet wird das Zusammenspiel aller Modalitäten im Szenario „Unterstützung beim Trinken“ evaluiert. Die Studie wird, sobald dies unter den Rahmenbedingungen der COVID-19 Pandemie möglich wird, ausgeführt.

8.4.4 Implikationen für die Praxis

Die Erkenntnisse zum Steuern eines Assistenzroboters mittels Kopf- und Augenbewegungen können nicht nur beim Trinken, sondern auch bei weiteren Unterstützungsszenarien für stark bewegungseingeschränkte Menschen angewandt werden. Der Realeinsatz eines Assistenzroboters mit Steuerung durch die NutzerInnen ist gezeigt worden. Anpassungen hinsichtlich Ergonomie und individueller meist krankheitsbedingter Bedarfe sind erforderlich. Die Herausforderung liegt in der schnellen, kostengünstigen Adaption der Technik an die Bedarfe der NutzerInnen.

8.5 Roboter-Mensch Interaktionstechnologien, Interaktionsdesign und Usability

Jens Gerken, Max Pascher (WHS)

8.5.1 Methodische Herangehensweise

Gemeinsam mit dem Projektpartner Frankfurt University of Applied Sciences wurde ein semi-strukturiertes Interview sowie eine teilnehmende Beobachtung im Kontext von eigenständigem und assistiertem Essen und Trinken durchgeführt. Beim Bearbeiten dieser Aufgaben muss der Roboter ein geeignetes Feedback zurückgeben, sodass der Mensch innerhalb eines Prozesses intervenieren kann, beispielsweise um einen Fehler im autonomen Verhalten zu korrigieren. Nach unserer Definition eines Fehlers – „Abweichung des Systemverhaltens von der Systemerwartung des Benutzers“ – ist ein stetiges Feedback innerhalb des Prozesses entscheidend für eine gute Bedienbarkeit und robuste Mensch-Roboter-Interaktion. Ausgehend von den Anforderungen und den Ergebnissen einer Recherche wurde ein visuelles Feedback zur Darstellung erkannter Gegenstände entworfen.

8.5.2 Ergebnisse

Als zentrales Feedback wurde das sogenannte Perzeptions-Feedback identifiziert. Hierbei werden die erkannten Objekte im Arbeitsbereich des Roboters (z. B. Objekte

Erreicht werden kann dies beispielsweise durch die Verwendung eines Piko-Projektionssystems direkt am Roboterarm. Neben einem visuellen Feedback können außerdem weitere Formen von Ausgabemodalitäten umgesetzt und evaluiert werden. So ist beispielsweise ein auditives oder taktiles Feedback ebenfalls denkbar.

8.5.4 Implikationen für die Praxis

Die aufgeführten Visualisierungskonzepte sind auch in anderen Bereichen der Mensch-Roboter-Kollaborationen nutzbar. Denkbare Beispiele sind hier Arbeitsplätze in der Industrie, beim autonomen Fahren und immer dann, wenn Systeme eigenständig und eng mit dem Menschen zusammenarbeiten.

8.6 Mensch-Roboter-Interaktion mit Körperkontakt

Axel Graeser, Felix Goldau (FWBI)

8.6.1 Methodische Herangehensweise

Zentraler Punkt für die F&E der technischen Systeme ist, dass der Leichtgewichtroboter Jaco, der speziell für die Zielgruppe entworfen ist, aus Gründen der Gewichtersparnis über keinen Kraft-Momenten-Sensoren am Handgelenk verfügt. Bei Körperkontakt entfallen zudem viele Interaktionsmöglichkeiten, die ohne Körperkontakt zur Verfügung stehen. Für drei Problemkreise sind spezielle Lösungen notwendig: Annähern des Trinkgefäßes bis zur Kontaktaufnahme aber ohne Körperkontakt; Aufnahme des Körperkontaktes mit definierten, begrenzten Kontaktkräften; Steuerung des Trinkvorgangs über Kontaktkräfte.

Die grundsätzliche Herangehensweise folgt dem aus der SW-Entwicklung bekannten V-Modell als Vorgehensmodell. Eine wesentliche Komponente war dabei die Einbeziehung von Nutzern in allen Phasen. Dies erfolgte durch die Einstellung einer Tetraplegikerin am FWBI und durch das frühzeitige Einbeziehen der Ergebnisse des Partners FRA-UAS, der umfangreich angelegten Nutzerbefragungen durchgeführt hat. Die Mitarbeiterin mit Tetraplegie ist unmittelbar betroffen und kann Anforderungen an den Roboter aus eigener Betroffenheit formulieren. Sie kann aufgrund ihrer Erfahrungen in mehreren ähnlichen Forschungsprojekten im täglichen Austausch mit den Wissenschaftlern alle Ideen kritisch und konstruktiv evaluieren.

8.6.2 Ergebnisse

Der Trinkvorgang lässt sich in drei Phasen zerlegen. Die Annäherung ohne Kontakt, die Kontaktaufnahme zwischen Trinkgefäß und Mensch mit definierter maximaler Kontaktkraft und Kraftanstieg und die Steuerung des Trinkvorgangs über die durch den Menschen ausgeübten Kontaktkräfte.

Ein Multi-Sensoren-System, bestehend aus Smart Cup mit Kraft und Distanzsensoren, Erweiterung des Robotergreifers mit RGB-D Kamera, Infrarotsensoren, Schallsensoren und Kraftsensoren wurde konzipiert und realisiert. Mit der RGB-D Kamera (Intel Realsense) und Bildverarbeitung erfolgt eine Gesichtserfassung während der Annäherung des Trinkgefäßes und ein visuelles Tracking des Mundes. Durch die Analyse der Kopfbewegungen konnte auch eine einfache Steuerung – und

Sicherheitsmaßnahme während der Annäherung des Trinkbechers an die Nutzerin realisiert werden.

Abbildung 8.3 zeigt die realisierten Lösungen und den durch die Benutzerin gesteuerten Trinkvorgang.

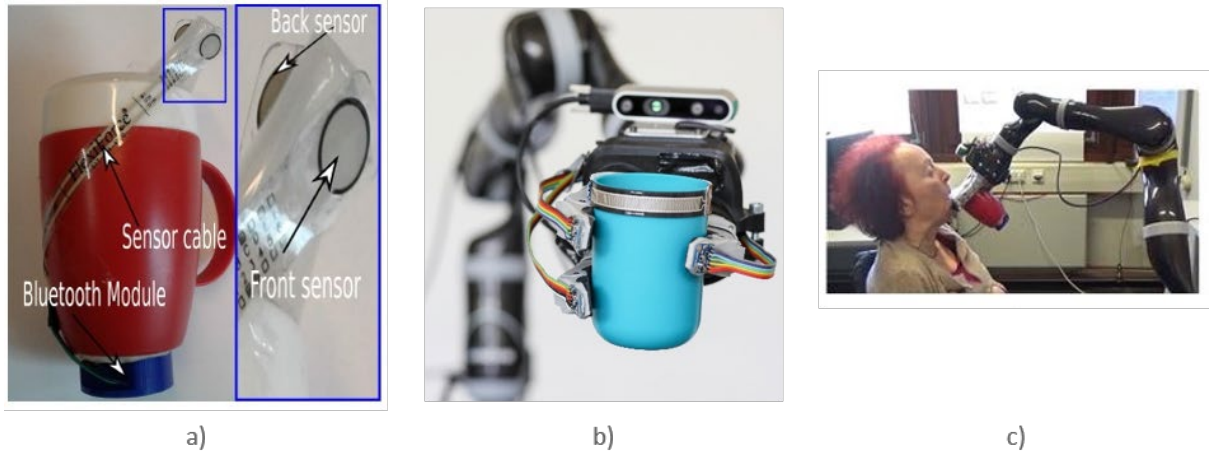


Abbildung 8.3: a) Smart Cup, b) Greifer mit Sensorik, c) Ablauf des Trinkvorgangs

Die RGB-D-Kamera und die Infrarotsensoren dienen zur genaueren Abstandsmessung zwischen Greifer, Trinkgefäß und Mund unmittelbar vor Kontaktaufnahme. Kraftsensoren am Trinkgefäß dienen der Kraftmessung bei Kontaktaufnahme und der Steuerung des Trinkvorgangs. Der Roboter muss für den Trinkvorgang eine Kippbewegung der Tasse ausführen, wie sie auch durch eine persönliche Assistenz ausgeführt wird.

Die Untersuchungen und Tests mit den Nutzern haben gezeigt, dass die auftretenden Kräfte bei Kontaktaufnahme gut beherrschbar sind und bei den Nutzern keine negativen Empfindungen auslösen. Um die Roboterbewegungen und Kräfte schnell an die Präferenzen der Nutzer anzupassen, wurden Methoden des Reinforcement Lernens mit der Robotersteuerung kombiniert. Unabhängig von den Steuerungsalgorithmen zeigte sich, dass die Robotergeometrie mit einem relativ großen Abstand zwischen dem Handgelenk des Roboters und dem Greifer zu einem relativ unbequemen Trinkvorgang führt. Deshalb wurden seitens des FWBI Überlegungen zu neuartigen kardanischen Trinkbecheraufhängungen vorgenommen. Zum derzeitigen Zeitpunkt erscheinen diese Alternativen vielversprechend, da sie sowohl die Komplexität der notwendigen Roboterbewegungen reduzieren als auch einfachere Sicherheitskonzepte erlauben.

8.6.3 Implikationen für die Praxis und Forschungsausblick

Die Ausstattung des Unterstützungsroboters mit IoT-Komponenten (Smart Cup, weitere Sensoren am Greifer) eröffnet neue Steuerungs- und Sicherheitskonzepte. Es erweist sich aber als notwendig, bei der Herstellung dieser Komponenten von Beginn an Hygienekonzepte einzubeziehen und diese bei der Auswahl der Fertigungsverfahren zu berücksichtigen.

8.7 Risikomanagement und Zertifizierungsvorbereitungen für interaktive Steuerungen

Axel Graeser (FWBI), Ralf Hornscheidt (HIDREX)

8.7.1 Methodische Herangehensweise

Es fanden mehrere Treffen der Partner zur Risikoanalyse und Sicherheit statt. Um einen gemeinsamen Informations- und Kenntnisstand zu erreichen, wurde von der Firma Hidrex eine Einführung / Schulung zu den Grundlagen und zur Erstellung einer Risikoanalyse und Risikoakte gegeben. Durch das FWBI wurden Standardverfahren zur funktionalen Sicherheit wie HAZOP-Hazard and Operability Analysis, FMEA-Failure Mode and Effects Analysis, FTA-Fault Tree Analysis erläutert. Diese Methoden wurden in mehreren Sitzungen auf die Aufgabenstellungen und vorgesehenen Lösungen angewendet. Eine grundsätzliche Basis dabei ist die Annahme, dass die Fehler einzeln auftreten und keine weiteren Fehler auslösen. Bei der Analyse wurden auch die wesentlichen Normen, insbesondere die MDD/MDR und u. a. die DIN EN ISO 14971, 60601 und 1401 in ihrer jeweils aktuellen Ausgabe herangezogen. Das Ergebnis haben die einzelnen Partner für ihre Teilsysteme angewendet, in eigener Form dargestellt und die Firma Hidrex hat die Angaben in ihre Risikoakte übernommen.

8.7.2 Ergebnisse

Durch die Anforderung der Aufgabenstellung, die einen inhärenten Körperkontakt beinhaltet, können einige Standardlösungen zur Sicherheit der Nutzer in der Mensch-Roboter-Kooperation und Koexistenz im gemeinsamen Arbeitsraum nicht angewendet werden. So entfallen für Aufgaben mit Körperkontakt alle Lösungen, die auf einem, wie auch immer überwachten, Sicherheitsabstand zwischen Roboter und Mensch beruhen. Außerdem zeigte sich, dass mit dem verwendeten Roboter, Jaco der Firma Kinova, Standardlösungen für den kritischen Fehlerpfad nicht nutzbar sind. Als kritischer Fehlerpfad werden hier die Fehler subsummiert, die nur über eine Aktivierung von Bremsen in den Gelenken oder eine Trennung des Roboters von der Versorgungsspannung beherrschbar sind. Der Roboter Jaco verfügt nicht über Bremsen in den Gelenken und bewegt sich bei einem gewollten oder fehlerhaften Ausfall der Spannungsversorgung unkontrolliert unter dem Einfluss der Schwerkraft.

In der Risikobetrachtung muss ein Softwaresystem zudem immer mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 100% betrachtet werden. Diese Ausfallwahrscheinlichkeit gilt zusätzlich zu dem Erstfehler. Somit entfällt die oben genannte Einzelfehler-Hypothese und auch Standardverfahren zur Erhöhung der Sicherheit, wie Redundanzen der Systemelemente, sind kritisch zu untersuchen. Als Beispiel sei die redundante Verwendung eines Sensors mit interner Software zur Datenvorverarbeitung genannt. Eine fehlerhafte Software im Sensor würde den gleichzeitigen Ausfall oder das gleichzeitige Auftreten fehlerhafter Messwerte bei allen Sensoren bedeuten. Die normalen Vorteile der Redundanz werden dann hinfällig.

Weiterhin ist zu beachten, dass Redundanzen bei Unterstützungsrobotern aus Platz- und Kostengründen kaum zu realisieren sind. Und auch die Erstellung und Verwendung redundanter Softwaresysteme lässt sich derzeit kaum realisieren.



Abbildung 8.4: Mock-Up zur Referenzmessung der Kontaktkräfte

Die Verwendung von IoT-Lösungen, wie einen Sensor-bestückten Becher oder externe Sensorik am Greifer, haben auch einen Einfluss auf die Risiko- und Sicherheitsanalyse. Deshalb wurde in MobILe eine Lösung gewählt, die bei jedem Neustart des Unterstützungsroboters oder nach als risikoreich bewerteten Situationen, wie dem Wechsel des Bechers, eine Kontrolle der Messsysteme erlauben. Dazu wurde ein Mock-Up entworfen und realisiert, der eine Messung der Kontaktkräfte, der Kraftanstiege und den Vergleich mit einer Referenzmessung erlaubt, bevor der Unterstützungsroboter bei Menschen eingesetzt wird.

8.7.3 Implikationen für die Praxis und Forschungsausblick

Automatisierungssoftware und Sicherheitssysteme für Unterstützungsroboter sind sehr große, sehr komplexe Softwaresysteme, da sie in einer für den Menschen ausgelegten Umwelt agieren und deshalb eine hohe Umweltvariabilität beherrschen müssen. Kooperierende Roboter teilen sich dabei den Arbeitsraum mit Menschen. Unterstützungsroboter werden für Menschen mit einem eingeschränkten Bewegungsraum eingesetzt und müssen deshalb sehr hohen Sicherheitsanforderungen genügen. Da Software in der Risikobetrachtung immer als unsicher anzusehen ist, kann keine absolute Sicherheit garantiert werden. Es verbleibt immer eine geringe Restwahrscheinlichkeit für einen Fehler und damit auch für ein gesundheitliches Risiko.

Derzeit arbeiten nur kleine mittelständische Unternehmen auf dem Gebiet der Unterstützungsroboter. Für diese Firmen entsteht im Fehlerfall ein wirtschaftlich kaum tragbares Risiko.

Es sind deshalb dringend rechtliche und versicherungsrechtliche Fragen zu klären, die im Schadensfall das Risiko für die Firmen abdecken und die Nutzer andererseits im Schadensfall finanziell absichern. Hier könnte man an Lösungen ähnlich der KFZ-Versicherung denken, die an die spezifische Situation der Unterstützungsroboter und ihrer Nutzer anzupassen wäre.

8.8 Übertragung interaktiver Grundfähigkeiten in industrielle Szenarien

Axel Graeser (FWBI), Matthias Krinke (pi4)

8.8.1 Methodische Herangehensweise

Als Grundlage für den Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden mehrere Lösungen identifiziert und in Gesprächen mit potenziellen Kunden näher untersucht. Dazu wurden die Gespräche auf Leitungs- und Mitarbeiterebene mit Personaldienstleistern, Zeitarbeitsfirmen, Einzelhandelsfilialisten, Herstellern von Business to Consumer (B2C)-Produkten, Pflegeeinrichtungen und Krankenhäusern

geführt. Die Ergebnisse wurden in einer umfangreichen Anforderungsliste zusammengeführt und dienen als Basis für den generellen Entwurf kooperierender Roboter. Außerdem wurden Vorträge, Interviews und Talkrunden durchgeführt mit dem pi4-Workerbot4 als Demonstrator, um die Mensch-Maschine Kommunikation mit verschiedenen Personenkreisen zu evaluieren. Diese Vorarbeiten zum generellen Design der kooperierenden Roboter führten schließlich auf die Weiterentwicklung bzw. Neuentwicklung der Robotersysteme: DJ ROB, Workerbotkiosk, Concierge Roboter. Ganz wesentlich unterscheiden sich dabei die Zielgruppen und konkreten Aufgabenstellungen, die notwendigen Kommunikationsfähigkeiten der Roboter und die Risiko- und Sicherheitsbeurteilungen.

8.8.2 Ergebnisse

Eine wesentliche Erkenntnis der Forschungen besteht darin, dass für die Aufgabenstellungen und Zielgruppen ein teilautonomes Robotersystem als Zielgröße dienen sollte, um die überlegenen mentalen und visuellen Fähigkeiten des Menschen zu nutzen und die Automatisierungstechnische Komplexität zu begrenzen. Der Mensch übernimmt die Verantwortung für den Ablauf der Vorgänge, indem er autonome Roboter-Skills aufruft oder aktiv steuernd eingreift. Insbesondere in unvorhersehbaren Situationen, wie z. B. beim fehlerhaften Greifen des Glases durch den Roboter, ist das Eingreifen des Menschen sehr sinnvoll.

Neue Konzepte für aufgabenbezogene Greifer und Hilfsmittel können die Risiken verringern und die Realisierung der Sicherheitskonzepte vereinfachen.

Es wurden, wie bereits oben genannt, drei Demonstratoren bzw. Testsysteme realisiert, die Abbildung 8.5 zeigt. Workerbotkiosk dient der Werkzeugausgabe, wie sie in Produktionswerken wie beispielsweise der Flugzeugbranche üblich ist. Die aktuelle Planung des Workerbotkiosk sieht eine Übergabe ohne Körperkontakt vor. In den Magazinen hinter dem Roboter werden die Werkzeugsets gelagert. Der Werker wählt am Touch-Terminal, oder wenn die Umgebungsbedingungen es zulassen per Sprache, die gewünschten Werkzeugsets aus und identifiziert sich über einen QR-Code, mit dem der Roboter in der Datenbank dann die Zuordnung zum Werker vornimmt. Der Roboter holt aus dem Magazin das Werkzeugset und legt es auf das Übergabeband. Abends wird entsprechend umgekehrt verfahren. Der Werker meldet sich mit dem QR-Code an, der Roboter bittet um Ablage auf das Band. Der Roboter prüft die Vollständigkeit mit einer Kamerastation und Lasersensoren in den Händen.



Abbildung 8.5: Workerbotkiosk, Concierge und DJ_ROB

Durch den Concierge Roboter werden interaktiven Grundfähigkeiten in industrielle Anwendungen übertragen. Dieses System soll Zeitarbeitsfirmen und Personaldienstleister entlasten, die oft im Sicherheits- und Empfangsbereich von Firmen eingesetzt werden. Außerdem entsteht für die Besucher eine besondere Besuchserfahrung. Bei dem Concierge Roboter handelt es sich um einen einarmigen Roboter, der Besucher begrüßt, bei einem wiederholten Besuch wiedererkennt, Termine abgleicht, mit dem Besucher notwendige Formalitäten abwickelt, in diesem Verlauf Gegenstände annehmen und übergeben kann, um den Eindruck einer Art persönliche Betreuung zu vermitteln. Der gesamte Ablauf erfolgt in einer auf den Besucher zentrierten Umwelt und muss alle dabei auftretenden Unwägbarkeiten (von fehlerhaften Besuchszeitpunkten, mehrfach auftretenden Besuchern bis zu bewusstem Fehlverhalten der Besucher) abdecken. Dazu wurden sehr robuste Algorithmen entworfen.

Als drittes System, hier wieder ohne Körperkontakt, wurde DJ Rob entworfen, der in der Lage ist, Musik und Bewegungen zu interpretieren, Menschen zu erkennen und mit diesen sinnvoll zu interagieren.

8.8.3 Implikationen für die Praxis und Forschungsausblick

Die Anforderungen an die Interaktion mit Menschen steigen, wenn sich die anwendungsbezogenen Aufgaben vorab nicht klar strukturieren lassen und verschiedene Menschen, die nicht auf den Anwendungsfall und das Verhalten des Roboters speziell geschult wurden, mit dem Roboter interagieren. Lernende Komponenten erscheinen hier eine weitergehende Möglichkeit, deren Fähigkeiten, Robustheit und Auswirkungen auf die kommunizierenden Menschen noch genauer zu untersuchen ist

8.8.4 Patente

Patentanmeldung in Deutschland Nr. 102019118903.9
System und Verfahren zum Wechseln eines Endeffektors an einem Roboter

8.9 Literaturverzeichnis

Goldau, F.F., Shastha, T.K., Kyrarini, M. & Gräser, A. (2019). Autonomous Multi-Sensory Robotic Assistant for a Drinking Task. In 2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR) (pp. 210-216). IEEE.

Jackowski, A., Gebhard, M. & Thietje, R. (2018). "Head Motion and Head-Gesture Based Robot Control: A Usability Study", IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol 26, issue 1, 2018.

Koller, T.L., Kyrarini, M. & Gräser, A. (2019). Towards robotic drinking assistance: low cost multi-sensor system to limit forces in human-robot-interaction. In Proceedings of the 12th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (pp. 243-246). ACM.

Manzeschke, A., Weber, K., Rother, E. & Fangerau, H. (2013). Ethische Fragen im Bereich Altersgerechter Assistenzsysteme. Ludwigsfelde: Druckerei Thiel Gruppe.

Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (12. überarb. Aufl.), Weinheim u.a.: Beltz.

Pilarczyk, U. & Mietzner, U. (2000): *Bildwissenschaftliche Methoden in der erziehungs- und sozialwissenschaftlichen Forschung*. Zeitschrift für qualitative Bildungs-, Beratungs- und Sozialforschung, 1(2), 343-364.

Reichert, J. & Englert, C. J. (2011). *Einführung in die qualitative Videoanalyse. Eine hermeneutisch wissenssoziologische Fallanalyse*, Wiesbaden: VS Verlag.

Rudigkeit, N., Gebhard, M. & Gräser, A. (2015). „Evaluation of Control Modes for Head Motion-Based Control with Motion Sensors“, IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Italy, 2015.

Schäfer, J. & Gebhard, M. (2019). „Feasibility Analysis of Sensor Modalities to Control a Robot with Eye and Head Movements for Assistive Tasks“, ACM Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA) conference, Greece, 2019.

Shastha, T.K., Kyrarini, M. & Gräser, A. (2020). Application of Reinforcement Learning to a Robotic Drinking Assistant, *Robotics 2020*, 9(1), 1. MDPI.

Wöhle, L. & Gebhard, M. (2018). “A Robust Quaternion Based Kalman Filter Using a Gradient Descent Algorithm for Orientation Measurement”, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), USA, 2018.

9 SINA – Sichere Wahrnehmung zur flexiblen Assistenz in dynamischen und unstrukturierten Umgebungen

Alexander Poeppel, Gwendolin Prins, Hosam Alagi, Gergely Sóti, Martin Gmür, Matthias Stüben, Marco Käppeler, Björn Hein, Bruno Ristok, Wolfgang Reif

Projektpartner: C&S Computer und Software GmbH (C&S), Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab), Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Intelligente Prozessautomation und Robotik (IPR), MRK-Systeme GmbH (MRK), SCHUNK GmbH & Co.KG (SCHUNK), Universität Augsburg, Institut für Software & Systems Engineering (ISSE), User Interface Design GmbH (UID)

9.1 Zusammenfassung des Projekts

Die Durchdringung aller Lebensbereiche des Menschen mit Robotersystemen nimmt stetig zu und es ist damit zu rechnen, dass sie in Zukunft großflächig eingesetzt werden. Um dabei ein möglichst breites Anwendungsspektrum abzubilden, soll die Interaktion zwischen Mensch und Roboter in direkter Nähe, ohne räumliche oder zeitliche Trennung, stattfinden. Die Fertigkeiten des Roboters sollen auf einem möglichst autonomen Verhalten basieren, und optimal bezüglich der Erfüllung von dedizierten Aufgaben sein. Wichtige Punkte wie die Personensicherheit oder die Benutzerakzeptanz müssen hierbei stets beachtet werden.

Das zentrale Ziel des Vorhabens SINA war es, körperlich eingeschränkte Personen bei alltäglichen Aufgaben mithilfe von Assistenzrobotern unter Verwendung multimodaler Sensorik zu unterstützen. Die Interaktion soll hierbei sicher und flexibel gestaltet sein. Dieser Ansatz folgt dem Anliegen, Menschen zu befähigen, so lange wie möglich selbstbestimmt in der eigenen Häuslichkeit wohnen zu können. Der Schwerpunkt in diesem Projekt lag dabei auf der assistiven Grundfertigkeit der intuitiven Übergabe von Objekten zwischen Mensch und Roboter.

9.2 Hintergrund

Der Bedarf an Robotern, die den Menschen in den verschiedensten Bereichen seines Lebens unterstützen können, wird in den kommenden Jahren voraussichtlich stark ansteigen. Vor allem in den Bereichen der Alten- und Krankenpflege herrscht bereits heute ein großer Mangel an Fachpersonal. Robotersysteme bieten hier großes Potential durch gezielte Unterstützung für die Fortführung eines selbstbestimmten Lebens im eigenen häuslichen Umfeld oder gar die Rehabilitation körperlich eingeschränkter Personen zu Hause durchzuführen. Zugleich erfüllen jedoch weder aktuelle Robotersysteme noch die benötigten Sicherheitsmodelle alle notwendigen Anforderungen (z. B. Sicherheit, Verlässlichkeit, Verfügbarkeit, Bedienbarkeit durch Laien) für einen flächendeckenden Einsatz.

Die kontinuierliche und vollumfängliche Gewährleistung der körperlichen Unversehrtheit bildet die Grundvoraussetzung für Übergabeszenarien mit

Berührungspunkten zwischen Mensch und Robotersystem. Des Weiteren muss sich ein solches System auf die aktuelle Umgebung sowie die persönlichen Bedürfnisse und Präferenzen seiner Nutzer einstellen können. Bei der Interaktion mit dem System spielen angenehme und erwartungskonforme Bewegungen eine zentrale Rolle. In diesem Kontext bedeutet "angenehm", dass Bewegungen des Roboters für den Nutzer sowohl nach ergonomischen, als auch nach Sicherheitskriterien ausgeführt werden. Erwartungskonforme oder lesbare Bewegungen sind solche, die den Vorstellungen des Nutzers von typischen Bewegungen in einer direkten Interaktion entsprechen. Hierbei sind sowohl allgemeingültige, menschliche Konventionen als auch subjektive Erwartungen einzelner Nutzer zu beachten.

9.3 Methodische Herangehensweise

9.3.1 Nutzerbefragung

Im Rahmen des Projekts SINA wurde zunächst eine Nutzerbefragung durchgeführt, um mögliche Anwendungsszenarien und deren spezifische Anforderungen zu identifizieren. Für die Nutzerbefragung wurden Leitfadeninterviews durchgeführt. Bei der Entwicklung des Fragebogens wurde bewusst auf die Kombination von offenen und geschlossenen Fragen gesetzt, um ein detailliertes Bild der Bedürfnisse der befragten Personen zu erhalten. Die Zielgruppe für die Interviews setzte sich aus Personal der Pflegedienste sowie bewegungseingeschränkten Personen zusammen. Die Ergebnisse der Nutzerbefragung wurden aufbereitet und im Rahmen eines Expertenworkshops diskutiert. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die weitere technische Entwicklung.

9.3.2 Nutzerstudie

Ein gesteigertes Verständnis darüber, wie Menschen miteinander interagieren, führt zu besser begründeten Entwicklungsentscheidungen bei der Gestaltung von Mensch-Roboter-Interaktionen. Dementsprechend wurden im Rahmen der Nutzerstudie Objektübergaben zwischen Menschen analysiert. Das primäre Ziel war es, geeignete Bewegungsphasen von Übergabebewegungen zu identifizieren, mit deren Hilfe diese objektiv bewertet werden können. In einem zweiten Schritt sollte der Einfluss verschiedener Raumrichtungen, unterschiedlich komplexer Objekte und unterschiedlicher Wahrnehmungseinschränkungen auf die Übergabebewegung bewertet werden. Die erhobenen Daten wurden schließlich dazu genutzt, Übergaben zwischen Mensch und Roboter zu bewerten sowie Gestaltungsempfehlungen zu geben.

9.3.3 Anforderungs- und Systementwicklung

Anhand der Ergebnisse der Nutzerstudie und der Erfahrung der Projektpartner wurden die Systemanforderungen für die Übergabe festgehalten. Die Hardwarekomponenten wurden entsprechend der Anforderungen ausgewählt und assembliert. Für die Entwicklung der Softwarekomponenten wurde im Konsortium ein agiler Ansatz gewählt, der den Umgang mit der geographischen Entfernung der Partner, sowie die sich ständig weiterentwickelnden technischen Gegebenheiten bei der Umsetzung des Vorhabens begünstigte. Bereits früh in der Projektlaufzeit wurde aus diesem Grund auch der Entschluss gefasst, das Framework ROS als Grundlage für die Entwicklungen im Projekt zu nutzen, da es durch seinen komponentenbasierten

Ansatz mit klar definierten Schnittstellen ebenfalls die Entwicklung von Teilimplementierungen in einem größeren Verbund begünstigt. In regelmäßigen Projekttreffen wurden dann alle separat entwickelten Komponenten iterativ in das Gesamtprojekt integriert und anschließend evaluiert.

9.3.4 Interaktionsdesign

Die Akzeptanz des Roboters steht in engem Zusammenhang mit seiner intuitiven Nutzung. Hierzu wurden durch die Methodik des Scenario-Based Designs verschiedene Aspekte erforscht und entwickelt. Die Anforderungen für die Interaktion wurden in einem anderen Schritt mit Hilfe von Personas und Schlüsselszenarien dokumentiert. Es zeigte sich insbesondere in der ersten Phase des Projekts, dass das äußere Erscheinungsbild sowie die Interaktionsmöglichkeiten eng miteinander verzahnt sind und nur in ihrer Gesamtheit ein für die Nutzenden optimales Nutzungserlebnis bieten. Daher sind bei der Entwicklung Produktdesign und Interaktionskonzepte ganzheitlich zu entwickeln. Zentraler Aspekt der Steuerung des Systems ist die Möglichkeit auf Nutzenden-Seite, den Roboter durch gesprochene Sprache zu steuern.

9.3.5 ELSI-Aspekte

Das ELSI-Konzept sieht vor, während allen Phasen der Forschung, alle Konsortialpartner*innen wiederkehrend für ethische, soziale und rechtliche Fragestellungen (ELSI) zu sensibilisieren und ihnen als Coach für kritische Situationen jederzeit verfügbar zu sein. Hierbei tauchte der Begriff der normativen Kraft des Faktischen auf. Darunter wird ein Phänomen verstanden, in welchem vorherrschendes tatsächliches Verhalten alte Normen verdrängt und im gleichen Zuge selbst eine verbindliche Geltung innerhalb einer Gesellschaft erlangt (Auer, 1995). In empirischen Befunden liegt somit eine Handlungsherausforderung, da sie sich in einem normativen Horizont befinden, welcher überdacht oder sogar neu interpretiert werden muss, um Handlungsziele zu definieren (Werbick, 2015). Im Laufe des menschlichen Lebens hat das Individuum aufgrund eigener Erfahrungen die Wirklichkeit mit sittlichen Normen oder Weisungen ausgestattet.

Dabei wurden Erfahrungen reflektiert und das daraus resultierende Ergebnis als ethische oder rechtliche Verbindlichkeiten artikuliert. Am Anfang stand der Mensch mit seinen guten sowie schlechten Erfahrungen. Die daraus erwachsenen Einsichten fixierten sich allmählich in Sitten, Gewohnheiten und stillschweigenden Vereinbarungen. Aufgrund der ständig bestehenden Orts- und Zeitabhängigkeit empfiehlt sich eine iterative Prüfung hinsichtlich der Nützlichkeit und Durchführbarkeit (Auer, 1995). Bislang existieren allerdings kaum bzw. keine Erfahrungen mit Robotern in der Pflege. Im Rahmen von SINA können damit Präzedenzfälle für Normen geschaffen werden, was eine große Verantwortung mit sich bringt. Die Ethik fungiert somit als kritische Reflektions- und Überprüfungsinstanz von Moral.

9.4 Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse der Nutzerstudie konnte die Interaktionsphase als Möglichkeit zur objektiven Bewertung von Übergabebewegungen identifiziert werden. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass Parameter wie die Schwierigkeit der Übergabe eines Objekts, sowie Einschränkungen der entgegennehmenden Person sich messbar auf die Dauer der Interaktionsphase auswirken. Bei der Gegenüberstellung von Mensch-

Mensch-Übergaben und Roboter-Mensch-Übergaben müssen folglich dieselben Objekte verwendet werden, um eine Vergleichbarkeit zu garantieren. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass Wahrnehmungseinschränkungen der entgegennehmenden Person mit einer Einschränkung der nonverbalen Kommunikation gleichzusetzen sind und ebenfalls zu einer Erhöhung der Übergabezeit führen.

Die Objektübergabe als Grundfertigkeit konnte in SINA prototypisch umgesetzt werden. Die Integration multimodaler Sensorik in ein globales Umgebungsmodell sowie dessen Einsatz für eine sichere, robuste und erwartungskonforme Interaktion ist ein Alleinstellungsmerkmal des entwickelten Systems.

Die Sensordatenfusion der globalen und lokalen Sensoren und die darauffolgenden Verarbeitungsmethoden ermöglichten eine gesamtheitliche Erfassung der Umgebung und liefern somit die Grundlage für die assistive Grundfertigkeit der Übergabe.

Die Fähigkeiten des in SINA entwickelten Systems lassen sich wie folgt beschreiben:

- Eine autonome mobile Assistenzplattform bestehend aus einer omnidirektionalen mobilen Plattform und einem Roboterarm mit Greifer
- Sensorbasierte Navigation in einer unstrukturierten Umgebung
- Erkennung und Posenschätzung von Objekten und Personen
- Situativ parametrierbares Roboterverhalten auf Basis eines Sicherheitsmodells
- Bidirektionale robuste und erwartungskonforme Objektübergabe

9.4.1 Kapazitive Sensoren am Roboterarm

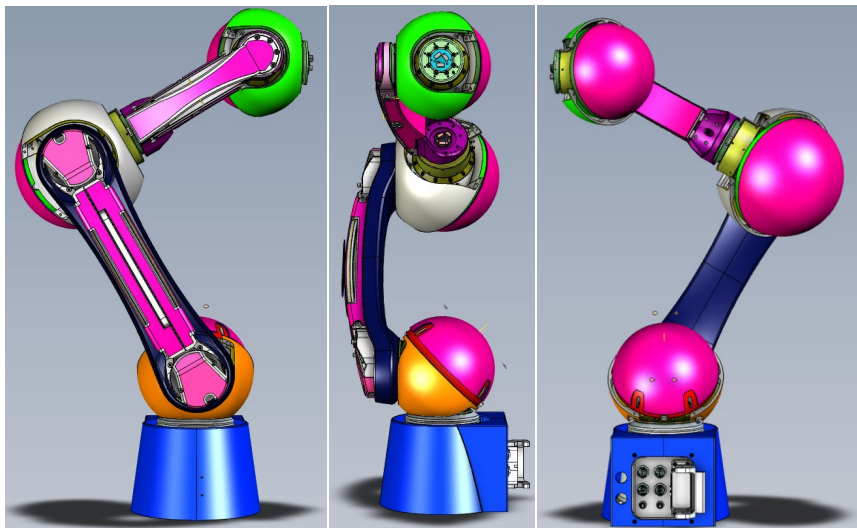


Abbildung 9.1: Kapazitives Sensoren-Design (pinke Flächen) am Roboterarm

In der finalen Ausbaustufe des Robotersystems sind fünf Sensoren am Roboterarm verbaut, mit Hilfe derer jeweils eine Annäherung in einem Bereich von ungefähr 20 cm um den Arm erkannt werden kann. Für die Konzeption und Entwicklung dieser Sensorik wurden die CAD-Daten des Manipulators analysiert und in enger Abstimmung mit den technischen Projektpartnern Anforderungen an die Sensorhaut des Roboterarms definiert:

- Die Struktur des Roboters soll nach Möglichkeit nicht verändert werden.
- Die Sensorhaut muss in möglichst feingranulare Bereiche aufgeteilt werden, damit eine Annäherung besser lokalisiert werden kann.
- Alle Leitungen für die Sensorik und den Greifer müssen intern verlegt werden, sodass weder die Mobilität des Roboters eingeschränkt noch die Messwerte der Sensoren beeinflusst werden.

Aus diesen Anforderungen entstand in einem iterativen Prozess aus wiederholtem Fertigen und Testen von 3D-Druck Einzelteilen und Sensoren das finale kapazitive Sensoren-Design (siehe Abbildung 9.1) am Manipulator. Die verlegten Leitungen für die Sensorik und den Greifer fanden unter den originalen Verschaltungen des Roboterarms Platz, und es kam wie gewünscht zu keinen erheblichen Einschränkungen der Bewegungsfreiheit des Roboters. Dennoch zeigte sich bei der Leitungsverlegung, dass eigens hergestellte Teile mit dem Fused Deposition Modeling (FDM)-Verfahren den mechanischen Belastungen nur teilweise standhalten. Beschädigte Teile konnten allerdings repariert werden, was für den prototypischen Demonstrator im SINA-Projekt ausreichend war.

Außerdem setzt die Technik der kapazitiven Näherungssensoren auf einen zusätzlichen Erdungskontakt, um bessere Messwerte erhalten zu können. Bei einer mobilen Plattform mit isolierenden Reifen ist ein permanenter Erdungskontakt allerdings nicht einfach zu realisieren. Es wurden Versuche mit „Kontaktbürsten“ durchgeführt, um einen Erdungsbezug herzustellen. Die Ergebnisse dieser sind allerdings bislang noch nicht zufriedenstellend.

9.4.2 SINA-Greifer

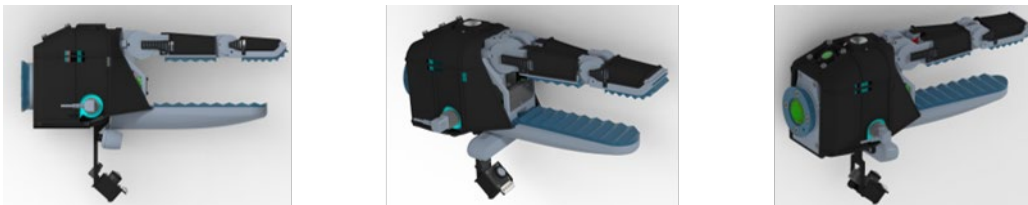


Abbildung 9.2: Der im Rahmen von SINA entwickelte Greifer

Der Einsatzbereich von SINA, die Assistenzaufgaben und die zu übergebenen Objekte stellten klare Anforderungen an den mechanischen Aufbau des Greifers:

- Greifen von Objekten mit einem Gewicht von bis zu 1,5 kg (Wasserflasche)
- Integration der taktilen Näherungssensorik für Griff-, Annäherungs-, und Materialerkennung
- Integration von Kameras zur Erfassung der Umgebung sowie der Unterstützung der Griffenerkennung

Basierend auf diesen Anforderungen wurde im Projekt ein neuartiger spezialisierter Greifer entwickelt, der diese erfüllt. Der grundlegende Aufbau entspricht dem Typ eines Fäustlingsgreifers, da dieser mit je einer starren und einer beweglichen Greiferbacke vorteilhafte physikalische Eigenschaften für den sicheren Griff von Objekten mit dem benötigten Gewicht aufweist. Um die Sicherheit der Interaktion mit dem Menschen zu erhöhen, wurde er überdies mit abgerundeten Flächen konstruiert. Somit wird, im Falle eines Kontaktes mit dem Greifer, das Verletzungsrisiko für den

Menschen durch den Greifer minimiert. Die gummierten und strukturierten Flächen auf der Innenseite des Greifers tragen aufgrund ihrer weichen Beschaffenheit und der Reduktion der benötigten Griffkraft ebenfalls zur Sicherheit der Nutzenden im Umgang mit dem Greifer bei. Unter diesen Flächen sind zudem kapazitive, taktile Näherungssensoren angebracht, die für die intuitive Übergabe von Objekten und die Sicherheit einen wesentlichen Beitrag leisten.

9.4.3 Kapazitive Sensoren am Greifer

Am Greifer wurden zuvor am KIT kapazitive Näherungs- und Berührungssensoren (Göger, Alagi & Wörn, 2013; Alagi, Navarro, Mende & Hein, 2016) entwickelt, wobei Letzteres in der Literatur als Taktilität bezeichnet wird. Die Sensoren sind modular aufgebaut und können vernetzt werden, um größere Flächen abzudecken. Die Integration und die Montage an Geräten mit gekrümmten Oberflächen ist dadurch möglich, dass die Elektroden aus flexiblen Materialien hergestellt werden und mit flexiblen Anschlusskabeln mit der Elektronik verbunden werden können. Jedes Modul besitzt acht Messkanäle für die Näherungsmessung und einen Messkanal für die Berührungsmessung. Die Ortsauflösung der Berührungsmessung wird aus der Näherungsmessung abgeleitet, womit eine gesamte Ortsauflösung der beiden Messungen von acht Messpunkten pro Sensormodul realisierbar ist.

Der SINA-Greifer besitzt insgesamt 29 Messelektroden, die von vier Sensormodulen ausgelesen werden. Das Design der Elektroden ist an die gestellten Anforderungen bzw. an die SINA-Aufgaben angepasst. So weisen die Elektroden auf den inneren Seiten der Greiferbacken eine geringere Reichweite, aber dafür eine höhere Ortsauflösung auf. Entsprechend ist die Reichweite der Näherungsmessung auf der äußeren Seite der Backen höher.

9.4.4 Wahrnehmung der Umgebung

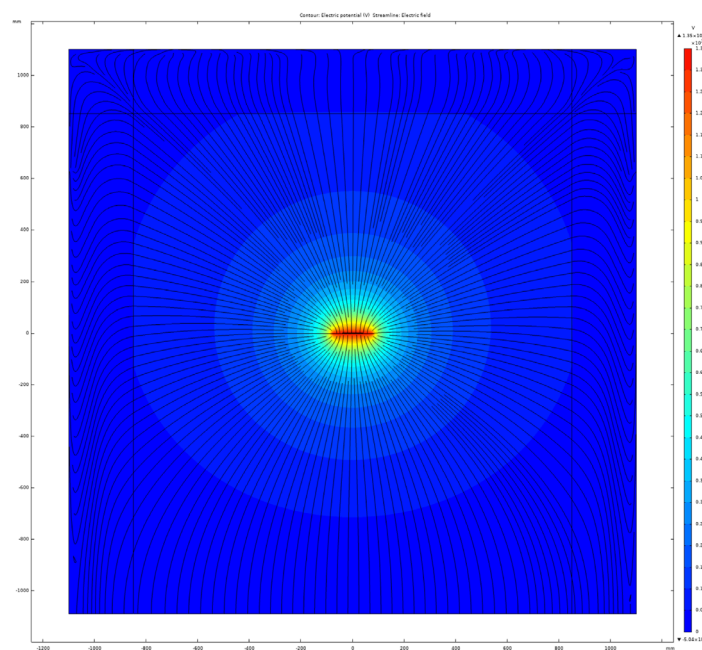


Abbildung 9.3: Beispiel für die FEM-Simulation des Messfeldes eines kapazitiven Sensors

In klassischen Robotikanwendungen wird die benötigte Sensorik definiert und in der Steuerungssoftware einzeln ausgewertet. Methoden zur Sensordatenfusion fokussieren sich üblicherweise lediglich auf die Verbesserung eines Sensorwertes durch Kombination mit weiteren Sensoren, dessen Ergebnis nachfolgend ebenfalls einzeln ausgewertet wird.

Ziel des Umgebungsmodells in SINA war es, alle verwendeten Sensoren des Robotersystems in einer gemeinsamen Datenbasis abzubilden, sodass alle weiteren Komponenten auf den kombinierten Daten operieren können, ohne Kenntnisse über die konkret eingesetzten Sensoren besitzen zu müssen. Als geeignetes Datenformat für diese Anwendung wurden PointClouds identifiziert, welche neben einer dreidimensionalen Position im Raum beliebige zusätzliche Daten speichern können. Neben diversen eingesetzten Tiefenkameras, die ihre Daten nativ in diesem Format zur Verfügung stellen, mussten Methoden entwickelt werden, um weitere Sensormodalitäten in dieses Format zu transformieren.

Insbesondere die eingesetzten kapazitiven Sensoren stellten hierbei eine große Herausforderung dar, da diese lediglich einen einzigen Abstandwert liefern können, obwohl ihr Messbereich im dreidimensionalen Bereich eine komplexe Geometrie aufweist. Vorherige Ansätze zur Erkennung von bekannten Objekten mit Hilfe kapazitiver Sensorik in strukturierten, industriellen Umgebungen (Hoffmann, Poeppel, Schierl & Reif, 2016) sowie datengetriebene Ansätze zur Modellierung des Messverhaltens von kapazitiven Sensoren (Poeppel, Siehler, Hoffmann & Reif, 2020) im Kontext einer unstrukturierten, häuslichen Umgebung sind bei Weitem nicht ausreichend. Deshalb wurden die physikalischen Eigenschaften (konkret die Ausbreitung ihres elektrischen Feldes) der am Roboter verbauten kapazitiven Sensoren vor dem Betrieb simuliert, und dieses dreidimensionale Modell des Messfeldes dann zur Laufzeit in Abhängigkeit des aktuell gemessenen Wertes in die globale Datenbasis eingetragen.

9.4.5 Risikomodellierung

Eine herkömmliche Risikomodellierung, wie in der Industrie üblich, ist im Rahmen von Assistenzrobotern nur bedingt zielführend. Da unter anderem genaue Spezifikationen des Roboters, wie beispielsweise Daten bezüglich des Bremswegs oder der exakten Momentangeschwindigkeit, nicht verfügbar sind, mit Hilfe derer die Definition der exakten und sicheren Schaltschwelle für das Anhalten des Roboters bestimmt werden kann, ist eine klassische Risikomodellierung nicht in Gänze möglich. Daher wurde in SINA ein Risikomodell erstellt, welches gewisse Annahmen über das Verhalten des Roboters enthält, die jedoch aktuell nicht abschließend verifizierbar sind. Würde ein Roboter eingesetzt, zu welchem diese Daten zur Verfügung stehen, wäre das Modell nach Eingabe dieser Daten im Produktivbetrieb nutzbar.

Das resultierende Sicherheitsmodell verarbeitet die Daten des Umgebungsmodells und schätzt das Risiko einer Kollision während der Interaktion basierend auf dem Risikomodell und der gemessenen Distanzen zu Objekten der Umgebung ab. Dies beeinflusst das Verhalten des Roboters, sodass es Kollisionen vermeidet, und sorgt dafür, dass der Roboter rechtzeitig gestoppt wird, falls eine Kollision unumgänglich ist (Flacco, Kröger, De Luca & Khatib, 2012).

9.4.6 Navigation und Manipulation

Für die Steuerung des Robotersystems, bestehend aus omnidirektionaler, mobiler Plattform und Manipulator, wurden die Anforderungen aus den betrachteten Szenarien und der Risikomodellierung ermittelt.

Um flüssige, erwartungskonforme Bewegungen zu erreichen, müssen sich alle Komponenten des Robotersystems gleichzeitig und koordiniert bewegen können. Die Bewegungsarten müssen sowohl reaktive Bewegungen, um beispielsweise der Hand des Menschen bei der Übergabe folgen zu können, als auch geplante Bewegungen zu einem definierten Ziel umfassen. Um dabei die Sicherheit gewährleisten zu können, muss es stets möglich sein, die Geschwindigkeit zu reduzieren oder Hindernissen aktiv auszuweichen. Sobald wieder ein sicherer Abstand vorliegt, soll die vorherige Aufgabe weiter ausgeführt werden können.

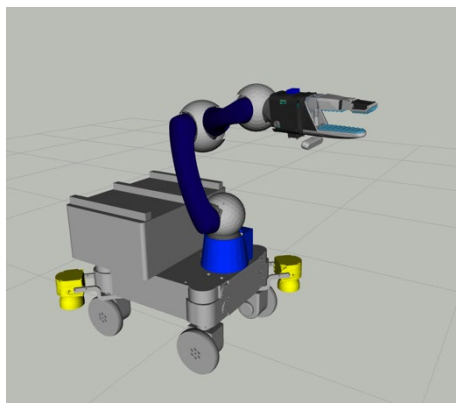


Abbildung 9.4: Das Robotersystem in der Simulation

Im Falle geplanter Bewegungen wird zunächst aus der Vielzahl möglicher Gelenkstellungen für eine gegebene Zielpose des Greifers eine optimale Stellung gesucht. Hierzu wird mittels Optimierungs-Metriken eine ausführbare Lösung ermittelt. Bei reaktiven Bewegungen ist das primäre Ziel, den Endeffektor relativ zur aktuellen Position zu bewegen, um auf dynamische Hindernisse reagieren zu können, die während einer geplanten Bewegung erkannt werden. Durch die redundante Kinematik können gleichzeitig auch abstrakte Ziele, wie beispielsweise die Bevorzugung von Roboterstellungen mit möglichst hohem Bewegungsspielraum, verfolgt werden.

9.4.7 Objektübergabe

Damit die Anforderungen der Sicherheit, Robustheit und erwartungskonformen Objektübergabe gewährleistet werden können, sind eine akkurate Erkennung des Objektes, sowie der Hand des Menschen notwendig. Hierfür wurden sowohl modellgetriebene als auch datengetriebene Methoden zur Erkennung und Posenschätzung der relevanten Objekte eingesetzt. Vor allem bei der Annahme eines Objektes vom Menschen ist eine Unterscheidung zwischen der Hand und des übergebenen Objektes von großer Bedeutung für die Sicherheit des Menschen, wofür kapazitive Sensoren ideal geeignet sind. Hierzu wurde deren Fähigkeit zur Materialerkennung ausgenutzt, um mit Hilfe von tiefergehenden Analysen der Sensordaten Hände und Interaktionsobjekte voneinander unterscheiden zu können.

Die Robustheit der Übergabe und deren Erwartungskonformität sind eng verzahnt. Einerseits muss sichergestellt werden, dass das übergebene Objekt vom Roboter nicht losgelassen wird, bevor der Interaktionspartner das Objekt sicher gegriffen hat, andererseits muss die Übergabe möglichst flüssig ablaufen. Auch hierfür sind kapazitive Sensoren optimal geeignet: Eine leichte Berührung des Objektes, während dieses noch vom Roboter gehalten wird, kann in den Näherungsmessdaten festgestellt werden, während ein stärkerer Griff des Objektes durch den Menschen zusätzlich in den Berührungsdaten registriert wird. Eine datengetriebene Methode konnte hieraus feststellen, wann das Objekt vom Roboter losgelassen werden darf und dynamisch auf die Erwartungen unterschiedlicher Nutzenden angepasst werden.

Für die Integration aller Komponenten in das Gesamtsystem wurde eine globale Koordinationskomponente entwickelt, die einerseits die Einzelkomponenten zur Steuerung der robotischen Elemente, sowie zur Erfassung und Auswertung der Sensordaten miteinander vernetzt und andererseits abstrahierte Befehle zur Steuerung des Gesamtsystems über eine Schnittstelle nach außen bereitstellt. Diese Befehle können dann von beliebigen Mechanismen zur Interaktion mit den Nutzenden angesprochen werden, und stellen somit eine äußerst flexible Architektur zur Erstellung von assistiven Roboteranwendungen dar. Soll beispielsweise ein Objekt im Raum ausfindig gemacht und übergeben werden, kann dieser abstrakte Befehl von einer Komponente zur Spracheingabe an die koordinierende Komponente übergeben werden, welche diesen dann in weitere, feingranulare Befehle dekomponiert und deren Ausführung überwacht.

9.4.8 Interaktion und Design

Da die Sprachsteuerung von Beginn an als zentrales Element des Interaktionskonzeptes identifiziert werden konnte, und in der Servicerobotik aktueller Forschungsstandard ist, wurden hierfür in Experimenten mögliche Dialogbausteine und Abläufe für die Demonstrationsszenarien entwickelt. Im Zusammenhang mit der Spracheingabe muss auch die Sprachausgabe gesehen werden. Hier spielt auch das Design des Roboters eine wichtige Rolle für die Erwartung des Menschen, ob das System mit Sprache oder roboterhaften Tönen antwortet. Darüber hinaus war das Ziel, den Zustand des Systems jederzeit für die Nutzenden einfach erkennbar zu machen. Hierfür wurden verschiedene Ansätze zur Illumination entwickelt, die den Nutzenden verdeutlichen, wo, wohin und wie der Roboter sich oder ein Objekt bewegt.

In der Literatur zeigt sich, dass Menschen Robotern sehr häufig Persönlichkeitsmerkmale zuschreiben. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn ein Roboter in der Wohnumgebung von Menschen längerfristig tätig ist. Daraus resultierte die Folgerung, dass der Roboter eine möglichst langanhaltende, positive Wirkung der dargestellten Persönlichkeit haben muss. Neben den genannten Interaktionskonzepten ist dies auch bei der Bewegung zu berücksichtigen. Diese sollten in der Geschwindigkeit angemessen sowie flüssig sein und über das rein funktional notwendige hinausgehen, um persönliche Interaktion darzustellen.

Das potenzielle Produktdesign des Roboters wurde mehrfach iteriert und verändert. Die Hypothese eines zoomorphen Roboters, bei dem der Greifer als Kopf mit Maul oder Schnabel gestaltet wäre, hielt der Analyse nicht stand und wirkte auf die Nutzenden eher abschreckend. Im finalen Prototypen wird der Greifer als rüsselartiges Werkzeug dargestellt. Die Plattform wird mit Augen bestückt. Damit hat SINA eine

eigene, roboterhafte Gestaltung und wird Anforderungen aus den ELSI-Aspekten gerecht, nach der ein Roboter nicht zu sehr einem lebendigen Wesen ähneln, sondern immer ein technisches Gerät bleiben soll.

9.5 Forschungsausblick

Die Daten der Nutzerstudie sollen genutzt werden, um die Übergabe des entwickelten Demonstrators und weitere Demonstratoren bewerten sowie weitere Gestaltungsempfehlungen ableiten zu können. Basierend auf der Auswertung der zweiten Nutzerstudie kann identifiziert werden, welche weiteren Änderungen vorgenommen werden müssen, um dem menschlichen Übergabeverhalten (falls gewünscht und ethisch vertretbar) so nah wie möglich zu kommen. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse in der Sensorfertigung und der Leitungsverlegung erscheint es notwendig, andere Herstellungsverfahren zu verwenden, damit die kapazitiven Näherungs-Sensoren leichter gefertigt und an Strukturteilen angebracht werden können. Hierzu sind zuverlässigere Fertigungsverfahren zu untersuchen.

Im SINA-Projekt wurde die Grundfertigkeit der Objektübergabe prototypisch entwickelt und mit vordefinierten Objekten evaluiert. Dazu wurde die Interaktion des Roboters auf eine Person eingeschränkt. Zukünftige Forschungen müssen sich mit der Aufhebung dieser Einschränkung auseinandersetzen. Damit ein Assistenzsystem funktionell und sicher eingesetzt werden kann, muss die Übertragbarkeit der Übergabe zudem auf beliebige Haushaltgegenstände erfolgen. Hier stellen die geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Objekte eine große Herausforderung für Hardware- und Softwaremethoden dar.

Das Umgebungsmodell für Roboter wird in zukünftigen Forschungen um weitere Sensormodalitäten erweitert und verallgemeinert werden. Dieses Modell, sowie die sichere Bewegungsplanung werden zudem auf weitere Anwendungsgebiete übertragen werden, um somit zu einem ganzheitlichen Ansatz für allgemeine Robotikanwendungen näher zu kommen. Der erstellte Demonstrator wird weiterentwickelt und in diesem Rahmen als Basis für weitergehende Forschungen im Bereich der assistiven Pflegerobotik dienen.

9.6 Implikationen für die Praxis

SINA ist ein komplexes System, welches viele vernetzte Hardware- und Software-Komponenten beinhaltet. Die Zuverlässigkeit dieser einzelnen Komponenten, vor allem jener der Hardware sowie die Robustheit der Kommunikation zwischen diesen sind die Voraussetzungen für einen Einsatz im realen Einsatz. Folglich muss es gelingen, dass SINA den Schritt auf technischer Ebene vom Labor-Prototypen zum alleinstehenden und funktionstüchtigen Produkt schafft.

Solche Eigenschaften wie Akzeptanz, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit des SINA-Roboters und dessen Funktionalitäten können ausschließlich unter realen Bedingungen erfolgreich getestet und evaluiert werden. Eine solche Langzeitstudie bietet die Chance, einen erheblichen Erkenntnisgewinn zu generieren, von welchem alle Entwickler von Assistenzrobotern im Forschungs- und Herstellungsbereich profitieren würden und sich überdies auch neue Einsatzbereiche solcher Robotersysteme ergeben könnten.

Insgesamt stellen die Entwicklungen des Projekts SINA in den Bereichen der Sensorik, der autonomen Navigation sowie des Verständnisses der eigenen Umwelt für Roboter einen enormen Fortschritt in der Entwicklung persönlicher Assistenzroboter und darüber hinaus dar.

9.7 Literaturverzeichnis

Alagi, H., Navarro, S. E., Mende, M. & Hein, B. (2016). "A versatile and modular capacitive tactile proximity sensor," *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, Philadelphia, PA, 2016, pp. 290-296, doi: 10.1109/HAPTICS.2016.7463192.

Auer, A. (1995). *Zur Theologie der Ethik. Das Weltethos im theologischen Diskurs. Studien zur theologischen Ethik.* Universitätsverlag, Freiburg.

Flacco, F., Kröger, T., De Luca, A., & Khatib, O. (2012). A depth space approach to human-robot collision avoidance. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 338-345). IEEE.

Göger, D., Alagi, H. & Wörn, H. (2013). "Tactile proximity sensors for robotic applications," *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Cape Town, 2013, pp. 978-983, doi: 10.1109/ICIT.2013.6505804.

Hoffmann, A., Poeppel, A., Schierl, A. & Reif, W., (2016). Environment-aware proximity detection with capacitive sensors for human-robot-interaction. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE.

Poeppel, A., Siehler, M., Hoffmann, A. & Reif, W. (2020). Robust Distance Estimation of Capacitive Proximity Sensors in HRI using Neural Networks. In *2020 Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*. In Veröffentlichung.

Werbick, J. (2015). *Theologische Methodenlehre.* Verlag Herder GmbH, Freiburg.

10 RoKoRa – Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration mit Hilfe hochauflösender Radare

Mohamed Abdelawwad, Josef Börcsök, Torsten Borowski, Malte Drabesch, Manfred Hägelen, Thomas Schraml, Michael H. Schwarz, Christian Voß, Christian Zech

Projektpartner: AUDI AG, Fachgebiet Rechnerarchitektur und Systemprogrammierung (ICAS) der Universität Kassel, FANUC Deutschland GmbH, Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF), Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen (SCAI), IMST GmbH, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)

10.1 Zusammenfassung des Projekts

Bei der Interaktion von Mensch und Maschine hat die Personensicherheit oberste Priorität. Existierende Sicherheitslösungen für leistungsstarke Robotersysteme erfordern entweder große Sicherheitsabstände oder lassen nur langsame Bewegungsgeschwindigkeiten des Roboters zu. Eine sichere und gleichzeitig effiziente Interaktion ist deshalb damit bislang kaum möglich.

Im Projekt RoKoRa steht die Entwicklung einer hochauflösenden und reaktionsschnellen Sicherheitssensorik für Assistenzroboter im Vordergrund. Kompakte Radarsensoren sollen vernetzt auf dem Roboterarm angebracht werden und so eine mitbewegte Schutzhülle bilden. Ziel ist es, in diesem Schutzraum Personen mit deren Annäherungsverhalten in nahezu Echtzeit zu erfassen und durch situationsabhängige Anpassung der Roboterbewegung eine sichere und effiziente Interaktion mit praxistauglichen Geschwindigkeiten zu ermöglichen.

Konzepte für Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) im industriellen Umfeld, die bislang aufgrund limitierter Bewegungsgeschwindigkeiten und fehlender Absicherung von Roboterwerkzeugen und Greifern nicht oder meist nur unwirtschaftlich umsetzbar sind, werden damit für den breiten Einsatz in Produktionsbereichen möglich. Die Ergänzung der menschlichen Stärken mit der Leistungsfähigkeit von Maschinen bietet hier durchgängige Einsatzpotentiale insbesondere zur ergonomischen Entlastung an Arbeitsplätzen, zur Sicherstellung gleichbleibend hoher Qualität und für Assistenzfunktionen bei komplexen Tätigkeiten.

Die Übertragbarkeit der Radarhülle ermöglicht zudem auch neue, intensivere Interaktionsmöglichkeiten für Service-Robotik im Dienstleistungssektor und für den Pflegebereich.

10.2 Hintergrund

Es gibt viele Gründe, warum die Kollaboration von Mensch und Roboter unsere Privat- und Arbeitswelt in den nächsten Jahren verändern wird: Ein Schrittmacher dieser Entwicklung ist der Demografische Wandel. Körperlich schwere Arbeiten und sich monoton wiederholende Tätigkeiten sollen zukünftig im direkten Arbeitsumfeld oder sogar im privaten Umfeld des Menschen immer weiter von Robotern übernommen

werden, so dass die alternde Bevölkerung roboterassistiert länger und mit weniger gesundheitlichem Risiko produktiv arbeiten, länger selbstbestimmt leben und mit größerem Komfort gepflegt werden kann. Diese Interaktion muss mit großer Flexibilität ohne physikalische Abtrennung zwischen Mensch und Maschine erfolgen können.

Wenn Mensch und Roboter zusammenarbeiten, hat jedoch die Sicherheit des Menschen oberste Priorität. Dies wird zurzeit im Wesentlichen durch Beschränkung von Abstand, Geschwindigkeit und bewegter Masse erreicht. Auch spitze und kantige Geometrien sowie Klemm- und Scherstellen sind extrem kritisch. Viele Anwendungen scheitern dann meist aus diesen Gründen, weil dadurch die Leistungsfähigkeit des Systems zu sehr eingeschränkt wird. Gefährdungen für den Menschen durch Roboter auszuschließen ist das Ziel der Industrienorm ISO 10218 „Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen“ Teil 1 und 2, die für bestimmte Fälle auch im Gesundheitswesen oder im Dienstleistungsbereich anzuwenden sind. Hier wird festgelegt, wie der Betrieb von Roboteranlagen ohne trennenden Schutzzaun durch den Einsatz von Sicherheitssensoren wie Laserscannern oder Lichtgittern möglich ist.

Einen anderen Ansatz in der MRK verfolgen die sensitiven Leichtbauroboter, die mittels Kraft-Momenten-Sensoren oder drucksensitiver (taktiler) Elemente einen Kontakt erkennen können. Aufgrund der Leichtbauweise können die dabei maximal zulässigen biomechanischen Belastungen, die nach ISO/TS 15066 auf den menschlichen Körper einwirken dürfen, noch eingehalten werden. Auch deren Gestaltung vermindert Klemm- und Schergefahren beim Betrieb. Diese Roboter sind aber nur für kleine Traglasten (bis zum Beispiel 14 kg) geeignet. Wollte man hier vom Leichtbaukonzept abgehen, um zu größeren Traglasten zu kommen, sind ebenfalls verbesserte Sensorsysteme unerlässlich, welche die größeren Nachlaufzeiten und -wege aufgrund der Massenträgheit durch eine Vorausberechnung von drohenden Kollisionen kompensieren.

Im Bericht „Sichere Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin wird der Stand der Technik in einer breiten Literaturrecherche dargestellt. Die heute bekannten Sensorsysteme für diesen Anwendungsbereich werden verglichen, bestimmten Anwendungsgebieten zugeordnet und die Grenzen der Anwendung diskutiert.

Unser Vorhaben ist dort im Bereich der maschinenzentrierten Überwachung einzuordnen, bei der Sensoren zur Kollisionsvermeidung zwischen Mensch und Maschine direkt an der Maschine angebracht sind. Diese Art der Überwachung ist typisch, um eine sichere Zusammenarbeit des Roboters mit einer oder mehreren Personen im gleichen Arbeitsbereich zu ermöglichen. Bislang existieren hier erst Lösungen mit kapazitiven und taktilen Sensoren. Nachteil dieser Systeme ist die geringe Reichweite von unter 50 cm bei kapazitiven und 0 cm bei taktilen Sensoren. Hier stellt das Radarsensornetzwerk einen großen Fortschritt dar. Radarsensoren sind in der Lage, selbst unter eingeschränkten optischen Sichtverhältnissen (wie beispielsweise im Falle von Rauch, Staub, Nebel oder Dampf) Ziele über große Reichweiten berührungslos und zuverlässig zu erfassen. Im Rahmen des Projekts soll eine Annäherung im Abstand von mehreren Metern erkannt werden. Durch die Fusion mehrerer auf dem Roboter verteilter Radarsensoren wird eine mitbewegte Radarhülle definiert. Diese bestimmt die Position einer Person direkt in Relation zur Maschine, unabhängig von Schmutz und Staub, Feuchtigkeits- oder wechselnden Licht- und

Temperaturverhältnissen, bei denen andere Sensorprinzipien Schwierigkeiten in der zuverlässigen Detektion aufweisen. Ein weiterer Vorteil ist, dass in gewissen Grenzen auch eine Detektion einer Person durch optisch undurchsichtige Hindernisse hindurch möglich ist, die für optische Messsysteme entsprechend nicht erkennbar ist.

Die Möglichkeit, den Bewegungsvektor einer Person oder eines Körperteils, die den Schutzraum des Roboters verletzt, festzustellen, ist bei Radarsystemen ebenso gegeben. Die Verminderung der zu prozessierenden Datenmengen von Radarsignalen im Vergleich zu Bildsignalen verspricht zudem sehr kurze Reaktionszeiten des Gesamtsystems und damit eine kleinere zulässige Distanz von Mensch zu Roboter. Kollisionen können durch das Sensorsystem ausgeschlossen werden und dadurch sind aufwendige Prüfungen der Fremdkrafteinwirkung nach der ISO/TS 15066 nicht mehr notwendig. Es wäre damit die Realisierung einer sicheren, dynamisch abstandsabhängigen Geschwindigkeitsregelung des Roboters möglich. Das bedeutet, je näher der Mensch dem Roboter kommt, desto langsamer wird die Roboterbewegung bis hin zum Stillstand. Man könnte somit jeweils die maximal möglichen Bewegungsgeschwindigkeiten bei minimalem Abstand realisieren, was eine insgesamt schnellere und dadurch effizientere Zusammenarbeit des Roboters mit dem Menschen möglich macht. Im Alltagsleben hätte die Interaktion auch etwas „Natürlicheres“ und würde durch die angepasste Geschwindigkeit als angenehmer und intuitiver empfunden.

10.3 Methodische Herangehensweise

Die Anforderungen an eine erwartungskonforme, effiziente und industrietaugliche Absicherung von Mensch-Roboter-Kooperation wurden zunächst den Projektpartnern in Ingolstadt vor Ort bei der AUDI AG im Rahmen einer Werks- und Technikums-Besichtigung vermittelt und anschließend, mit Fokus auf eine breite Nutzung der Innovation, detailliert. Auf Basis weiterer Abstimmungen konnte anschließend eine beispielhafte, realitätsnahe Anwendung definiert werden, die als Szenario für den geplanten Demonstrator beschlossen wurde.

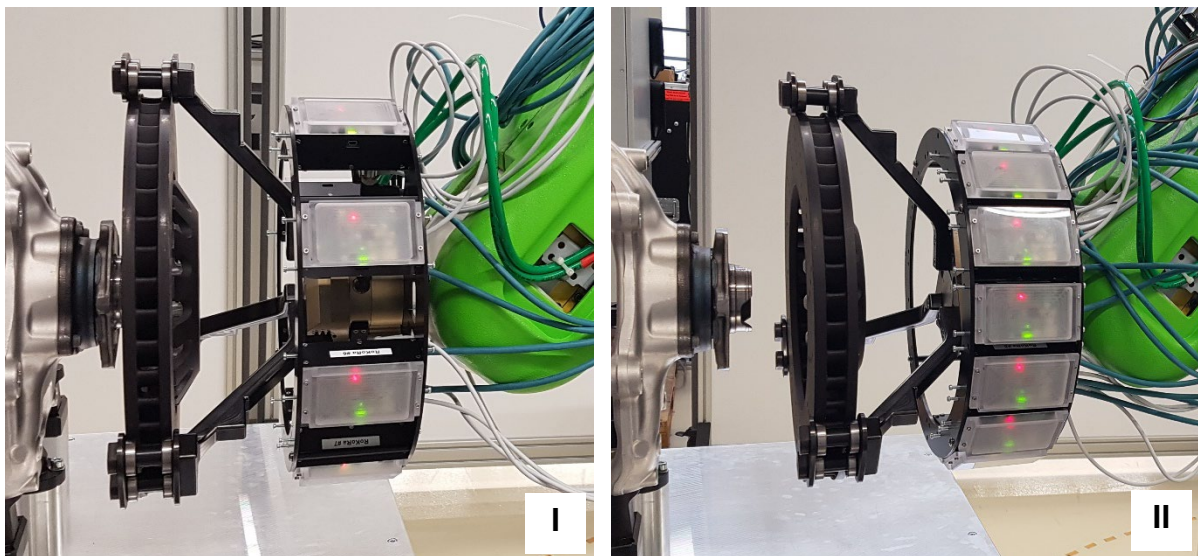


Abbildung 10.1: RoKoRa-Sensorring in den beiden Anordnungen (I) Jeder zweite Steckplatz (360°) und (II) Halbseitig alle Steckplätze (180°)

10.3.1 Entwicklungsmethoden

Damit ein sicheres und zuverlässiges System entsteht, muss nicht nur die zentrale Recheneinheit die Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen erfüllen, sondern die Sensoren, Aktuatoren und vor allem die Kommunikationseinheiten müssen ebenfalls den Anforderungen genügen. Gefahren können auch durch interne Fehlfunktionen von den einzelnen Teilsystemen ausgehen, auch diese gilt es zu eliminieren oder aber rechtzeitig zu erkennen und das System in den sicheren Zustand zu gehen.

Da ein Roboter eben auch einen Menschen verletzen kann, muss ein funktional sicheres System eingesetzt werden, auch in Hinblick darauf, dass gegenwärtig Roboter bei Anwesenheit von Menschen die Arbeitsgeschwindigkeit sehr reduzieren und dadurch sehr langsam agieren, was momentan unwirtschaftlich ist.

Vernünftige Konzepte müssen Sicherheitsaspekte inhärent berücksichtigen. Sicherheitskonzepte müssen schlüssig und durchgehend sein. Ein nachträgliches Berücksichtigen von Sicherheits- und Zuverlässigkeitsaspekten resultiert oftmals in einem kompletten Re-Design und Neuentwicklung des Gesamtsystems.

Wenn Roboter den Menschen unterstützen und helfen sollen, so folgt der Roboter keinen festen Abläufen oder Bahnen und seine Gliedmaßen können sich in den unterschiedlichsten Positionen und Richtungen befinden. Hierfür sind die neuen Radar-Sensorsysteme gedacht, die als Radarhaut die Gliedmaßen des Roboters umgeben. Die dreidimensionale Detektion der Mensch-Roboter-Kinematik im Kollaborationsraum wird durch die gemeinsame Verarbeitung der Sensorsignale, die Entwicklung neuer Interaktionsmöglichkeiten, durch Analyse der Position und der Bewegungsrichtung möglich sein.

Der Aufbau des Radar-Sensorsystems folgt dem Ziel des konzeptionellen Entwurfs und der realen Implementierung konstruktiver Maßnahmen zur Sicherheitsintegrität, wie sie in relevanten generischen Normen zur Funktionalen Sicherheit bzw. zur Maschinensicherheit einschl. der berührungslos wirkender Schutzeinrichtungen (sensorgesteuerte Personenschutzeinrichtungen) beschrieben sind. Die Umsetzung dieser konstruktiven Maßnahmen ist im Projekt RoKoRa im Bereich der Hard- und Softwarestruktur (bspw. Redundanzen), der Anwendung konstruktiver Sicherheitsprinzipien (bspw. Dynamisierung, Überdimensionierung) und Maßnahmen zur Fehleraufdeckung (Diagnose, Vergleich, Plausibilisierung) und der erforderlichen Qualitäten der verwendeten Bauteile und Komponenten spezifiziert worden. Für die Aufgabe der Zentralsteuerung („Brain“) kommt ein zertifizierter Safety-Controller (Sicherheits-SPS) zum Einsatz. Das Design der Software-Elemente folgt ebenfalls den grundsätzlichen Gestaltungsanforderungen generischer Normen zur Funktionalen Sicherheit.

Für die eigentliche Umsetzung von funktional sicheren elektronischen Systemen kann die IEC 61508 angewendet werden. In den Teilen 2 bis 4 werden die Anforderungen an Hardware und Software für sicherheitsgerichtete Systeme beschrieben.

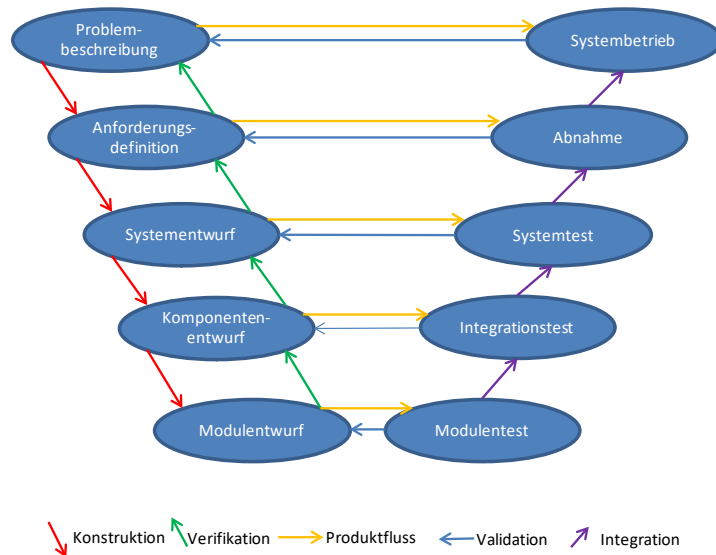


Abbildung 10.2: V-Modell

Hier wird geklärt, welche Anforderungen erfüllt sein müssen, je nach Sicherheitskategorie, damit ein System in gefahrbringenden Bereichen eingesetzt werden kann. Hierbei ist eine systematische Vorgehensweise, z. B. wie im V-Modell beschrieben (

Abbildung 10.2), zwingend notwendig. Generell wird das Gesamtprojekt zunächst als Anforderungen definiert und dann das System als Ganzes entworfen, ehe es in Komponenten bis hin zu kleinen Modulen zerlegt und entwickelt wird. Auf der anderen Seite wird durch stetiges Testen auf jeder Ebene gewährleistet, dass das, was einst definiert wurde, auch entwickelt wird und möglichst ohne Fehler.

Um einzelne Module, Komponenten oder das Gesamtsystem zu testen, gibt es zahlreiche Verfahren und Methoden, die durchgeführt werden können. Für die Tests werden gängige Verfahren und Prozeduren der zuverlässigen und sicheren Systementwicklung angewendet, wie in der untenstehenden Abbildung gezeigt.

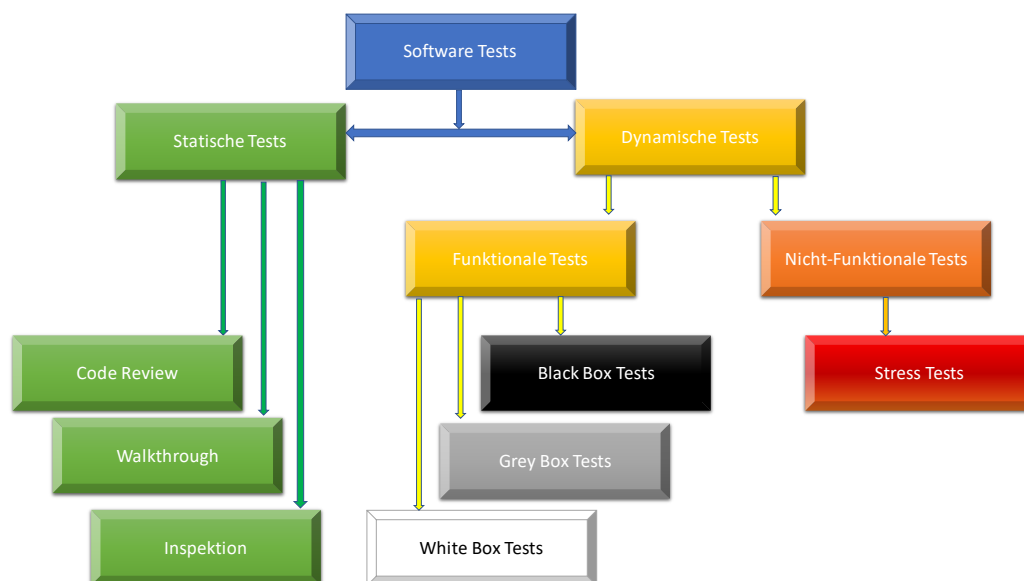


Abbildung 10.3: Software Tests

Statische Tests zur Überprüfung des Codes wurden durchgeführt, um sicherzustellen, dass dieser korrekt ist und keine kritischen Programm-Konstrukte beinhaltet, die das System in einen gefährlichen Zustand versetzen können.

Die dynamischen Tests, die durchgeführt wurden, lassen sich in funktionale und nicht-funktionale Tests einteilen. Die funktionalen Tests werden allgemein als Black-Box, Grey-Box und White-Box Tests bezeichnet. Bei den Black-Box Tests, wird davon ausgegangen, dass die Funktionalität bekannt ist, jedoch nicht die eigentliche Implementierung. Bei definierten Eingangswerten werden entsprechende Ausgangswerte bzw. Ausgangsverhalten erwartet. Bei den White-Box Tests ist die Implementierung bekannt und es können explizit bestimmte Konstrukte oder Programmpfade oder Speicherverhalten getestet werden. Grey-Box Test-Verfahren setzen mehr Wissen über das Verhalten der Komponente voraus, jedoch ohne explizit die Implementierung zu kennen.

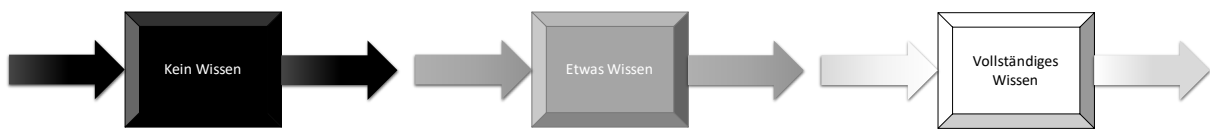


Abbildung 10.4: Funktionale Tests

Für die Tests der einzelnen Komponenten wurde eine Variation aus Black-, Grey- und White-Box Tests verwendet.

Um die Randbedingungen und das Verhalten des Systems unter extremen Belastungen zu kennen, werden entsprechende Tests durchgeführt. Abbildung 10.5 zeigt eine Datenaufzeichnung während eines Tests. Zum Beispiel wurde hier die Anzahl der Nachrichten pro Sekunde erhöht, um über den maximalen Durchsatz Aussagen treffen zu können.

RoKoRa Receiver				
Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Total
Message/sec: 296	Message/sec: 517	Message/sec: 657	Message/sec: 510	Message/sec: 3,758
Message/10 sec: 4,973	Message/10 sec: 4,938	Message/10 sec: 5,665	Message/10 sec: 4,088	Message/10 sec: 38,140
Message/30 sec: 14,509	Message/30 sec: 15,178	Message/30 sec: 17,288	Message/30 sec: 12,812	Message/30 sec: 113,453
Message/60 sec: 28,756	Message/60 sec: 29,611	Message/60 sec: 33,771	Message/60 sec: 25,217	Message/60 sec: 224,821
Message total: 115,098	Message total: 131,951	Message total: 117,106	Message total: 131,915	Message total: 700,247
Byte/sec: 192,201 B	Byte/sec: 346,714 B	Byte/sec: 488,635 B	Byte/sec: 348,689 B	Byte/sec: 2,560 KB
Byte total: 78,941 KB	Byte total: 91,044 KB	Byte total: 81,000 KB	Byte total: 92,809 KB	Byte total: 479,636 KB
Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Network total:
Message/sec: 275	Message/sec: 646	Message/sec: 428	Message/sec: 429	47,657
Message/10 sec: 3,778	Message/10 sec: 4,638	Message/10 sec: 4,663	Message/10 sec: 5,397	
Message/30 sec: 10,837	Message/30 sec: 14,048	Message/30 sec: 13,366	Message/30 sec: 15,415	
Message/60 sec: 21,901	Message/60 sec: 27,867	Message/60 sec: 26,950	Message/60 sec: 30,748	
Message total: 60,308	Message total: 60,891	Message total: 41,869	Message total: 41,109	
Byte/sec: 202,938 B	Byte/sec: 459,535 B	Byte/sec: 278,293 B	Byte/sec: 305,335 B	
Byte total: 40,221 KB	Byte total: 40,282 KB	Byte total: 27,330 KB	Byte total: 28,005 KB	

Abbildung 10.5: Stress-Tests

10.3.2 Sensorentwicklung

Bei der Entwicklung der Radarsensorik wurde zunächst eine Recherche zu den auf dem Markt verfügbaren Technologien sowie den aktuellen gesetzlichen Regularien (Freigabe der Frequenzen, maximale Sendeleistung etc.) durchgeführt. Basierend auf diesen Daten sowie den Anforderungen aus der geplanten Anwendung wurde anschließend das Konzept eines Radarsensors entwickelt, der folgende wesentliche Eigenschaften miteinander verbindet:

- Hohe Auflösung und Empfindlichkeit

- Kompakte Größe und geringer Stromverbrauch
- Modularer Aufbau zum Vergleich verschiedener Radar-Technologien
- Skalierbarkeit sowie die Möglichkeit zur Einbindung in ein Sensornetz

Der auf diese Weise spezifizierte Sensor besteht aus zwei Hauptkomponenten: einer DSP-Platine mit Mikrocontroller, Stromversorgung und Kommunikationsschnittstelle (Backend) sowie einer HF-Platine mit einem Radarchip und integrierten Antennenstrukturen (Frontend). Während das Backend bei der IMST GmbH entwickelt und aufgebaut wurde, erfolgte die Entwicklung des Frontends bei dem Fraunhofer IAF. Der Sensorknoten zum Zusammenführen der Daten mehrerer Radarsensoren wurde an der Universität Kassel konzipiert.

10.4 Ergebnisse

10.4.1 Gesamtsystem

Nach der ausführlichen Bandbegehung und Technikumsbesichtigung wurde als Anwendung für den RoKoRa-Demonstrator gemeinsam die Bremsscheibenmontage definiert. Hierbei soll die Unterstützung der Fertigungsmitarbeiter durch einen Roboter (FANUC CR-35iA) im fertigungsähnlichen Umfeld des Audi Technikums Gaimersheim dargestellt werden, in dem der Roboter das Handling schwerer Bremsscheiben (7 kg - 13 kg) übernimmt. Diese sind paarweise vorkommissioniert und sollen zur ergonomischen Entlastung des Mitarbeiters zunächst gegriffen und dann zum Verbauort an das Schwenklager, welches auf einem Werkstückträger positioniert ist, transportiert werden. Anschließend fixiert der Fertigungsmitarbeiter in der Interaktionszone die Bremsscheibe mittels einer Schraube. Hierzu muss durch den Fertigungsmitarbeiter noch eine Lochbildüberdeckung (Bremsscheibe zu Radnabe) hergestellt werden. Nach Quittieren der erfolgten Verschraubung holt der mit der Sicherheitssensorik ausgestattete Roboter unverzüglich und mit maximal möglicher Geschwindigkeit die nächste Bremsscheibe. Die erforderliche Bewegung des Roboters ist in Abbildung 10.6 dargestellt.

Die Anforderungen für dieses Szenario wurden dann aus Sicht des Endanwenders konkretisiert und im Spezifikationsdokument festgeschrieben.

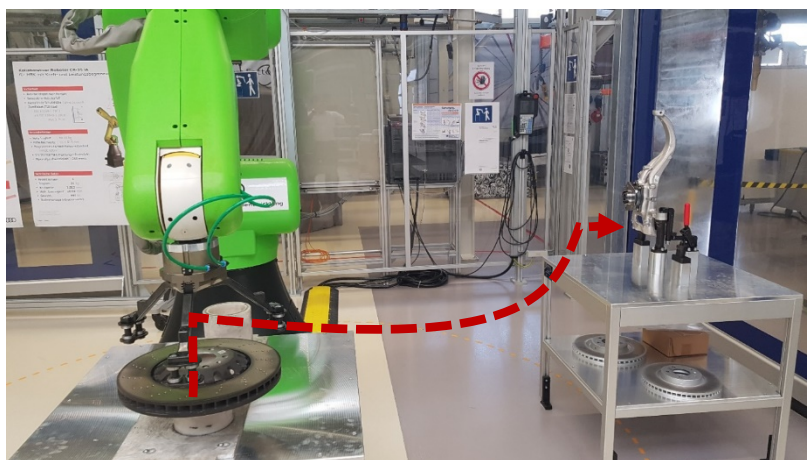


Abbildung 10.6: Als Demonstrator dient ein FANUC Roboter inkl. pneumatischen Greifsystems mit mechanischer Greifkrafterhaltung für die Unterstützung bei der kollaborativen Bremsscheibenmontage

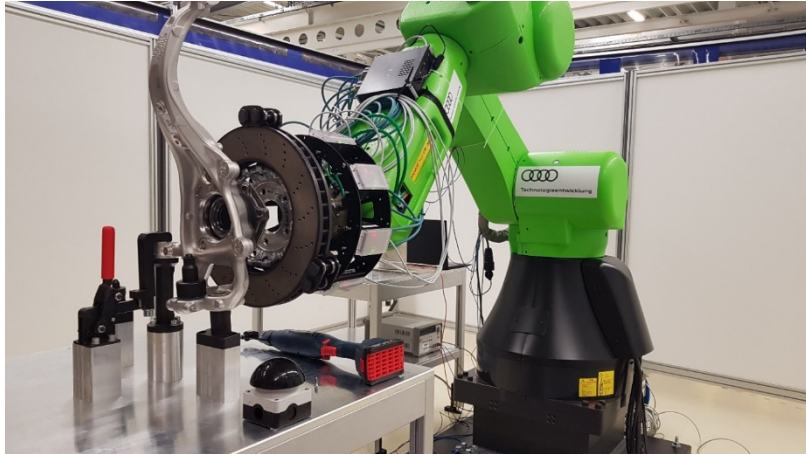


Abbildung 10.7: RoKoRa-Demonstrator mit Radar-Sensornetzwerk

Für den Demonstrator musste u.a. auch ein spezielles Greifsystem konstruiert und realisiert werden. Für dieses pneumatisch betriebene Greifsystem waren insbesondere folgende zwei Punkte zu beachten:

- 1) Die Bremsscheibe darf bei Druckluftverlust nicht herabfallen
(→ Personengefährdung im kollaborativen Betrieb)
- 2) Die Bremsscheibe muss im Greifer drehbar gelagert sein
(→ Herstellen der Lochüberdeckung für die Verschraubung von Bremsscheibe und Radnabe)

10.4.2 Radar-Frontend

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Generationen von Radarsensoren entwickelt. Die erste Generation beruht auf kommerziellen Mehrkanal-Chipsätzen bei einer Arbeitsfrequenz um 77 GHz. Dadurch ist es möglich, neben dem Abstand und der Geschwindigkeit von Objekten auch deren Raumwinkel zu bestimmen, was die dreidimensionale Umgebungsrekonstruktion erleichtert. In der zweiten Generation kommen hingegen breitbandige Chipsätze im Frequenzbereich um 140 GHz zum Einsatz, welche am Fraunhofer IAF gefertigt sind. Aufgrund der Einkanaligkeit ist hier keine direkte Bestimmung der Raumwinkel von Objekten möglich, demgegenüber ist aufgrund der hohen Bandbreite die Tiefenauflösung deutlich verbessert. Mit dem 140 GHz-Sensor wird eine Auflösung von 1 cm erwartet, sodass diese hoch genug ist, um selbst kleine Strukturen wie Finger zu trennen und detektieren, sodass eine noch engere Zusammenarbeit zwischen Roboter und Mensch gegeben ist. Im Rahmen der Verifikationsmessungen im Projekt kann somit untersucht werden, ob eine hohe Auflösung zur besseren Trennbarkeit von Objekten oder die Rauminformationen aufgrund der Mehrkanaligkeit eine größere Rolle für Radarsensoren in der Mensch-Roboter-Kollaboration spielen, beziehungsweise einen größeren Mehrwert bieten.

In Abbildung 10.8 sind die entwickelten und eingesetzten 77 GHz (a) und 140 GHz Frontends (b) dargestellt. Beim 77 GHz Frontend sind deutlich die mehreren Antennen für die Sende- und Empfangskanäle zu erkennen. Das 140 GHz ist im abgebildeten Zustand noch unbestückt, in der Mitte der Abbildung ist die eine Sende- und Empfangsantenne zu erkennen, sowie darüber eine Kavität in der Platine, in der der Hochfrequenzschaltkreis eingesetzt wird.

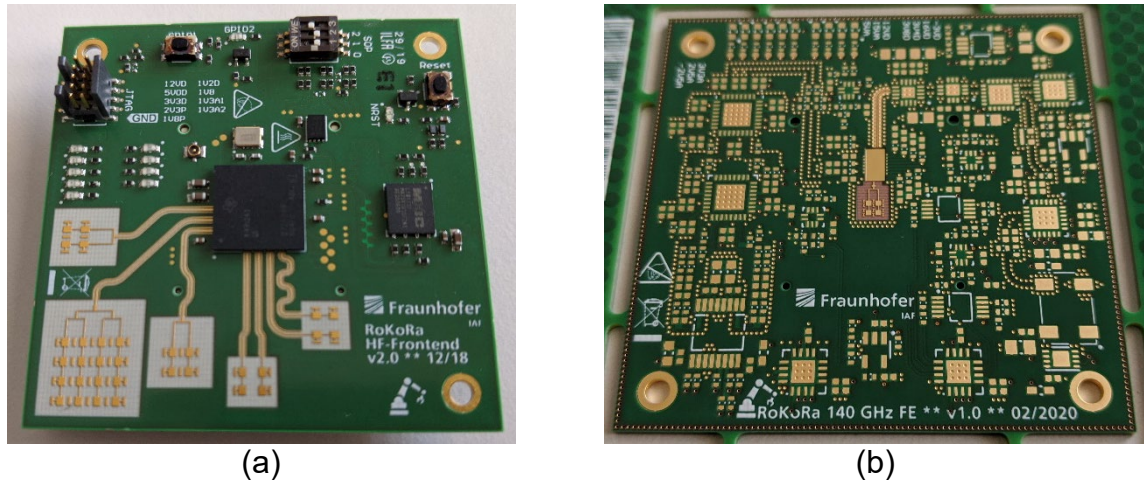


Abbildung 10.8: 77 GHz Radar-Frontend mit mehreren Sende- und Empfangsantennen (a) sowie noch unbestücktes 140 GHz-Frontend (b).

10.4.3 Protokoll

Während ein Protokoll Buffer für die Sensordaten verwendet wird, gibt es zusätzlich noch das in Abbildung 10.9 dargestellte Trägerprotokoll. Mit wenig Aufwand ermöglicht es typische Fehler wie Datenvertauschung, -verlust, -wiederholung, -injektion, etc. zu erkennen und darauf zu reagieren. Außerdem wird es benötigt, um die Zusammenlegung der einzelnen Sensordaten zu gestatten, unter anderem um die Datengröße zu speichern.

Als zusätzliches Sicherheitsmerkmal wird beim Verbindungsaufbau zwischen Sensor und Knoten ein Drei-Wege-Handschlag durchgeführt. Wenn sich ein Sensor beim Sensorknoten anmelden möchte, sendet dieser eine Nachricht. Der Sensorknoten antwortet daraufhin mit einer gültigen, zu der Anfrage passenden Nachricht, welche von dem Knoten wiederum bestätigt wird. Alle Nachrichten sind dabei durch einen alternierenden CRC gesichert, womit auf verfälschte Daten/Nachrichten reagiert werden kann.

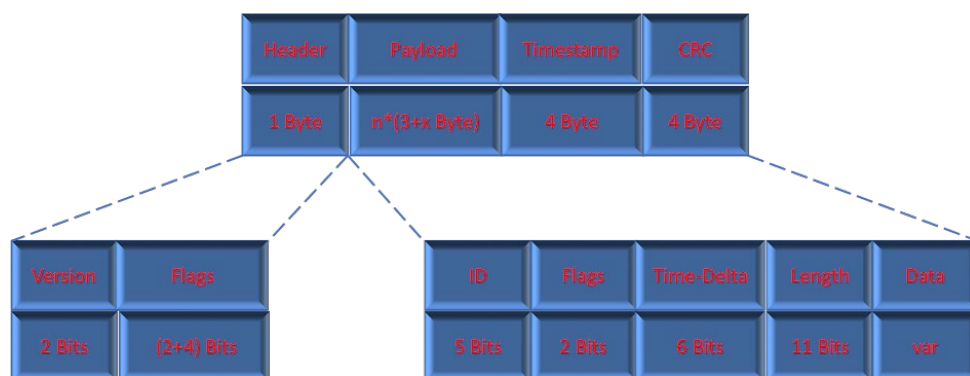


Abbildung 10.9: Trägerprotokoll

10.4.4 Sensorknoten

Die Zielsetzung bestand darin, einen zuverlässigen Sensorknoten zu entwerfen. Zuverlässigkeit und Sicherheit müssen von Anfang an mit in den Entwurf integriert werden. Bei einem Mehrprozessor-System, wie in der nachfolgenden Skizze gezeigt

(Abbildung 10.10), führt jeder Prozessor für sich die Aufgaben und Berechnungen alleine durch.

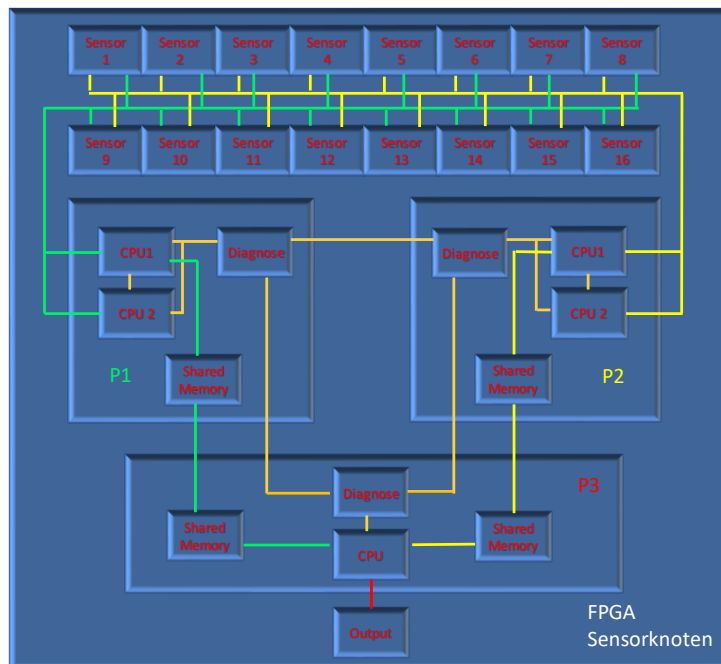


Abbildung 10.10: Sensorknoten

Weiterhin müssen synchron die Ergebnisse der Prozessoren verglichen werden. Ferner muss jedes Teilsystem sich selbst überwachen. Außerdem müssen alle Prozessoren sich gegenseitig überwachen, um mögliche Fehler zu erkennen. Die Sicherheitsanforderungen müssen im Bereich der Software genauso berücksichtigt werden wie in der Hardware. Auch die Kommunikation inklusive Protokollen (mit Protokoll-Stack) muss dieselben Sicherheitsanforderungen erfüllen, damit ein sicheres und zuverlässiges Gesamtsystem entstehen kann.

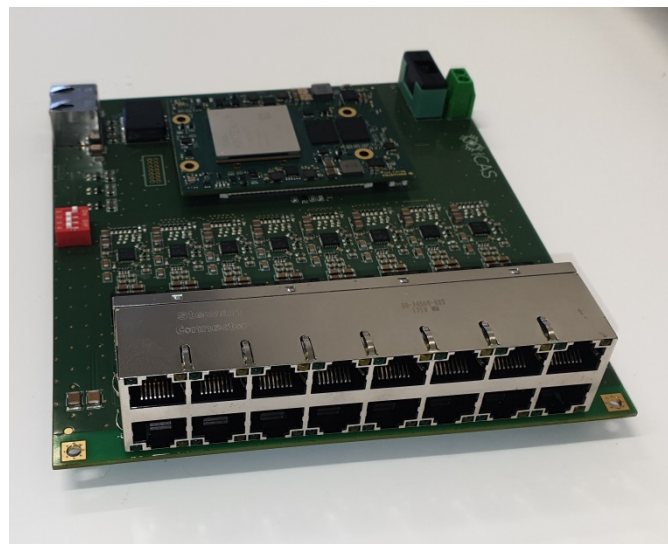


Abbildung 10.11: Sensorknoten-Hardware

Alle Sensordaten werden unabhängig in die Prozessoreinheit eingelesen. Die Daten werden auf ihre Korrektheit überprüft. Sind diese in Ordnung, so werden diese über

den Speicherblock (Shared Memory) an die dritte Prozessoreinheit (P3) weitergegeben. Sind die Daten von der zweiten Prozessoreinheit (P2) auch korrekt, so können die Daten von der dritten Prozessoreinheit (P3) nun weitergeleitet werden. Über die Diagnoseleitungen können die Prozessoren sich gegenseitig überwachen, bzw. Zustandsinformationen austauschen. Werden Fehler in einer Prozessoreinheit diagnostiziert, so kann das Gesamtsystem gemäß einer 1oo2D Architektur in den sicheren Zustand geführt werden. Eine andere Möglichkeit wäre, nur den beeinträchtigten Prozessor zu deaktivieren und mit reduzierter Geschwindigkeit und reduzierter Sicherheitsstufe den Prozess zu Ende zu führen. In Abbildung 10.11 ist eines der letzten Designs des Sensorknotens gezeigt.

10.4.5 Radarsensor

Im Rahmen des Projektes RoKoRa wurde ein neuartiger Radarsensor für die Montage an einem Roboterarm entwickelt und aufgebaut. Abbildung 10.12 zeigt einen solchen Sensor mit geöffnetem Gehäuse. Auf der oberen Platine (Frontend) erkennt man mehrere integrierte Antennenstrukturen, die neben der Entfernungsmessung auch eine Schätzung der Raumwinkel ermöglichen. Dies ist für die genaue Lokalisierung eines Zielobjektes in dem 3D-Raum erforderlich.



Abbildung 10.12: RoKoRa-Radarsensor mit geöffnetem Gehäuse

Die bei der IMST GmbH entwickelte Prozessorplatine (Backend) stellt die zentrale Komponente des Radarsensors dar und erfüllt folgende Aufgaben:

- Integration eines leistungsfähigen Mikrocontrollers (S32R274 von NXP) sowie seiner peripheren Komponenten (z. B. EEPROM-Speicher)
- Bereitstellung der Stromversorgung für alle Bauteile
- Bereitstellung von Schnittstellen zu dem Sensorknoten bzw. einem Service-Computer (Ethernet und USB)
- Schnelle digitale Schnittstelle zu dem Radar-Frontend
- Schnittstelle zum Programmieren des Mikrocontrollers (JTAG)
- Überwachungs- und Diagnosefunktionen

Abbildung 10.13 zeigt eine bestückte Platine des Radar-Backends. Für den integrierten Mikrocontroller des Sensors (S32R274) wurde eine spezielle Software entwickelt, welche die folgenden Aufgaben übernimmt:

- Ansteuerung und Konfiguration des Radar-Frontends

- Erfassung und Verarbeitung der Messdaten
- Detektion, Lokalisation und Tracking der Zielobjekte
- Bereitstellung der erzeugten Ziellisten an den Sensorknoten.

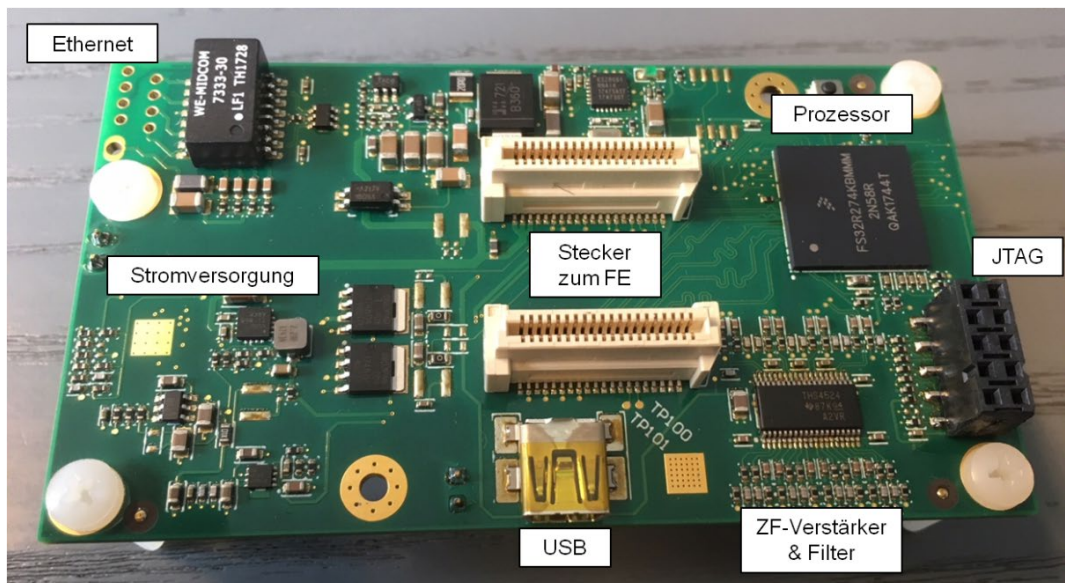


Abbildung 10.13: Bestückte Platine des Radar-Backends

Für die Konfiguration der einzelnen Radarsensoren sowie für die Visualisierung der Messdaten wurde weiterhin das PC-basiertes Konfigurationsprogramm SenTool implementiert, welches einen komfortablen Zugriff auf alle Parameter des Sensors ermöglicht (s.

Abbildung 10.14).

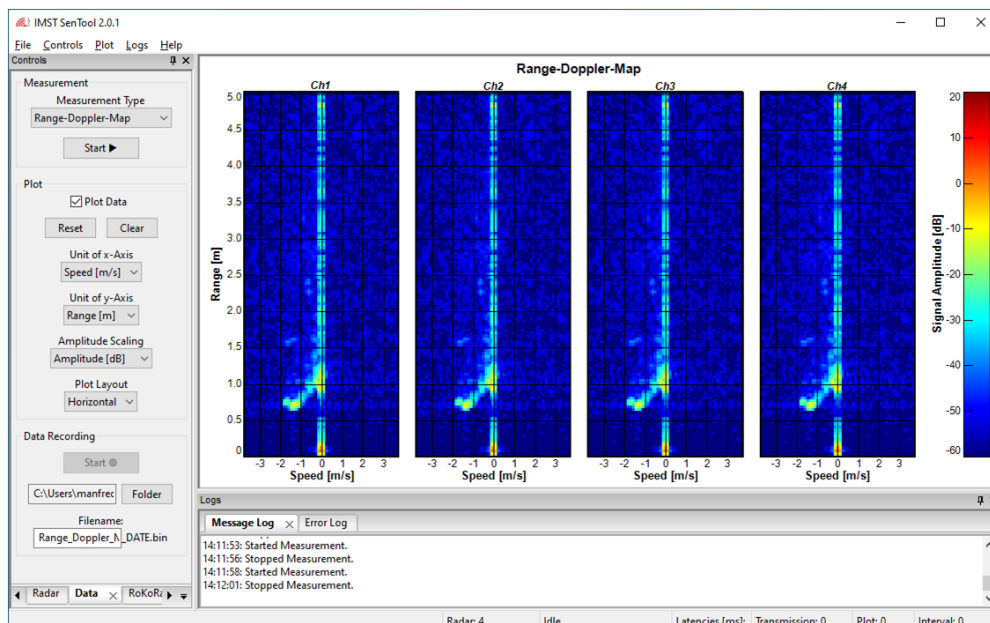


Abbildung 10.14: SenTool zur Konfiguration des Radarsensors sowie zur Visualisierung der Messdaten

In dem regulären Betrieb wird das Programm SenTool jedoch nicht benötigt, weil das Radar über einen Streaming-Modus verfügt, bei dem die Messung automatisiert im

Hintergrund erfolgt und die erzeugten Messdaten automatisch an eine verbundene Gegenstelle (in diesem Fall den Sensorknoten) weitergeleitet werden. Dieser Ansatz verkürzt zusätzlich die Latenzzeiten bei der Radarmessung.

10.4.6 Kollaborativer Arbeitsplatz und Roboter: Betriebssicherheit (Demonstrator)

Für das Forschungsprojekt RoKoRa anwendbare gesetzliche Rechtsquellen zur Gestaltung von Maschinen und zum Betrieb von Arbeitsmitteln mit Einbezug der Anforderungen zur Industrierobotersicherheit und für forschungsspezifische Bedingungen (Forschungszwecke) sowie für einen sicheren sog. „Probetrieb“ sind im Projekt so weit als angemessen zur Umsetzung gekommen. Die für den Demonstrator festgelegte Roboteranlage mit Roboter, Endeffektor (Werkzeug), Werkstück und Applikation kann in der gewählten Kombination des RoKoRa-Sensorrings mit der beim Roboter Fanuc CR-35iA gegebenen und im Projekt den Vorgaben gemäß eingerichteten Schutzmaßnahme „Kraft-/Leistungsbegrenzung“ eingesetzt werden. Vorführungen für Dritte am Demonstrator und ein Probetrieb in einer der Anwendung entsprechenden Betriebsumgebung sind im erreichten Stand nicht vorgesehen. Ein Einsatz des Demonstrators an anderen Standorten (Messen, Ausstellungen, Veranstaltungen) muss mit ergänzenden Aufwendungen für die Sicherheit beim Vorführbetrieb erfolgen.

10.5 Forschungsausblick

Eine solche neue adaptive kontaktlose Sicherheitseinrichtung erreicht es, den hohen Sicherheitsansprüchen zu genügen, die die große Nähe zum Roboter mit sich bringt. So kann die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine intensiviert werden und in viele Bereiche des täglichen Lebens durch Assistenzsysteme Eingang finden.

Aus der Sicht eines Sensorherstellers liefert das Verbundprojekt RoKoRa wertvolle Informationen über die technische Beschaffenheit eines Radars für die hohen Sicherheitsanforderungen der vorgesehenen Anwendung. Dabei müssen zwei Aspekte besonders hervorgehoben werden, ohne die ein solcher Sensor nicht vorstellbar ist:

- Hohe Empfindlichkeit und gute räumliche Auflösung
- Höchste funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit

Insbesondere der zweite Punkt ist ausschlaggebend für die Akzeptanz dieser Sensorik in dem Bereich Mensch-Roboter-Interaktion. Er bedarf weiterer Anstrengungen, von bei der Konzeption eines möglichen Produktes über eine redundante Anordnung der Sensoren bis hin zu einer sicheren Signalverarbeitung.

Für die Demonstration der Gesamtfunktionalität wurde sich zunächst auf ein sehr einfaches Protokoll geeinigt, das Protokoll Buffer (Protobuf). Es wurde zwar mit einigen Sicherheitsmerkmalen erweitert und ein entsprechendes Handschlag-Verfahren implementiert, jedoch für den industriellen Einsatz müssten die Sensoren, Sensorknoten und Auswertungseinheit durchgehend mit einem sicheren Protokoll wie PROFIsafe oder openSAFETY etc. versehen werden.

Die Sensoren sind mit dem Sensorknoten mit Ethernetkabel verbunden. Eine interessante Alternative wäre, diese durch Glasfaser zu ersetzen, da diese biegsamer und flexibler sind. Weiterhin könnte dann mit Hilfe von unterschiedlichen Farb-Laserdioden über ein Kabel bidirektional (eine Farbe für eine Richtung) verwendet werden. Zusätzliche Redundanz kann dann noch geschaffen werden, indem ein zweites Glasfaserkabel genutzt wird und dieselbe Information übertragen wird. Beim Ausfall eines Kanals, kann der andere noch störungsfrei verwendet werden. Ein weiterer Vorteil wäre, dass diese Art der Kommunikation gegenüber EMV Störungen unempfindlich ist (Wacker et al., 2008).

Eine weitere interessante Option wäre, die Kommunikation kabelungebunden, also wireless, auszulegen. Eine Möglichkeit wäre hier, dies mit z. B. Bluetooth (Pendli et al., 2014) auszulegen, welches so erweitert wird, dass es in industriellen Umgebungen sicher und zuverlässig funktioniert. Aber auch eine G5-Kommunikation wäre interessant.

10.6 Implikationen für die Praxis

In den Zukunftsmärkten Servicerobotik, Entertainment und Pflegerobotik sowie auch im Bereich des allgemeinen Maschinenbaus sind weitere Verwertungsmöglichkeiten der Radarsensorik durch die Kombination von Sicherheit, hoher Auflösung, Reaktionsgeschwindigkeit und Anpassungsfähigkeit gegeben.

Weitreichende Verwertungsmöglichkeiten und Markchancen also, da Mensch und leistungsstarke Maschinen damit in allen Bereichen näher und intensiver interagieren können.

10.7 Literaturverzeichnis

DGUV Information 209-074 Industrieroboter: 2015
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/209-074.pdf>

DGUV Information 202-002: Herstellen und Betreiben von Geräten und Anlagen für Forschungszwecke: 2018
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/202-002.pdf>

Pendli P. K., Schwarz M. & Wacker H.D., Börcsök J. (2014). „Wireless Communication Modeling for Safety Related Systems“, North Atlantic University Union (NAUN) Organization, International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, Volume 8, 2014, ISSN: 1998-4464.

Wacker H.-D., Börcsök J. & Hillmer H. (2008). „Redundant optical data transmission using semiconductor lasers“, in IEEE - ACS International Conference on Computer Systems and Applications, Doha, 2008.

11 AuRorA – Interaktive Roboter unterstützen im Smart Home

Arne Rönnau, Jakob Weinland, Marc Schroth, Christoph Zimmermann, Robert Klebbe, Nicole Strutz, Luis Perotti, Michael Maier, Felix Messmer, Benjamin Maidel

Projektpartner: FZI Forschungszentrum Informatik Karlsruhe, Charité – Universitätsmedizin Berlin – Campus Virchow-Klinikum Berlin, Mojin Robotics GmbH, MYESTRO Interactive GmbH

Assoziierte Partner: DRK Pflegedienste Heilbronn gGmbH H&R GbR, Verein der Freunde und Förderer des Hotels Parasol e.V.

11.1 Zusammenfassung des Projekts

Im Gegensatz zu Servicerobotik-Anwendungen in der industriellen Produktion oder Logistik, steht außerhalb dieser Umgebungen der Mensch im Fokus und nicht die Wertschöpfung. Im AuRorA Projekt sollen Roboter den Menschen im Alltag unterstützen und entlasten. Im Fokus der Forschung steht die natürliche, intuitive Interaktion sowie die Fähigkeit des Roboters auch proaktiv den Menschen anzusprechen, Fragen zu stellen und über seine Handlungen vorab zu informieren. Das AuRorA-System lernt während des Dialogs und passt sich so an die individuellen Bedürfnisse und Präferenzen der NutzerInnen an. Dabei setzt der Roboter verfügbare, modulare und gekapselte Fähigkeiten ein. Diese können individuell zusammengeschaltet werden, um auch komplexe Aufgaben wie das Kochen von Spaghetti mit Tomatensoße erlernen zu können. Anhand dieses Szenarios wurde das AuRorA System evaluiert. Das System setzt hierzu auf lernende Behavior-Trees, die aufgrund ihrer Struktur und Modularität sehr gut geeignet sind, auch Teilaufgaben zu modellieren. Um die Roboter- und Umgebungsunabhängigkeit zu demonstrieren, wurden in einem zweiten Szenario Aufgaben für einen mobilen Roboter in dem Empfangsbereich eines Hotels umgesetzt.

Ausgangspunkt für die technische Konzeption sowie die Gestaltung der Evaluationsszenarien bildete eine nutzentrierte Studie zur Erhebung der Anforderungen und Bedarfe älterer Menschen an die Unterstützung durch Robotik in ihrem Alltag. Die Studie wurde unter Einhaltung der erforderlichen Ethik- und Datenschutzbestimmungen durchgeführt, darüber hinaus wurde im weiteren Projektverlauf ein besonderes Augenmerk auf die Personensicherheit gelegt. Eine frühe Umsetzung von Minimal-Szenarien und regelmäßige Integrationstreffen sorgten für eine effektive Zusammenarbeit der Partner. Das bestehende Smart Home am House of Living Labs des Forschungszentrums Informatik wurde um eine bedarfsgerecht konzeptionierte Küchenzeile erweitert und mit neuen Funktionalitäten wie z. B. dem motorisierten Öffnen von Schubladen, Deckenkameras zur 3D-Erfassung des gesamten Raums ausgestattet und in das Gesamtsystem integriert. Weiterhin wurde ein Care-o-bot 4 um zusätzliche Navigationsfähigkeiten erweitert. An verschiedenen Stellen erfasste das AuRorA System nicht nur die Vitalparameter (Puls- und Blinzelfrequenz) und den emotionalen Zustand, sondern daraus abgeleitet auch die Müdigkeit als Ausdruck der Belastung des Nutzers aufgrund der Einschränkungen und

Auflagen für die Präsenzforschung im Zusammenhang der Covid-19-Situation, konnten die entwickelten Systeme nicht innerhalb der geplanten Einsatzsettings sowie mit der anvisierten Zielgruppe evaluiert werden. Die abschließende Evaluation des entwickelten Systems im Kochszenario wird daher auf Basis einer Online Umfrage mit umfangreichem Videomaterial mit der Zielgruppe durchgeführt. Das Hotelszenario konnte aufgrund der Entwicklung eben jener Covid-19-Situation im Projektverlauf nicht endevaluiert werden. Das Interaktionsverhalten, der Funktionsumfang und die Fähigkeiten des Gesamtsystems im Küchenszenario beeindrucken nicht nur, sondern stellen auch einen echten Mehrwert dar. Die Methoden und Ergebnisse werden einen Beitrag dazu leisten bedarfsgerechte, anpassungsfähige Serviceroboter erfolgreich in alltäglichen Szenarien zu etablieren.

11.2 Hintergrund

Die Entwicklungen in AuRorA setzen dabei auf wichtigen Vorarbeiten und Erfahrungen der Fachliteratur auf. Nationale wie internationale Projekte wie z. B. Accompany (Projekt A. E., 2017) oder Companiable (Projekt C. E., 2017) konnten bereits die Vorteile von sozialen Serviceroboter im Smart Home aufzeigen. Solche mobilen Robotersysteme bieten den Vorteil, nicht den Eindruck einer permanenten Überwachung vermitteln, gleichzeitig aber wesentliche Informationen für die physische Interaktion mit der Umgebung zu liefern. So sehen Park et al. (K. H. Park, 2008) ihren Roboter als personalisierte Schnittstelle mit einer Lernfähigkeit sowie Ausdrucksfähigkeit, die einen benutzerfreundlichen Umgang mit dem abstrakten Smart Home ermöglichen. Lernfähige, teilweise mobile Serviceroboter, die mit einem Spracherkennungssystem ausgestattet sind, stehen vermehrt im Fokus der Entwicklung (z. B. Jibo (Jibo, 2017), Kuri (Kuri, 2017), Olly (Olly, 2017) und Aido (Aido, 2017)). Die Systeme aus (Jibo, 2017), (Kuri, 2017) und (Aido, 2017) können mit ihren eingebauten Kameras Menschen anhand von Gesichtern erkennen und verbessern so die Interaktion. WiMi-Care (IPA, 2017) untersuchte den Bedarf und die Möglichkeiten Pflegekräfte von wiederkehrenden Routineaufgaben, die nicht direkt die Pflege am Menschen betreffen, durch Robotik zu entlasten. Die technische Entwicklung kann dabei gut am Care-O-Bot verfolgt werden (B. Graf, 2009). Neben dem flexiblen Robotern wie Care-O-bot existieren spezialisierte Roboter wie z. B. MoBiNa (MobiNa – Mobiler Notfallassistent, 2017). Dieser mobile Roboter erkennt einen Sturz und stellt in Ernstfall den audiovisuellen Kontakt mit einer Notfallzentrale her. Um den Fortschritt in der mobilen Manipulation, aber auch Interaktion voranzutreiben, werden seit 2006 die Wettbewerbe RoboCup@Home (Wisspeintner, 2009) (RoboCup@Home, 2017) ausgetragen. Hier müssen sich Roboter wie Dynamaid (Behnke, 2009) in komplexen Szenarien beweisen, die Jahr für Jahr schwieriger werden. Mittlerweile gibt es auch erste kommerzielle Serviceroboter für die eigene Wohnung wie z. B. Buddy (ROBOTIC, 2016).

Für Laien ist es kaum noch möglich über die komplexen Schnittstellen der Entwickler und Forscher mit einem Roboter zu kommunizieren. Die Blickrichtungserkennung ist eine Alternative, die die Blickbewegungen aufzeichnet und intuitive in Eingaben umwandelt (Babcock, 2006) (Wang, Maeda, & Takahashi, 2012). Die Sprache ist eine sehr natürliche Interaktionsmöglichkeit. Siri von Apple ist mittlerweile eins der bekanntesten und erfolgreichsten Spracheingabesysteme weltweit (Inc. A., 2020). Andere Systeme lassen sich auch ohne Cloudanbindung direkt in einen Roboter integrieren (Ireland, 2019). Es gibt zahlreiche Beispiele für sprachgesteuerte

Robotersysteme. Pillo verwaltet z. B. Medikamente und beantwortet Fragen zu Gesundheitsthemen (Pillo, Your Personal Home Robot, 2017). Erste erfolgreiche Anwendungen von Servicerobotern in Museen, Elektronikhandel und Baumärkten zeigen das große Potential dieser Technologie (S. Thrun et al., 2009), (Pöschl, 2009). Bisher sind Sprachsteuerung jedoch noch sehr auf eine konkrete Aufgabe oder Anwendungen angepasst (Maas, 2007). Neben der Spracherkennung ist auch das Dialogsystem essentiell für die Interaktion. Wichtige bekannte Dialogsysteme sind "Speech Acts", "Four-Sides Model", "The Cooperative Principle", "The Politeness Principle" und "Politeness Theory" (Berg, 2014). Diese sind häufig so aufgebaut, dass sie nicht selbstständig dazu lernen. Semantische Ansätze zur Beschreibung von z. B. räumlichen Zusammenhängen können die Dialogfähigkeit von Robotern verbessern (Skubic, 2004). Solche Dialogsysteme werden auch bereits im Smart Home Kontext für Aufgaben wie das Kochen prototypisch eingesetzt (Alexandersson, 2015).

Bei den bildgebenden Verfahren wird zwischen der Erfassung von Einzelbildern und der von bewegten Bildern, also Videomaterial, unterschieden. In der Robotik werden normalerweise Videobilder eingesetzt (Chiriac, 2016). Zudem spielen 3D-Daten eine wichtige Rolle, da diese als Basis für komplexe Planungsalgorithmen genutzt werden können (Cousins, 2011) (Elfes, 1989). Mayer (Mayer, 2011) präsentiert einen Ansatz, in welchem Kameras zur Gesichtserkennung zum Einsatz kommen. Darüber hinaus stellen Miura et al. (Miura, Yihao, Kuchii, & Sern, 2015) ein System vor, welches Gesichts- und Spracherkennung kombiniert, um menschliche Intentionen und Emotionen zu erkennen. Weitere Beispiele zur Bestimmung der Aktivität und des Zustandes finden sich in (Dogangün, Naroska, & Stockmanns, 2010) und dem Ami-CustomCare Projekt (Bieber, Staupe, Fernholz, & Grelck, 2010), in denen ein Monitoring mittels nichtsichtbarer Sensorik durchgeführt wird. INSIDE-DEM (S. Bader, 2016) zielt auf die Anpassung von „Innovative demenzorientierte Assessmentsysteme“ für den Kreis der pflegenden Angehörigen ab. Dabei soll sowohl die Erfassung von Informationen als auch die Selektion geeigneter Interventionsmaßnahmen vereinfacht und wenn möglich automatisiert werden.

Das FZI konnte in die Entwicklungen im Rahmen des Projektes zahlreiche Vorarbeiten aus erfolgreichen Forschungsprojekten einbringen. In Projekten wie KolRob (fzi.de/de/forschung/projekt-details/kolrob/, 2020), HORSE (horse-project.eu, 2020), ISABEL (projekt-isabel.de, 2020) oder EuRoC (youtube.com/user/FZIchannel, 2020) wurden zwar industrielle Handhabungsaufgaben adressiert, dennoch wurde in diesen Projekten die Expertise und Software-Basis für schwierige Manipulationsaufgaben aufgebaut. Expertise im Bereich Mensch-Technik Interaktion im Smart Home, aber auch anderen Szenarien wurden erfolgreich in den Projekten TrinkTracker (trinktracker.de/, 2020), OptimAAL (www.fzi.de/forschung/projekte, 2020), easyCare (projekt-easycare.de, 2020), PflegeCoDe (pflegecode.de, 2020) und EmAsIn (emasin-projekt.de, 2020) weiter ausgebaut. Des Weiteren haben sich Projekte wie DEXMART (dexmart.eu, 2020) bereits mit dem Lernen durch Programmieren und Vormachen befasst und bilden die Grundlage für die neuartigen, lernenden Ansätze in AuRorA. Im ROBINA Projekt unterstützt ein Robotersystem ALS Patienten länger selbstbestimmt mit der Umwelt interagieren zu können. Hierbei stand vor allem die Usability und Flexibilität des Gesamtsystems im Fokus. Das FZI kann in AuRorA auf eine umfangreiche Bibliothek an Roboterfähigkeiten zurückgreifen. Allen voran die die FZI Motion Pipeline, GPU Voxels sowie verschiedene Systeme zur Ablaufsteuerung. Auf dieser Basis konnte das FZI auch in kürzester Zeit Anwendungen wie den BratWurst

beeinflusst. In der Abbildung 11.1 ist ein Auszug des Anforderungsdokuments dargestellt. Weiterhin wurden zu Projektbeginn ebenso ELSI-Anforderungen an die Konzeption und Entwicklung eines robotischen Systems zur Unterstützung älterer Menschen im Rahmen eines Experten-Workshops ermittelt. Die Ergebnisse des Workshops wurden unter Zuhilfenahme weiterführender Literatur zu einem Ethikkonzept zusammengefasst. Auf der Grundlage dieser Vorarbeiten haben die technischen Partner in einem iterativen Prozess eine Gesamtsystemarchitektur entwickelt. Links in der Abbildung 11.2 sind die drei Ebenen des „Prozessmanagements“, der „Prozessausführung“ sowie „Taskausführung“ zu erkennen. Ebenso sind die „Datenbank“, das „Lernende Element“ sowie die Abhängigkeiten zu den anderen Komponenten dargestellt. Für die effiziente, gemeinsame Entwicklung eines komplexen Gesamtsystems verteilt über mehrere Partner, war diese initiale Abstimmung entscheidend. Zwar sind in der späteren Implementierung zusätzliche Abhängigkeiten entstanden und Komponenten wurden

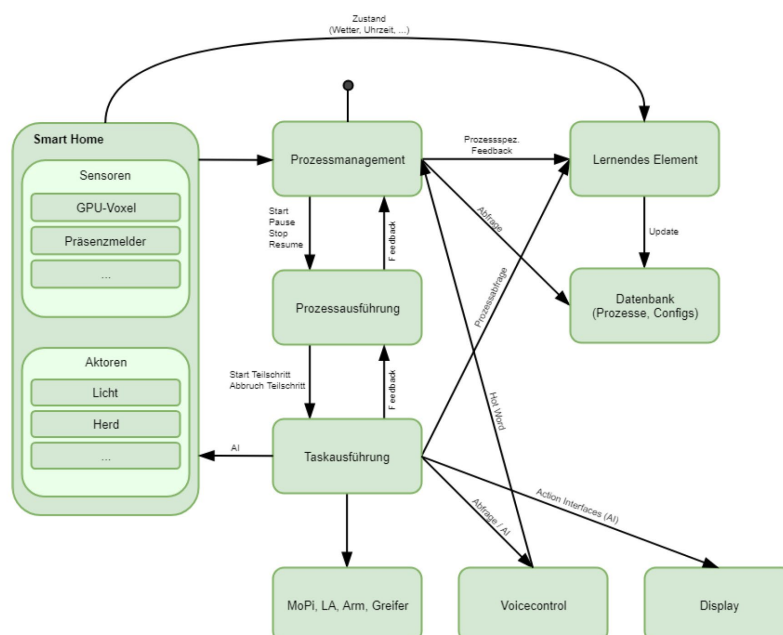


Abbildung 11.2: (links) AuRorA-Systemarchitektur

auch z.T. zusammengelegt. Dennoch hat die strukturierte Entwicklung anhand der definierten Architektur die Effizienz und Qualität der Arbeiten erhöht.

Außerdem war die gezeigte Systemarchitektur Basis für die Diskussion und Abstimmung der Schnittstellen. Bereits sehr früh wurde auf die spätere Integrierbarkeit aller Komponenten geachtet. Da alle technischen Partner bereits intensiv das ROS Framework einsetzen, wurden sämtliche Schnittstellen in ROS definiert. Um die Modularität zu unterstützen wurden typische ROS-Interfaces und Datentypen wie z.B. die PointCloud2 (sensor_msgs/PointCloud2.msg) für 3D-Daten verwendet. Die Systemarchitektur konnte dann zusammen mit den definierten Schnittstellen von der Charité verwendet werden, um für beide Szenarien jeweils ein initiales Datenflussmodell zu entwickeln, das dann iterativ im Konsortium mit den Szenarien weiterentwickelt wurde (Abbildung 11.3 für das Hotelszenario).

Um ein gemeinsames Verständnis der zwei geplanten Szenarien (gemeinsames Kochen in einer Smart Home Umgebung und Unterstützung der Rezeption in einem Pflegehotel) im gesamten AuRorA-Team zu erreichen, wurden kurze User-Stories entwickelt. Diese beschreiben mit einem umgangssprachlichen Fließtext die Aufgaben und Funktionen des Gesamtsystems aus Sicht eines idealtypischen Nutzers.

Aus den beiden User-Stories wurden im weiteren Projektverlauf die sogenannten Minimal-Szenarien entwickelt. Diese enthalten bereits einfache Dialogelemente sowie erforderliche Roboterfähigkeiten. Die Darstellung in einer Art Flussdiagramm erlaubt es einerseits den chronologischen Ablauf zu erkennen und andererseits Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Schritten aufzudecken. In der Abbildung 11.3 sind diese Elemente für das Hotelrezeptionsszenario dargestellt.

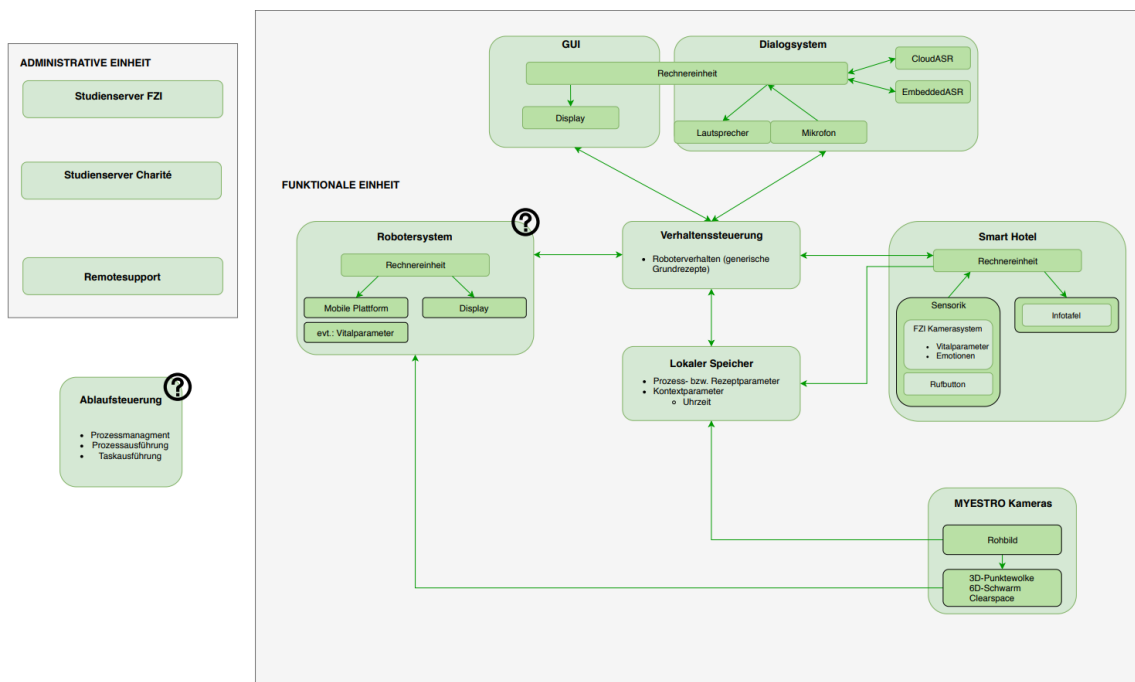


Abbildung 11.3: Datenflussdiagramm für das Hotelszenario

Das Thema Datenschutz wurde bereits bei der initialen Entwicklung der Systemarchitektur, der Definition der Schnittstellen sowie bei der Ausgestaltung der Minimal-Beispiele berücksichtigt. Aus diesen Diskussionen wurde ein abgestimmtes Datenschutzkonzept entwickelt, das auch später als Basis für das Ethikvotum diente. Darüber hinaus wurde eine Risikoanalyse für die Szenarien nach ISO 14121-2 durchgeführt und Maßnahmen ergriffen, um ein potentiell Risiko der MRI entsprechend zu reduzieren.

Zur Projekthalbzeit konnten die beiden Minimal-Szenarien erfolgreich implementiert und integriert werden. Ziel war es alle wichtigen Funktionen und Technologien in einer Grundform in den Szenarien zu nutzen, um frühzeitig Schwierigkeiten bei dem Zusammenspiel der Komponenten zu erkennen. Das Minimal-Szenario Kochen wurde im Smart Home des FZI umgesetzt. In dieser noch relativ frühen Projektphase gab es bereits ein funktionierendes Dialog-System, ein Robotersystem das Objekte erkannt und gegriffen hat, Kamerasysteme zur Vitalwerterfassung sowie 3D Kamerasystem zur Erfassung des gemeinsamen Arbeitsraums.

Das Hotel-Empfangsszenario wurde mit dem mobilen Roboter Paul der Firma Mojin Robotics in einem Hotel in Villingen-Schwenningen getestet, da das Hotel Parasol zu diesem Zeitpunkt noch nicht fertiggestellt war. Einen Eindruck zum Entwicklungsstand der beiden Minimal-Szenarien geben Abbildung 11.4 und Abbildung 11.6.

Nach diesen ersten erfolgreichen und vielversprechenden Praxis-Tests wurde am FZI ein modulares Küchensystem mit Linearachse aufgebaut, welches in einem realen Einsatzsetting am DRK evaluiert werden sollte.

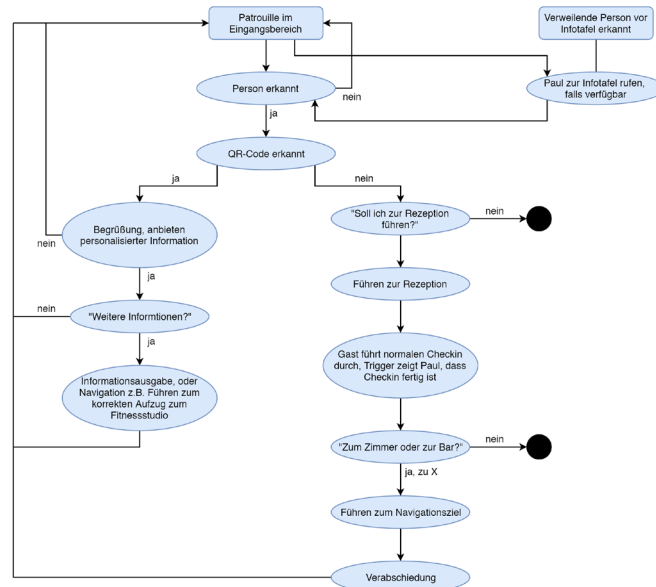


Abbildung 11.4: Minimal-Beispiel Hotelrezeption

Die weiteren Entwicklungen wurden beispielhaft anhand der zwei Szenarien iterativ vorangetrieben. Dabei wurde das Dialogsystem und die Behavior-Trees um lernende Knoten erweitert, die Personen und Frei-Raum Erkennung der 3D-Kameras verbessert, das Navigationsverhalten von Paul angepasst und eine Zwischentestung des Dialogsystems durchgeführt. Die nonverbale Intentionserkennung von Personen

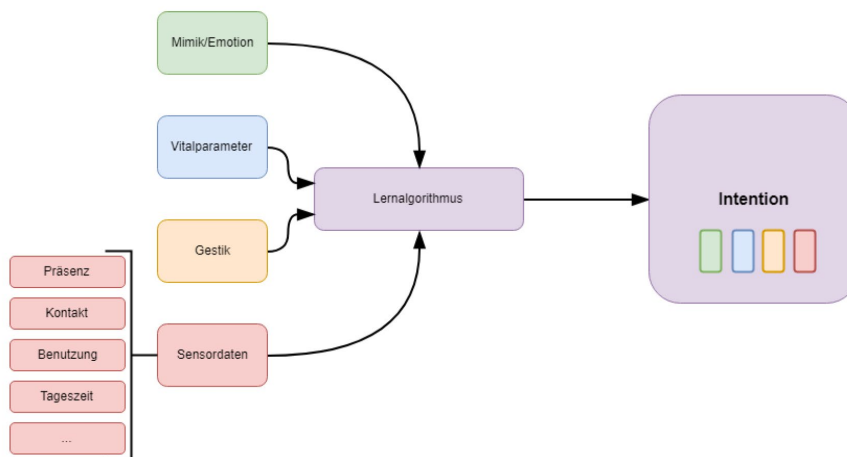


Abbildung 11.5: Intentionserkennung mittels Fusion

wurde durch die Fusion von Mimik/Emotionsdaten, Vitalparametern, Gestik und Smart Home-Sensordaten präziser und robuster und es gelang, durch Abstraktion der Daten auf die Müdigkeit des Probanden zu schließen. In einem weiteren Advisory Board Meeting wurden in Vorbereitung der Endevaluation ELS-Implikationen, insbesondere bezogen auf den Datenschutz, in Expertenrunde diskutiert. Das AuRorA-Projektteam wurde von Datenschutzexperten aus Forschung und Wirtschaft sowie von einer Ethikexpertin zu weiterem Vorgehen beraten. Die Covid-19- Situation sowie die damit verbundenen Einschränkungen für die Präsenzforschung und Arbeit der Projektpartner, haben besonders die Finalisierung der hardwarenahen Arbeiten verzögert sowie die Evaluation im realen Einsatzsetting mit der Zielgruppe, bestehend aus Covid-19-Risikogruppen, unmöglich gemacht. Die Evaluation des Küchenszenarios konnte jedoch in einer videobasierten Online-Studie umgesetzt werden. Umfangreiches Videomaterial zeigt wie das AuRorA-System mit einem FZI Kollegen interagiert, sich dadurch an den Menschen anpasst und beim Kochen von Spaghetti mit Tomatensauce unterstützt.

11.4 Ergebnisse

Die ersten Versuche und Testungen lassen deutlich erkennen, dass die verbale Interaktion die zentrale und entscheidende Schnittstelle zwischen dem Menschen und der Technik ist. Über diese Interaktion entscheidet sich zum einen die Akzeptanz für ein Robotersystem, aber auch die Effizienz der Aufgabenerfüllung. AuRorA lernt durch die Interaktion mit dem Nutzer und passt entsprechend die Dialoge an, so dass im Dialog ein situations- und personenabhängig unterschiedliches Verhalten des Roboters entsteht. Dieser lernende Charakter dient als Grundlage für eine natürliche, intuitive Interaktion mit dem Robotersystem. Die Anpassungsfähigkeit des AuRorA-Systems wurde anhand der zwei sehr unterschiedlichen Szenarien demonstriert. Obwohl in dem Projekt keine Entwicklungen oder Innovationen im Bereich der Roboter-Fähigkeiten entstanden sind, konnte dennoch ein sehr innovatives Gesamtsystem aufgebaut werden, welches hinsichtlich der Flexibilität, Lernfähigkeit und Interaktionskonzepte weit über den bisherigen Stand der Technik hinausgeht.



Abbildung 11.6: Der Care-o-Bot in der Lobby des Hotels

Das AuRorA-Hotelszenario findet hauptsächlich im Empfangsbereich eines Hotels statt und zeichnet sich dadurch aus, dass es sehr viele, unterschiedliche Interaktionspartner gibt, die für relativ kurze Zeit mit dem System in Kontakt treten. Das System kann sich somit nicht auf eine einzelne Person einstellen, sondern muss sich an allgemeine Präferenzen der Hotelgäste anpassen. Bei den ersten Versuchen in der realen Hotelumgebung hatte sich gezeigt, dass die Navigation auch in einer solchen dynamischen Umgebung sehr gut funktioniert. Das Dialogsystem erzielte ebenfalls gute Ergebnisse trotz der Umgebungsgeräusche und Paul konnte sich über ein großes Interesse der Gäste und des Hotelpersonals freuen. Die Komponenten aller Partner arbeiteten insofern gut zusammen und die Behavior-Trees haben sich durch ihre modulare, rekursive Struktur als effektiv zur Modellierung der benötigten Fähigkeiten erwiesen. Die finale Evaluation bzw. Testungen konnten aufgrund der Covid-19-Situation nicht wie geplant im realen Hotel durchgeführt werden.



Abbildung 11.7: Der Roboterarm montiert auf einer Linearachse. Der LED- Streifen visualisiert den Fahrweg des Roboters

Im Küchenszenario findet im Gegensatz zum Hotel eine längere Interaktion mit nur einem Menschen statt. Das System ist zunächst nicht angelernt. Durch den fragenden, proaktiven Charakter passt es sich jedoch schnell an die Präferenzen des Nutzers an und erlernt während des gemeinsamen Kochens individuelle Vorlieben. Die Mensch-Roboter-Kollaboration basiert auf einem Ansatz des verteilten Handelns im Soziotechnischen, so dass der Mensch auch Aufgaben übernehmen muss. Insgesamt leitet jedoch der Roboter durch den Kochvorgang und kann an vielen Stellen unterstützen. Die Erweiterung der Küche um die Linearachse erlaubt es dem robotischen Leichtbauarm den gesamten Arbeitsraum zu nutzen. Die synchrone Bewegung der Linearachse zusammen mit dem Roboter sowie der visuellen Anzeige der Bewegungen durch einen LED-Streifen ist eine sehr innovative Integration von Serviceroboter-Technologie in eine Smart Home-Umgebung. Darüber hinaus wurde die Küche um ansteuerbare Schubladen und Gewürzmühlen erweitert. Jeweils 3 Kameras zur linken und rechten Seite an der Decke der Küche wurden zu einem Stereo System verbunden. Insgesamt 6 Kameras erfassen so den ganzen gemeinsamen Arbeitsraum in 3D (siehe links in Abbildung 11.8).

Zur Erkennung der Objekte auf der Küchenoberfläche wurde eine leistungsstarke KI-Komponente (Mask R-CNN nach (Kaiming, Gkioxari, Dollar, & Girshick, 2017)) in das AuRorA System integriert. Das Netzwerk detektiert und segmentiert antrainierte Objekte zuverlässig. Die Pixelkoordinaten der konvexen Detektionen werden mit Hilfe einer geordneten Punktwolke in das Roboter Koordinatensystem projiziert. Da das System ausschließlich Objekte auf der Küchenzeile manipulieren soll, wurden die objektspezifischen Punktwolken noch einmal auf eine Ebene (Küchenebene) projiziert. Um Töpfe, Dosen und weitere zylinderförmige Objekte greifen zu können, wurden die Mittelpunkte der Objekte mithilfe eines Circlefits berechnet. Um den Greifpunkt länglicher Objekte, wie beispielsweise, des Kochlöffels zu bestimmen, wurden die dem Objekt zugehörigen Punkte mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse die Hauptachsen des Löffels bestimmt.

Durch Subtraktion der 3D-Punkte, welche zum Roboter gehören, verbleiben nur noch Daten in der Szene, welche nicht zum robotischen System gehören und somit potentielle Hindernisse für den Roboter darstellen. Werden diese verbleibenden Punkte von der Bilderkennung nicht als Küchenobjekte erkannt, versucht das System über einen Online-Planer eine Kollision zu vermeiden. Somit weicht der Roboter auch Objekten wie Küchenkräutern oder dem Nutzer dynamisch aus.

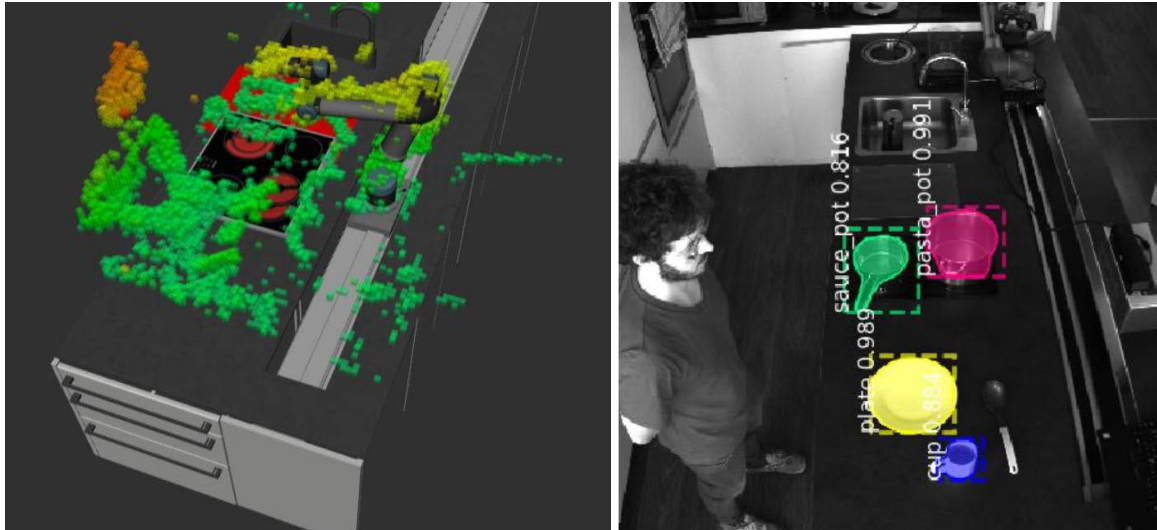


Abbildung 11.8: (links) Voxelierte Darstellung der Roboter-Umgebung zur Kollisionsvermeidung, (rechts) Objekterkennung auf Küchenzeile mittels KI-Verfahren (Mask R-CNN).

Die Müdigkeitserkennung mittels einer KI-Methode auf Basis der Herzratenvariabilität, funktioniert prinzipiell. Diese nonverbale Information kann der Roboter nutzen um zu entscheiden, wann er eine Aufgabe des Menschen übernehmen soll. Ziel von AuRorA war es nicht alle Aufgaben zu übernehmen, sondern gezielt zu unterstützen, so dass die Nutzer auch im Alter aktiv bleiben oder wenn möglich sogar aktiviert werden. Das angelegte System zeigt ein angepasstes Interaktionsverhalten und verdeutlicht den Mehrwert und die Flexibilität. Aufgrund der Covid-19-Situation hat sich das Ethikvotum für die realen Testungen beim DRK verzögert. Zur Sicherheit wurde auf die realen Versuche vor Ort mit der Hoch-Risikogruppe verzichtet. Die Akzeptanz des Gesamtsystems wird aktuell anhand einer videobasierten Online-Studie mit der Zielgruppe evaluiert. Die Ergebnisse dieser Studie liegen noch nicht vor, werden aber nach Abschluss veröffentlicht.

11.5 Forschungsausblick

Das Kochen eines Gerichts wie Spaghetti mit Tomatensauce zeigt anschaulich die kombinatorische Herausforderung von realen Robotikanwendungen. Nicht nur die Zutaten für die Sauce können stark variieren, auch die Reihenfolgen und Mengenangaben erhöhen die Dimensionalität. Nimmt man die sprachliche Vielfalt hinzu, mit der eine solche Aufgabe beschrieben werden kann, wird die Herausforderung für die Interaktionsforschung deutlich: wie kann ein Roboter alle Möglichkeiten verstehen oder auch die persönlichen Vorlieben überhaupt erlernen?

Die im Rahmen von AuRorA entwickelten lernenden Behavior-Trees können für solche Aufgaben verwendet werden und haben den Vorteil, dass sie bereits sehr modular

aufgebaut sind. Damit verbunden ermöglichen sie eine Wiederverwendung im Rahmen weiterer Aufgaben und Entscheidungskombinationen.

Für weitere Arbeiten mit dem System, könnte die allgemeine Robustheit des Demonstrators erhöht, sowie die Flexibilität und Adaptivität, durch Erkennen weiterer Zustände und Nutzerintentionen gesteigert werden. Hierfür könnten z. B. neue, noch effektivere Lernstrategien für die neu entwickelten, lernenden Behavior-Trees entwickelt werden. Momentan noch vom Entwickler vordefinierte Roboterverhalten, könnten durch eine dynamische, on demand Erstellung neuer Behavior-Trees durch den Nutzer selbst übernommen werden. Dieser könnte so im Nachhinein das System weiter auf die eigenen Bedürfnisse anpassen. Semantik wurde in der aktuellen Implementierung unter anderem in einen auf ROS basierenden Object-Tracker ausgelagert, könnte jedoch zukünftig auch nativ in die Behavior-Trees übernommen werden.

Um eine robustere und sicherere Manipulation der Küchenobjekte sicherzustellen, könnte außerdem die Objekterkennung im 3D-Raum optimiert, und um eine präzise 6D-Posen-Erkennung erweitert werden. Dadurch könnte sichergestellt werden, dass die bestmöglichen Greifpositionen angefahren werden, und somit eine sichere Handhabung auch komplexerer Objekte sichergestellt ist. Basis für diese Objekterkennung könnte in einer Weiterentwicklung des Stereo-Systems an der Decke bestehen. Durch den Einsatz von weiteren Kamerasystemen und der Steigerung der Auflösungsrate wären hier vermutlich weitere Leistungssteigerungen möglich.

Eine grundlegende Schwäche des Systems ist die Manipulation von Küchenobjekten mit nur einem Arm. Übt der Roboterarm Kräfte auf ein auf der Küchenzeile befindliches Objekt aus, so kann dieses bei zu geringem Anpressdruck auf der Oberfläche verrutschen. Dieses Problem tritt vor allem beim Umrühren in Töpfen auf. Zukünftig könnte das AuRorA System um einen weiteren Arm ergänzt werden, welcher die entstehenden Kräfte aufnimmt.

Die Potentiale durch die umfangreiche, multimodale Sensorik im Smart Home wurden ebenfalls nicht voll ausgeschöpft. Durch eine stärkere Verzahnung der verteilten Sensorik könnten die Fähigkeiten des Systems weiter gesteigert werden. Zudem wäre es möglich die Robustheit der Müdigkeitserkennung durch eine Optimierung der Algorithmen mit höheren Nutzerzahlen zu verbessern (Durch die Covid-19 Pandemie und der damit einhergehenden Kontaktbeschränkung wurde das notwendige Anlernen des Systems stark erschwert). Denkbar wäre in diesem Zusammenhang auch eine Stress-Level-Erfassung mit einer KI über die Herzrate/Blinzelrate. Dies wäre jedoch ein weiterführendes Forschungsdesiderat für zukünftige Projekte im Bereich MTI.

Spannend wäre ebenfalls, die Entwicklung einer Metrik für die Akzeptanz von Servicerobotik, die von den Interaktionsformen abhängt. Dadurch wäre es möglich beim Interaktionsdesign bereits die Bedürfnisse des Menschen zu erfassen und in den Entwicklungsprozess einfließen lassen zu können.

11.6 Implikationen für die Praxis

Das AuRorA-Projekt konnte erfolgreich zeigen, dass Serviceroboter auch in natürlichen Umgebungen bei alltäglichen Aufgaben den Menschen unterstützen und entlasten können. Das AuRorA-System wiederholt dabei nicht ständig die gleichen

Fragen oder Dialogstücke, sondern lernt und passt sich an den Menschen individuell an. Die Ergebnisse und Methoden werden dazu beitragen, dass Serviceroboter in Zukunft vermehrt im öffentlichen Raum, der Pflege oder auch im häuslichen Umfeld eingesetzt werden. Die Studienergebnisse der Testungen können auch für andere Projekte und Anwendungen als Leitfaden z. B. in der Pflege dienen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Interaktion mit dem Robotersystem eine kritische Hürde ist, die dringend auf Grundlage weiterführender Forschung überwunden werden muss. Das natürliche Dialogsystem hat sich hierbei als sehr wichtig erwiesen.



Abbildung 11.9: Ein Proband wird beim Kochen vom System unterstützt

Die AuRorA-Ergebnisse aber auch das methodische Vorgehen können Pflegeeinrichtungen und Firmen dabei unterstützen Serviceroboter in reale Anwendungen zu bringen. Für diesen Einsatz ergeben sich jedoch auch noch einige Herausforderungen, die nicht im Rahmen des Projektes geklärt werden konnten. Zum Beispiel die Sicherheitstechnik im Küchenszenario müsste vor einer Vermarktung noch erweitert werden. Zudem müssten kritische Haftungsfragen, aber auch zuständige Normen und Richtlinien geklärt werden. Industrielle Maschinenrichtlinien aus der Produktion erscheinen für den öffentlichen Raum oder das private, häusliche Umfeld ungeeignet. Aus technisch-wissenschaftlicher Sicht müsste das AuRorA-System noch hinsichtlich der intuitiven Erweiterbarkeit verbessert werden. Ohne einen Experten ist das Erstellen grundlegend neuer Roboterfähigkeiten und Bewegungen noch zu zeitaufwändig. Das AuRorA-System ist ein beeindruckender Demonstrator, jedoch noch kein Produkt, so dass hier auch noch Fragen der Wartung, Einrichtung und Inbetriebnahme, vielleicht von einem zukünftigen Start-Up, geklärt werden müssen.

11.7 Literaturverzeichnis

- Aido*. (2017). Abgerufen am 17. 01 2017 von <http://www.aidorobot.com/>
- al., E. J.-R. (2012). Head movements based control of an intelligent wheelchair in an indoor environment. *IEEE International - Conferende on Robotics and Biomimetics*, S. 1464 - 1469.
- Alexandersson, J. e. (2015). Kochbot in the Intelligent Kitchen–Speech-enabled Assistance and Cooking Control in a Smart Home. *AAL-Kongress 2015*. VDE VERLAG GmbH.
- B. Graf, U. R. (2009). Robotic home assistant Care-O-bot® 3 - product vision and innovation platform. *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*. Tokyo.
- Babcock, J. (2006). *Close-up of the headgear parts showing how it es adjusted to get the best eye image*. Abgerufen am 4. April 2016 von <http://www.jasonbabcock.com/>
- Behnke, J. S. (2009). Integrating indoor mobility, object manipulation, and intuitive interaction for domestic service tasks. *9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, S. 506 - 513.
- Berg, M. M. (2014). *Modelling of Natural Dialogues in the Context of Speech-based Information and Control Systems*. Kiel.
- Bieber, G., Staupe, S., Fernholz, N., & Grelck, O. (2010). Ambiente Umgebungen und mobile Aktivitätserkennung als neue Kommunikationsgrundlage. *Ambient Assisted Living - AAL - 3. Deutscher AAL-Kongress mit Ausstellung - Assistenzsysteme im Dienste des Menschen: zuhause und unterwegs*. Berlin.
- Chiriac, S. (2016). *Ambiente Sensorsysteme für die ambulante Pflege - Gesundheitsmonitoring und Notfallerkennung*. Karlsruhe.
- Cousins, R. B. (2011). 3D is here: Point Cloud Library (PCL). *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1 - 4.
- dexmart.eu*. (2020). Von <http://www.dexmart.eu/> abgerufen
- Dogangün, A., Naroska, E., & Stockmanns, G. (2010). Ambiente Awareness-Assistenten im Pflegeumfeld. *Ambient Assisted Living - AAL - 3. Deutscher AAL-Kongress mit Ausstellung - Assistenzsysteme im Dienste des Menschen: zuhause und unterwegs*. Berlin.
- Elfes, A. (1989). Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. *Computer* 22.6 , 46 - 57.
- emasin-projekt.de*. (2020). Von <https://emasin-projekt.de/> abgerufen
- fzi.de/de/forschung/projekt-details/kolrob/*. (2020). Von <https://www.fzi.de/de/forschung/projekt-details/kolrob/> abgerufen
- Girshick, K. H. (20. 3 2017).
- Girshick, K. H. (3. March 2017). Mask R-CNN.
- horse-project.eu*. (2020). Von <http://www.horse-project.eu/> abgerufen
- Inc., A. (2020). *Siri*. Abgerufen am 27. April 2016 von <https://www.apple.com/de/siri/>

- Inc., M. (kein Datum). *Mind Flex*. Abgerufen am 27. April 2016 von <http://www.mindflexspiele.de/was-ist-mindflex.php>
- IPA, F. (2017). *WiMi-Care – Förderung des Wissenstransfers für eine aktive Mitgestaltung des Pflegesektors durch Mikrosystemtechnik*. Abgerufen am 10. August 2016 von <http://www.ipa.fraunhofer.de/wimi-care.html>
- Ireland, N. C. (2019). *Nuance*. Abgerufen am 10. August 2016 von <http://www.nuance.de/for-individuals/by-solution/speech-recognition/index.htm>
- Jibo*. (2017). Abgerufen am 17. 01 2017 von <https://www.jibo.com/>
- K. H. Park, H. E. (Jan. 2008). A Steward Robot for Human-Friendly Human-Machine Interaction in a Smart House Environment. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 5, no. 1, S. 21 - 25.
- Kittmann, R. F. (2015). Let me Introduce Myself: I am Care-O-bot 4, a Gentleman Robot. *Mensch und Computer 2015 – Proceedings*. Berlin.
- Kuri*. (2017). Abgerufen am 17. 01 2017 von <https://www.heykuri.com/>
- Maas, J. F. (2007). *Dynamische Themenerkennung in situierter Mensch-Roboter-Kommunikation*. Bielefeld.
- Mayer, C. (2011). *Facial Expression Recognition With A Three-Dimensional Face Model*. München.
- Miura, Y., Yihao, H., Kuchii, S., & Sern, G. (2015). Research and Development of the Social Robot Using Speech Recognition and Image Sensing Technology. *International Conference on Information Technology and Electrical Engineering*, S. 66-69.
- MobiNa – Mobiler Notfallassistent*. (2017). Abgerufen am 12. 01 2017 von <http://www.ipa.fraunhofer.de/mobina.html>
- O. Friman, I. V. (April 2007). Multiple Channel Detection of Steady-State Visual Evoked Potentials for Brain-Computer Interfaces. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54, S. 742 - 750.
- Olly*. (2017). Abgerufen am 17. 01 2017 von <https://heyolly.com/>
- pflgecode.de*. (2020). Von <https://pflgecode.de/> abgerufen
- Pillo, Your Personal Home Robot*. (2017). Abgerufen am 13. 01 2017 von <https://pillohealth.com/>
- Pöschl, S. e. (2009). Mensch-Roboter-Interaktion im Baumarkt–Formative Evaluation eines mobilen Shopping-Roboters. *Evaluation*, 27 - 58.
- Projekt, A. E. (2017). *Accompany EU Projekt*. Abgerufen am 10. August 2016 von <http://accompanyproject.eu/>
- Projekt, C. E. (2017). *Companionable EU Projekt*. Abgerufen am 10. August 2016 von <http://www.smart-homes.nl/Innovatie/Europees-Onderzoek/Companionable.aspx>
- projekt-easycare.de*. (2020). Von <http://www.projekt-easycare.de/> abgerufen
- projekt-isabel.de*. (2020). Von <http://www.projekt-isabel.de/> abgerufen
- RoboCup@Home. (2017). *RoboCup@Home*. Abgerufen am 10. August 2016 von <http://www.robocupathome.org/>

- ROBOTIC, B. F. (2016). *Buddy*. Abgerufen am 10. August 2016 von <http://www.bluefrogrobotics.com/en/home/>
- S. Bader, F. K. (2016). Automatische Erkennung herausfordernden Verhaltens von Menschen mit Demenz und Identifikation von Interventionsstrategien . *AAL Kongress - Zukunft Lebensräume Kongress 2016*. Frankfurt.
- S. Thrun et al. (2009). MINERVA: a second-generation museum tour-guide robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 1999-2005.
- Skubic, M. e. (2004). Spatial language for human-robot dialogs. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 154 - 167.
- trinktracker.de/* . (2020). Von <https://trinktracker.de/> abgerufen
- Wang, M., Maeda, Y., & Takahashi, Y. (11 2012). Human Intention Recognition via Eye Tracking. *SCIS-ISIS* . Kobe, Japan.
- Wisspeintner, T. e. (2009). RoboCup@ Home: Scientific competition and benchmarking for domestic service robots. *Interaction Studies*, 392 - 426.
- www.fzi.de/forschung/projekte*. (2020). Von <https://www.fzi.de/forschung/projekte/> abgerufen
- youtube.com/user/FZlchannel*. (2019). Von <https://www.youtube.com/watch?v=zyq1PZAck50> abgerufen
- youtube.com/user/FZlchannel*. (2020). Von https://www.youtube.com/watch?v=H8EMpvVR1_M abgerufen

12 FRAME – Assistierte "Fahrstuhlnutzung" und "Raumzutritt" für Roboter durch Einbeziehung von Helfern

Miriam Funk, Horst-Michael Groß, Bastian Leibe, Sibylle Meyer, Jürgen Striebinger, Sascha Wischniewski

Projektpartner: Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik der TU Ilmenau, Lehrstuhl Informatik 13 (Computer Vision) der RWTH Aachen, CIBEK technology + trading GmbH, SIBIS Institut für Sozial- und Technikforschung GmbH, Gruppe Human Factors, Ergonomie der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, UST Umweltsensortechnik GmbH, MetraLabs GmbH (im Unterauftrag bei TU Ilmenau)

12.1 Zusammenfassung des Projekts

Trotz zunehmender Automatisierung werden Service- und Assistenzroboter auch künftig zumindest bei Teilaufgaben noch auf die Unterstützung durch den Menschen angewiesen sein. FRAME untersuchte diese Form der Hilfeleistung von Menschen gegenüber Robotern am Beispiel der Türöffnung und Fahrstuhlnutzung, die immer noch einen der wesentlichen Hinderungsgründe für den Einsatz mobiler Service- und Assistenzroboter darstellt. Um den Mensch zur Hilfe zu motivieren, sind unterschiedliche Fragen zur Gestaltung und Auswirkung des Zusammenwirkens von Mensch und Roboter zu adressieren.

Ein wesentliches Ziel des Projekts war die Entwicklung von Konzepten und deren technische Implementierung, die dazu beitragen, die Interaktion zwischen Mensch und Roboter bei der Hilfeleistung des Menschen gegenüber dem Roboter menschenzentriert zu gestalten. Dabei wurde insbesondere die Gestaltung zentraler Komponenten des Interaktionsprozesses im Rahmen der Hilfsanfrage betrachtet. Besonderer Fokus wurde auf die verwendeten Dialoge gelegt, da die Dialogstruktur der Hilfsanfrage aus menschenzentrierter Perspektive eine große Bedeutung für die Motivation zur Hilfeleistung und die Interaktionsqualität hat. Diese soll so gestaltet sein, dass der Mensch angemessen durch das System zur Hilfeleistung angesprochen und in die Lage versetzt wird, mit dem Roboter effizient und effektiv zu interagieren. Aber auch die eng mit der Dialoggestaltung verbundenen Aspekte der Erkennungs- und Navigationsleistung im Rahmen der Interaktionsanbahnung wurden in der Konzeptentwicklung und späteren Umsetzung berücksichtigt und in mehrfachen Iterationen zunächst mit Testpersonen in Laborsettings, später im Anwendungskontext mit potenziellen Nutzern evaluiert.

Die entwickelten und implementierten Konzepte beruhen auf einfachen und verständlichen verbalen sowie nonverbalen Interaktionsmechanismen, so dass eine Übertragbarkeit in beliebige Szenarien mit sehr heterogenen Nutzergruppen möglich wird und somit eine breite Anwendung in der Praxis realisiert werden kann.

12.2 Hintergrund

Aktuelle Entwicklungen deuten darauf hin, dass Roboter verstärkt im Alltag der Menschen zum Einsatz kommen werden. In den meisten Fällen werden sie eingesetzt, um Menschen zu Hause, in der Pflege, im öffentlichen Raum oder bei der Arbeit zu unterstützen. Mobile Service- und Assistenzroboter besitzen schon heute viele nützliche Fähigkeiten und kommen beispielsweise in der industriellen Produktion, im Dienstleistungssektor oder Gesundheitswesen zum Einsatz. Doch trotz zunehmender Automatisierung und rapider technologischer Entwicklungen werden Service- und Assistenzroboter zumindest bei Teilaufgaben auch weiterhin auf die Unterstützung durch Menschen angewiesen sein. Technologischen Fähigkeitslücken, basierend auf dynamischen Umgebungsbedingungen oder getrieben durch wirtschaftliche Erwägungen, ist geschuldet, dass sich die Ausstattung von Robotern für alle Eventualitäten als herausfordernd, komplex und kostenintensiv gestaltet (Srinivasan & Takayama, 2016; Rosenthal, Biswas & Veloso, 2010). Daher wird es auch in absehbarer Zeit Situationen geben, in denen Roboter nicht in der Lage sein werden, vollständig autonom zu agieren. Solche Roboter können auch als hilfsbedürftige Roboter oder als "Needy Robots" bezeichnet werden. Ein bekanntes Beispiel sind die sogenannten "CoBots" (Rosenthal, 2012a; Rosenthal, 2012b; Veloso et al., 2015). Oft können die fehlenden Fähigkeiten der Maschinen von Menschen mit Leichtigkeit ausgeglichen werden, wenn diese bereit und motiviert sind, zu unterstützen. Ist der Nutzen des Robotereinsatzes trotz des notwendigen menschlichen Eingriffs hoch genug, lohnt sich auch der Einsatz dieser Roboter, deren Unzulänglichkeiten im Sinne einer fehlbaren Automation bewusst eingeplant werden. Ein möglicher Ansatz, diese Einschränkungen dann zu überwinden und die notwendige menschliche Hilfeleistung zu erhalten besteht darin, dass der Roboter den Menschen aktiv um Hilfe bittet (Rosenthal, Biswas & Veloso, 2010). Dabei muss die jeweilige Hilfsanfrage so gestaltet sein, dass sie präzise, höflich und motivierend für den potentiellen Helfer ist. Hier ergeben sich unterschiedliche Fragestellungen zur Gestaltung der Interaktion zwischen Mensch und Roboter, um einen menschengerechten, motivierenden und zielführenden Interaktionsprozess zu gewährleisten.

Bereits 2006 haben Hüttenrauch et al. die Frage untersucht, unter welchen Umständen Unbeteiligte bereit sind, einem Roboter zu helfen (Hüttenrauch et al., 2006). 10 Jahre später wurde (Cameron et al., 2016) insbesondere der Einfluss der „Persönlichkeit“ des Roboters auf die Hilfsbereitschaft der Nutzer am Beispiel eines ferngesteuerten Guide-Roboters untersucht, der Hilfe bei der Bedienung eines Aufzugs und dem Öffnen von Türen benötigt (Hüttenrauch et al., 2006; Rosenthal, 2012b). Zudem wurde auch die Wirkung von konkreten Hilfssituationen auf die Helfer untersucht (Bajones et al., 2016) und im Kontext von Fernsteueraufgaben ermittelt, dass die menschliche Assistenz als eine begrenzte Ressource zu betrachten und vorsichtig einzusetzen ist (Fong, 2003; Rosenthal, Dey & Veloso, 2009). In anderen Untersuchungen konnte gezeigt werden, wie bedeutsam Erscheinungsbild und Verhalten des Roboters für die Hilfsbereitschaft und Verbundenheit seitens des Menschen sind (Goetz, 2003).

Die genannten Untersuchungen lassen darauf schließen, dass die Unterstützungsbereitschaft in hohem Maße von der situationsabhängigen Auswahl eines geeigneten und unterstützungswilligen Helfers, der Positionierung des Roboters, der Robotergestalt sowie der Ansprache, die der Roboter wählt, abhängig ist. Weiterhin ist bei der Entwicklung der Kommunikationsfähigkeit des Roboters darauf zu

achten, dass diese die menschlichen Regeln der Höflichkeit und Achtsamkeit integriert. Es gilt den jeweiligen soziokulturellen Anwendungskontext zu berücksichtigen sowie den soziodemographischen und kulturellen Hintergrund des potentiellen Helfers. So zeigen die sozialwissenschaftlichen Untersuchungen von Bruce et al. (2002) und Kim und Hinds (2006), dass sich Assistenzroboter sozial korrekt verhalten müssen, um nützlich einsetzbar zu sein und ihr Verhalten in dem Maße transparent sein muss, wie es für die jeweilige Nutzergruppe erforderlich ist (Bruce et al., 2002; Kim & Hinds, 2006).

12.3 Herangehensweise im Projekt

Zunächst wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zum Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführt, die sowohl sozialwissenschaftliche als auch arbeits- und ingenieurwissenschaftliche Ergebnisse und Erkenntnisse zur (Service-) Robotik umfasste. Parallel dazu wurden sozialwissenschaftliche empirische Untersuchungen durchgeführt, welche die Hilfe von Menschen für Menschen bei Türdurchgängen und Aufzugfahrten in den Blick nahmen. Wie sich hier zeigte, sind Menschen eher bereit, Unterstützungsleistungen im Vorbeigehen zu gewähren, die deren Bewegungsrichtung nicht unterbrechen, sondern nahtlos darin zu integrieren sind (z. B. eine Tür im Weitergehen aufhalten). Dies legt nahe, dass Mensch-Technik-Interaktionen so zu konzipieren sind, dass die Assistenz, die dem „Helfer“ abverlangt wird, diesen möglichst wenig belastet, was wiederum eine möglichst große Autonomie und Wahrnehmungsfähigkeit des Roboters voraussetzt. Auf Basis dessen wurde ein prototypischer Interaktionsablauf von robotischen Hilfsanfragen am Beispiel der Türdurchfahrt spezifiziert. Dabei konnten drei Komponenten identifiziert werden, die im Rahmen des Interaktionsprozesses von zentraler Bedeutung sind: die Erkennungsleistung, die Navigationsleistung und die Dialoggestaltung sind sowohl aus technischer als auch nutzerzentrierter Perspektive ausschlaggebend für eine gelungene Mensch-Roboter-Interaktion. Unter diesen Komponenten lässt sich wiederum eine Vielzahl weiterer Einzelaspekte und Themenbereiche subsumieren, die im Folgenden kurz dargestellt sind, jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben:

Erkennungsleistungen: Erkennung und Spezifikation des Hindernisses (z. B. geschlossene Tür), Erkennen potentieller Hilfspersonen in der Umgebung und Erkennung deren Hilfsbereitschaft bzw. prosozialen Verhaltens (sozialpsychologischer Exkurs), Erkennung von Einschränkungen bei den Hilfspersonen und Erkennen der Aufmerksamkeit der potentiellen Hilfspersonen bzw. der konkreten Hilfshandlung, etc.

Navigationsleistungen: Grundprinzipien und -voraussetzungen dynamischer Navigation (z. B. Sicherheit), „Höfliche“ bzw. sozial-akzeptierte und nachvollziehbare Navigation (z. B. Proxemik), Definitionen von Kennwerten (Grenzwerte, Abstände, Geschwindigkeiten), Definition statischer Positionen bei Erkennung und Suche nach Hilfspersonen sowie während der Interaktion, etc.

Dialoggestaltung: Grundprinzipien der Dialoggestaltung (insbesondere aufbauend auf die Normen DIN EN ISO 9241 und DIN EN ISO 14915), Kooperationsprinzipien und Konversationsmaxime, Höflichkeit (Politeness Theory) bei der Ausgestaltung der Dialoge, Emotionserkennung und Emotionsausdruck beim Roboter, persuasive Robotik / persuasive Design, akustische Dialoge (Spracheingabe und -ausgabe, Töne), visuelle Displays (peripher-visuell, Farbkodierung, Grafische

Nutzerschnittstellen, dynamische Lichtreize, Roboter-Kopf als Mimik-Display, Beamerprojektion), Gesten- und Bewegungssteuerung, etc.

Aufgrund der hohen Komplexität und der (engen) Verzahnung der drei Hauptkomponenten wurden in den ersten Projektphasen einzelne Themenbereiche herausgegriffen und separat vor dem Hintergrund der Anwendungsbereiche Türdurchfahrt und Nutzung des Aufzugs mit Unterstützung durch Hilfspersonen betrachtet. Dazu wurden sowohl weiterführende, iterative Literaturrecherchen im Bereich der Mensch-Roboter-Interaktion durchgeführt, als auch Erkenntnisse aus dem Bereich der zwischenmenschlichen Interaktion sowie der (sozial-)Psychologie, Kommunikationswissenschaften und der Linguistik herangezogen. Auf Basis der theoretischen Ausarbeitungen und Aufbereitungen wurden in Orientierung an den Projekthalten und -zielen, individuelle Lösungsansätze erarbeitet und durch unterschiedliche methodische Vorgehensweisen auf ihre Tauglichkeit hin überprüft. Im letzten Projektdrittel wurden die erarbeiteten Lösungen und entwickelten Demonstratoren sowohl im Hinblick auf deren technische Funktionalität als auch hinsichtlich deren Eignung zur Motivierung zur menschlicher Hilfsbereitschaft evaluiert. Nach anfänglichen Untersuchungen der Teillösungen wurden komplexe Evaluationen in den Anwendungskontexten „Bürogebäude“ und „Industrielle Produktion“ vorgenommen.

12.4 Ergebnisse

Die folgende Darstellung fokussiert vornehmlich auf die menschenzentrierte Gestaltung des Interaktionsprozesses. Es werden wie oben dargestellt, die zugrundeliegenden Literaturergebnisse, die eigenen Ausarbeitungen, Ableitungen, Umsetzungen und gegebenenfalls durchgeführten Untersuchungen und Validierungen im Rahmen des Projektes für die Bereiche Erkennung, Navigation und Dialog aufgezeigt.

Vor dem Hintergrund der Zielsetzung einer erfolgreichen Interaktion bzw. der Motivierung einer Person zur Erbringung einer Hilfeleistung ist es von Vorteil, wenn der Roboter nicht nur einzelne Personen als solche erkennen, sondern auch deren Interaktionsinteresse abschätzen kann. So können Hilfsanfragen, die von vorneherein mit einer geringen Wahrscheinlichkeit verbunden sind, die angestrebte Hilfestellung zu erhalten, vermieden werden. Zur Anbahnung der Interaktion muss sich der Roboter an die jeweilige Person unter Umständen aktiv annähern. Bereits in dieser frühen Phase des Interaktionsprozesses muss darauf geachtet werden, dass eine Annäherung sozial akzeptabel gestaltet wird, damit es nicht zu einem Abbruch, etwa durch ausweichen oder Vermeidungsverhalten seitens der adressierten Person kommt. Im Rahmen der Dialoggestaltung ist eine Orientierung an der Interaktion zwischen Menschen zu empfehlen, da nach der Media Equation auch die Mensch-Technik-Interaktion von der zwischenmenschlichen Kommunikation abgeleitet werden kann (Reeves & Nass, 1996). Da die Interaktion zwischen Menschen in ihrer natürlichen Form nicht nur auf der gesprochenen und schriftlichen Sprache basiert, sondern auch nonverbale Aspekte umfasst, sollten auch Roboter mit Menschen multimodal und somit in einer für den Menschen natürlichen Form interagieren können, um die Gesamtheit der Interaktion abzuleiten (Watzlawick, Beavin & Jackson, 2016). Um dies zu erreichen, bieten multimodale Geräte verschiedene Wahrnehmungs- und Aktionsmöglichkeiten, sodass der Anwender über unterschiedliche Kanäle bzw. Sinne Informationen erhält und auch zurückmelden kann. Hierbei gilt es, die verschiedenen Eigenschaften der jeweiligen Modalitäten effizient und effektiv auf die individuellen

Bedürfnisse der Anwender und die spezifischen Situationsbedingungen abzustimmen. Des Weiteren können multimodale Interaktionsformen genutzt werden, um die Vorteile der einzelnen Modalitäten zu einem effizienten Gesamtsystem zusammenzufügen (Heyer, 2010). Im Rahmen des Projektes wurde primär die Gestaltung der Ausgabemodalitäten zur Vermittlung der Hilfsbedürftigkeit betrachtet. Neben der Sprachausgabe fanden im Zuge der Kopfgestaltung die Augen und der Augenausdruck sowie die Verwendung von LED-Elementen besondere Berücksichtigung. Als weitere Aus- aber auch Eingabemodalität wurde ein Tablet am Roboter angebracht. Hier wurde eine abgestimmte grafische Benutzeroberfläche erarbeitet und implementiert.

Erkennungsleistung: Interaktionsinteresse

Damit ein Roboter um Hilfe bitten kann, muss er zunächst in der Lage sein, Personen in seiner Umgebung wahrzunehmen bzw. zu detektieren. Hat der Roboter eine oder gar mehrere Personen in seinem Umfeld erkannt, muss er entscheiden, ob bzw. welche der erfassten Personen er anspricht (Liebner, 2019). Um fehlgeschlagene Hilfsanfragen zu vermeiden, sollte der Roboter diejenige Person ansprechen, von der er annimmt, dass sie am ehesten zur Hilfeleistung bereit wäre. Um diese Entscheidung zu treffen, muss der Roboter in der Lage sein, das Interaktionsinteresse der potenziellen Helfer zu schätzen. Von Menschen wird Interaktionsinteresse vor Interaktionsinitiierung typischerweise aus nonverbaler Kommunikation ermittelt. Verbale Kommunikation kommt erst dann zum Zug, wenn eine grundsätzliche Ansprechbarkeit angenommen wird. Nonverbale Kommunikation zwischen Menschen besteht aus unterschiedlichen Aspekten wie Mimik, Blickverhalten, Gestik und anderen Körperbewegungen, Körperhaltung, Körperkontakt und dem Raumverhalten. Aber auch Geruch, nonverbale Vokalisierungen (lautliche Äußerungen) sowie Kleidung und andere Aspekte des Aussehens können eine Rolle spielen (Argyle, 2013).

In Anlehnung an die technischen Gegebenheiten im Rahmen des Projektes wurde über die Methode paarweisen Vergleichs eine Heuristik entwickelt, die als Basis für die Schätzung des Interaktionsinteresses dienen soll. Dabei wurden die Geschwindigkeit, die Distanz und die Orientierungsrichtung als Bewertungskriterien herangezogen, die in unterschiedliche Ausprägungen unterteilt wurden. In Bezug auf die Geschwindigkeit wurde darauf fokussiert, Personen zu identifizieren, die in Eile sind, da bei diesen von einer verringerten Hilfsbereitschaft auszugehen ist (Darley & Batson, 1973). Dies konnte ebenfalls durch die im Projekt durchgeführten eigenen wissenschaftlichen Untersuchungen bestätigt werden. Eile kann anhand der Fortbewegungsgeschwindigkeit geschätzt werden. Aus Daten von Levine und Norenzayan (1999) ergibt sich für Deutschland eine selbstgewählte Geschwindigkeit von rund 1,5 m/s wenn keine Eile vorliegt. Unter Eile kann die Gehgeschwindigkeit ein Maximum von rund 2,5 m/s erreichen. Wenn also die Gehgeschwindigkeit eines potentiellen Helfers von der Normalgeschwindigkeit signifikant nach oben abweicht, kann dies als Eile interpretiert werden. Da Eile kein Selbstzweck ist, deutet sie auf eine starke Beschäftigung mit eigenen Aufgaben hin. Hüttenrauch & Eklundh (2003) zeigten, dass die Wahrscheinlichkeit von solchen Personen Hilfe zu bekommen stark reduziert ist. Darüber hinaus zeigten eigene empirische Untersuchungen, dass die Hilfsbereitschaft nochmals deutlich sinkt, wenn der potentielle Helfer nicht nur in Eile sondern auch gemeinsam mit anderen Personen unterwegs ist. Zur Einschätzung der potenziellen Hilfsbereitschaft wurde die Gehgeschwindigkeit von Personen entsprechend in zwei Kategorien unterteilt: *langsam* mit weniger als 2 m/s und *schnell*

mit 2 m/s und mehr. Bei der Betrachtung der Distanz zwischen Roboter und potenziellen Helfern wurden in Anlehnung an die Funktionalität der verwendeten technischen Komponenten drei Kategorien gewählt. Personen können durch den Roboter mit den in FRAME genutzten Methoden der Personenerkennung (Linder et al., 2016; Breuers et al., 2018) ab einer Distanz von 10 Meter erfasst und ab 7 Meter Entfernung stabil erkannt werden. Ab einer Entfernung von 3 Meter kann davon ausgegangen werden, dass sich der Roboter im Aufmerksamkeitsbereich der erfassten Person befindet. Außerdem besteht hier die Möglichkeit, dass Personen, auch wenn sie den Erfassungsbereich des Roboters kurzzeitig verlassen, von diesem wiedererkannt werden. Daher wurden Personen in einer Distanz von bis zu 3 Meter als *in der Nähe* befindlich klassifiziert, Personen im Bereich von 3 Meter bis 7 Meter als *in mittlerer Entfernung* und im Bereich von 7 Meter bis 10 Meter *in weiter Entfernung* befindlich. Als letztes Kriterium wurde die Körperorientierung der erfassten Person herangezogen. Da zum Zeitpunkt der Erstellung der Heuristik die Orientierung lediglich aus den Trajektorien der potenziellen Helfer abgeleitet werden konnte, kann dieses Kriterium nur für in Bewegung befindliche Personen erfasst bzw. daraus abgeleitet werden. Hierbei wurde unterschieden, ob sich eine Person *auf den Roboter zu* bzw. *vom Roboter wegbewegt*. Im Anschluss wurden die sieben Kriterien mittels einfachem Paarweisen Vergleich mit einer Gewichtung versehen. Dafür wurden sie untereinander verglichen und auf ihre Bedeutung für die Schätzung des Interaktionsinteresses hin abgewogen. Auf Basis der definierten Kategorien und deren Gewichtung konnten insgesamt 14 verschiedene Situationen abgeleitet, durch die Aufsummierung der Einzelgewichtungen mit einem Gesamtwert versehen und in eine Rangfolge gebracht werden. So wird eine Person, die sich in der Nähe des Roboters befindet und sich langsam auf diesen zubewegt, eher angesprochen, als eine Person, die sich in mittlerer Entfernung befindet und sich schnell auf den Roboter zubewegt. Im Rahmen der Projektlaufzeit konnte die erarbeitete Rangfolge der abgeleiteten Situationen durch das Konsortium von Expertinnen und Experten unterschiedlicher Disziplinen auf ihre Tauglichkeit hin überprüft und das Vorgehen technisch implementiert und geprüft werden.

Navigationsleistung: Annäherungsverhalten

Um die Hilfsbereitschaft einer Person zu schätzen, muss sich diese im Erfassungsbereich des Roboters befinden. Lag in FRAME eine Situation mit Unterstützungsbedarf vor, wartete der Roboter zunächst auf einer Beobachtungsposition, ob sich potentielle Helfer nähern, bevor er selbst eine aktive Suche nach potenziellen Helfern im näheren Umfeld begann. Um dies zu bewerkstelligen, muss der Roboter in der Lage sein, autonom zu navigieren.

Neben dem Selbstzweck der Navigation, kann diese auch als ein Aspekt der nonverbalen Kommunikation fungieren und die Wahrnehmung der Hilfsanfragen bzw. die Wahrscheinlichkeit der Hilfeleistung beeinflussen (Westhoven et al., 2019b). Daher ist ein sozial akzeptables Navigationsverhalten, sowohl für Interaktionspartner als auch für Unbeteiligte, besonders vor dem Hintergrund fehlbarer Automation von großer Bedeutung. Insbesondere Assistenz- oder auch Führungsroboter müssen freundlich, unaufdringlich und verständlich sein (Backhaus et al., 2018). Als wichtige Aspekte der Navigation haben sich außerdem Menschzentrierung, Rücksichtnahme und eine höfliche Annäherung herausgestellt (Gross et al., 2009). Darüber hinaus kann menschliches Wohlbefinden gesteigert werden, wenn der Roboter bei der Ansprache des Helfers einen angemessenen Abstand einhält (Svenstrup et al., 2009; Dautenhahn

et al., 2006) sowie Geschwindigkeit und Annäherungsrichtung angemessen wählt (Kato, Kanda & Ishiguro, 2015). Um vor dem Hintergrund einer menschenzentrierten Technikgestaltung ein angemessenes Annäherungsverhalten zu entwickeln, wurde für die nähere Spezifizierung der einzelnen Komponenten der Fokus auf die Distanz zwischen den Interaktionspartnern sowie die Annäherungsrichtung gewählt. Zusätzlich wurde als weitere Komponente im Rahmen des Projektes das Ansprechverhalten näher betrachtet, da dieses den Interaktionsprozess maßgeblich beeinflussen kann. In diesem Zusammenhang wurden die Ansprehdistanz und der Zeitpunkt der Ansprache in den Vordergrund gestellt.

Wie bereits dargestellt leiten Menschen ihr Verhalten in der Interaktion mit Technik aus der zwischenmenschlichen Interaktion ab. Daher sollten die Erkenntnisse auf diesem Gebiet auch als Grundlage bei der Gestaltung der Mensch-Roboter-Interaktion herangezogen werden. Hierbei können für das Annäherungsverhalten die Ergebnisse aus der Proxemik herangezogen werden, die sich mit der Erforschung der sozialen und kulturellen Bedeutung, die Menschen mit räumlichen Umgebung verbinden, befasst. Edward Hall (1963) hat die Distanzen zwischen Personen für nord- und mitteleuropäischen sowie nordamerikanischen Kulturen in fünf Zonen eingeteilt, die je nach Situation von Menschen präferiert werden. Diese sind in **Abbildung 12.1** dargestellt.

Raubereich	Bereich (m)	Situation
Intime Nahzone	0 - 0,15	Liebende/nahe Freunde, Berührung
Intime Zone	0,15 - 0,45	Liebende/nahe Freunde
Persönliche Zone	0,45 - 1,2	Gespräch mit Freunden
Soziale Zone	1,2 - 3,6	Gespräch mit Fremden
Öffentliche Zone	3,6 +	Öffentliche Ansprache

Abbildung 12.1: Persönliche Räume nach Hall (1963) (Panek et al., 2015)

Diese dienen nicht nur im Rahmen des Projektes FRAME als Grundlage der Entwicklung eines geeigneten Annäherungsverhaltens, sondern wurden bereits in anderen Untersuchungen des Raumverhaltens in der Mensch-Roboter-Interaktion herangezogen, die zum Teil zu ähnlichen Ergebnissen kommen.

In Bezug auf die Ansprehdistanz in den gewählten Szenarien, bildet für den Beginn der Sprachausgabe die Interaktion mit fremden Personen und damit die soziale Zone die allgemein naheliegende Klasse mit einer Distanz von 1,2 Meter bis 3,6 Meter dar (Lambert, 2004). Dadurch werden nicht nur regelmäßige, sondern auch einmalige Interaktionspartner berücksichtigt. In Bezug auf die Annäherungsrichtung konnten Trends dazu gefunden werden, dass in der menschlichen Bewegung eine Annäherung von schräg vorne als angenehmer empfunden wird. Dies könnte darin begründet sein, dass der Roboter sonst den Weg versperrt und dadurch einen starken Zwang auf den Menschen ausübt (Satake et al., 2009). Karreman et al. (2014) konnten außerdem in einem Quasi-Experiment feststellen, dass für in einer Interaktion befindliche Paare eine leichte Präferenz für eine robotische Annäherung von rechts vorne an die gemeinsame Ausrichtung besteht. Für Einzelpersonen scheinen Ergebnisse hingegen

anzudeuten, dass eine Annäherung lediglich von vorne bzw. diagonal vorne erfolgen sollte, ohne spezifische Präferenzen für eine Seite. Buss et al. (2011) fanden zudem heraus, dass eine Annäherungsgeschwindigkeit von 0,6 m/s mit einer Abbremsung auf 0,4 m/s bei einer Distanz von 2 Metern und einem Stopp in der persönlichen Zone zwischen 0,45 Meter und 1,2 Meter (Hall, 1963) bei der Einleitung einer Interaktion durch den Roboter als angenehm empfunden wird. Nähert sich hingegen ein Mensch einem Roboter, wird vor allem bei wiederholter Exposition ein Abstand von ca. 0,5 Meter gewählt (Walters et al., 2008).

Die Umsetzung der Annäherung an einen möglichen Helfer erfolgte in FRAME zunächst für stehende Personen auf direktem Weg. Für bewegte Personen wurde ein Treffpunkt von Roboter und Person auf Basis der Personengeschwindigkeit und der Robotergeschwindigkeit (maximal 0,9 m/s) berechnet, welcher als Anfahrtspunkt für die Annäherung dient und zyklisch aktualisiert wird. Auch beim Bremsverhalten des Roboters gibt es einen Unterschied zwischen der Annäherung zu stehenden und der zu bewegten Personen. Bewegen sich Person und Roboter aufeinander zu, so leitet der Roboter den Bremsvorgang früher ein. Zur Überprüfung und Konkretisierung der mittels Literaturrecherchen ermittelten und aufgearbeiteten Grenzwerte wurden zusätzliche Untersuchungen mit unterschiedlichen Expertengruppen zum Ende des Projekts durchgeführt.

Dialoggestaltung: Augenausdruck und LED-Ausgabe

Nicht nur zur Schätzung, sondern auch zur Vermittlung von Interaktionsinteresse können Facetten der nonverbalen Kommunikation herangezogen werden. Dabei muss auch hier die Gestaltung sorgfältig gewählt und auf ihre Tauglichkeit im Kontext der Hilfsbedürftigkeit geprüft werden. Ein wesentlicher Parameter zur Vermittlung von Hilfsbedürftigkeit, abgeleitet aus der zwischenmenschlichen Kommunikation, stellt die Mimik dar. Gesichtsausdrücke können zur Vermittlung von Emotionen verwendet werden und bieten den Vorteil, dass sie unabhängig von kulturellen Prägungen ähnlich interpretiert werden (Ekman & Friesen, 1971). Dies lässt sich auch auf die Mensch-Roboter-Interaktion übertragen. So zeigten etwa Bennet und Sabanović (2014), dass bereits minimalistische Roboter-Gesichtszüge wie die obere und untere Kontur der Augen sowie des Mundes zu einer hohen Genauigkeit bei der Identifizierung des Gefühlsausdrucks führen. Insbesondere die Augen können ein subtiler Anhaltspunkt für die Emotion der Interaktionspartner sein und das kooperative Verhalten verstärken (Ernest-Jones et al., 2010). Demnach eignen sich Augenausdrücke in besonderem Maße, um in der Mensch-Roboter-Interaktion Emotionen zu vermitteln (Breazeal, 2003) und sollten speziell immer dann vorhanden sein, wenn soziale Interaktion eine wesentliche Aufgabe des Roboters ist. Daher wurde im Rahmen des Projektes besonderer Fokus auf die Entwicklung und Untersuchung der Augen bzw. des Augenausdrucks gelegt. Basierend auf den Erkenntnissen bezüglich des *uncanny valley*, welches von einer Herabsetzung des Vertrauens und der Sympathie ausgeht, wenn ein Roboter sehr menschenähnlich, aber nicht realistisch genug aussieht, wurde ein eher comicartiger Stil für die Gestaltung der Augenpartie gewählt. Die Verwendung von eher mechanisch anmutenden Gestaltungsoptionen geht, in Anlehnung an das allgemeine Verständnis des *uncanny valley*, mit hohen Werten für Vertrauen und Sympathie einher (Mathur & Reichling, 2016). Diese Ergebnisse stimmen auch mit den Designrichtlinien für soziale Roboter von Duffy (2013) und den Vorschlägen von DiSalvo et al. (2002) überein, welche die wahrgenommene Menschlichkeit von Roboterköpfen bewerteten. Sie liefern Designvorschläge für humanoide Roboterköpfe,

die sowohl menschliche als auch robotische Eigenschaften integrieren, um die robotische Natur des Kopfes zu unterstreichen. In FRAME wurde ein auf einer Schwenk-Neigeeinheit angebrachter Roboterkopf konzipiert und technisch realisiert. Zur Umsetzung von ansteuerbaren Augen wurden zwei programmierbare Raspberry Pi mit Display genutzt, so dass die Augen auch unterschiedliche Augenausdrücke annehmen können (van der Grinten, 2019). Damit ist es möglich, dass der Roboter seinen Kopf und seine Augen auf den detektierten (potentiellen) Helfer kontinuierlich richtet. Da Eisenberg et al. (1989) berichten, dass traurige Gesichter Sympathie und Hilfsintentionen auslösen, wurde im Projektkontext ein trauriger oder ängstlicher Augenausdruck für Situationen gewählt, in denen der Roboter Hilfe benötigt. Neben den Augen können auch Farben emotionale Reaktionen beim Betrachter auslösen (Valdez & Mehrabian, 1994) und eignen sich daher auch zur Vermittlung von Emotionen bzw. Hilfsbedürftigkeit. In FRAME wurde diese Möglichkeit der Kommunikation im Rahmen der Kopfgestaltung unter Verwendung von mehreren farbig ansteuerbaren LEDs an den Seiten des Kopfes integriert (siehe Abbildung 12.2).



Abbildung 12.2: Hilfeleistung in den Szenarien Türdurchfahrt und Fahrstuhlnutzung

Beim Einsatz von LEDs und unterschiedlicher Farbgebung sollte auf eine konsistente Vermittlung des Roboterzustandes geachtet werden. Helle saturierte Farben erzeugen dabei ein hohes Wohlbefinden. Dunklere saturierte Farben steigern hingegen die Erregtheit, während dunkle weniger saturierte Farben eine hohe Dominanz ausstrahlen. Nach Valdez und Mehrabian (1994) ist der Farbton von vergleichsweise geringem Einfluss. Blau, Blaugrün und Grün werden in der Literatur als am angenehmsten beschrieben, wohingegen z. B. Gelbgrün als unangenehm sowie stark erregend und dominant empfunden wird. Häring, Bee, und André (2011) fanden in ihren Experimenten, dass lediglich rot als Augenfarbe ein Indikator für Wut mit gutem Erkennungswert sein kann. Andere Farben bzw. Emotionszustände waren schwerer erkennbar. Allerdings wurde das Experiment mit einem Nao-Roboter durchgeführt, der tatsächlich lediglich die Augenfarbe, nicht aber den Augenausdruck ändern kann. Vor allem im Produktionsumfeld sollte auf Konsistenz zu bekannten Lichtsignalen geachtet werden. Nach der IEC 60073 stellt Grün den Normalzustand dar, Blau einen Handlungszwang seitens eines Bedieners, Rot eine Gefahr bzw. einen kritischen Zustand, Gelb einen bevorstehenden kritischen Zustand und weiß einen neutralen Zustand. Vor diesem Hintergrund sind die Farben Grün und Blau gut geeignet um Normalbetrieb und notwendige Eingriffe anzuzeigen (IEC 60073). Allerdings sollte im Projekt eine dritte Farbe für einen Zwischenzustand, zwischen Eingriff und Normalbetrieb, verwendet werden. Da Gelb und Rot für Warnungen vor kritischen

Zuständen reserviert sind, bleibt hier nur Weiß übrig. Alternativ kann auf eine dritte Farbe verzichtet werden und lediglich durch Blink- bzw. Pulsfrequenzen die Zustandsänderung angezeigt werden. Blinken trägt außerdem zur Aufmerksamkeitserzeugung bei, wird mitunter aber auch als störend beurteilt. Prägnante Blinkmuster sollten daher nur dort, wo absolut nötig eingesetzt werden (Crawford 1963), wie etwa im Falle von Warnmeldungen. Mit Warnmeldungen sind hier Meldungen gemeint, deren Übermittlung kritisch für die System- oder Nutzersicherheit sind. Sanders und McCormick (1993) empfehlen für Warnmeldungen eine Blinkrate von 10Hz oder bei deutlich langsameren Frequenzen eine lange Einschaltzeit des Signals, damit es auch bei einem flüchtigen Blick wahrgenommen werden kann. Da es sich im Rahmen des Projektes nicht um Warnmeldungen handelt, die Vorteile der aufmerksamkeitserzeugenden Wirkung des Blinkens jedoch realisiert werden sollten, ist eine deutlich geringere Frequenz angebracht, z. B. 1Hz für Aufmerksamkeitserzeugung und 0,5 Hz für ein ruhigeres Pulsieren.

Zur Prüfung der Wirkung der Ausarbeitungen und technischen Realisierung des Roboterkopfes wurde eine Online-Studie zur Wahrnehmung verschiedener Ausprägungen der Darstellungsmodalitäten durchgeführt. Dabei wurde mithilfe von Videos des Roboters unter anderem auf den Augenausdruck und die Farbgebung der LED-Aktivierung des Kopfes fokussiert. Im Rahmen eines Mixed-Designs wurden der Augenausdruck zwischen traurig, neutral und konzentriert und die Sprachausgabe zwischen höflich („Es wäre sehr nett, wenn Sie mir helfen könnten...“) und direkt („Bitte helfen Sie mir mit...“) als within-Variablen variiert. Zusätzlich wurde zwischen den Probanden die Farbgebung der LED-Ausgabe zwischen blau, grün und fehlender Beleuchtung, wie in Abbildung 12.3 dargestellt, variiert.



Abbildung 12.3: links: LED-Ausgabe aus; mitte: LED-Ausgabe blau; rechts: LED-Ausgabe grün

Insgesamt konnten mittels standardisierter und validierter Fragebögen Datensätze von $N = 139$ Probanden generiert werden. Dabei wurde neben der Wahrnehmung der Probanden in Bezug auf die unabhängigen Variablen auch die Einstellung gegenüber Robotern, das hedonische Nutzererlebnis sowie die Hilfsbereitschaft erfasst. Sowohl für Einzelbetrachtung der Variablen als auch unterschiedliche Kombinationen weisen signifikante Ergebnisse auf. Im Rahmen des Projektes bietet die Nutzung von höflicher Sprache und traurigem Augenausdruck im Kontext einer Hilfsanfrage durch den Roboter sowohl Vorteile in Hinblick auf die wahrgenommene Höflichkeit als auch das hedonische Nutzererlebnis sowie die Hilfsbereitschaft (Westhoven et al., 2019a).

Dialoggestaltung: verbale Kommunikation

Neben der nonverbalen Kommunikation trägt auch die Gestaltung der verbalen Kommunikation in hohem Maße dazu bei, ob die erbetene Hilfeleistung durch einen potenziellen Helfer erbracht wird. Der (verbale) Dialog zwischen Roboter und Mensch

verfolgt dabei das Ziel, Unsicherheit auf Seiten des Helfers zu reduzieren. Darüber hinaus muss im Rahmen einer Hilfsanfrage gleichzeitig auch ein gemeinsames Verständnis der Problemsituation aufgebaut werden (Fischer, 2011). Damit dies gelingt, sollten robotische Hilfsanfragen kulturellen und sozialen Normen folgen (Meyer et al., 2016), da es sonst zu einem Absinken der Akzeptanz des Roboters kommen kann (Mirnig et al., 2017), wodurch auch die Erfolgsaussichten der Hilfsanfrage in hohem Maße beeinflusst werden. Unter Berücksichtigung der Höflichkeitstheorie können solche Verletzungen sozialer Normen vermieden werden (Brown & Levinson, 1978). Dabei wird Höflichkeit, dem Verständnis der *politeness theory* folgend, als die Nutzung von pragmatischen Sprachmerkmalen verstanden, welche zur Wahrung interpersonaler Beziehungen sowie zur Konfliktvermeidung zum Einsatz kommt. (Brown & Levinson, 1978). Srinivasan und Takayama (2016) konnten etwa zeigen, dass höfliche Aufforderungen, welche auf die Schaffung und Erhaltung eines positiven Selbstbildes des Angesprochenen abzielen, zu einer größeren Hilfsbereitschaft führen. Dies konnte insbesondere für Aufforderungen mit positiver Höflichkeit gezeigt werden. Diese Form der Hilfsanfrage wird außerdem als angemessener wahrgenommen (Srinivasan & Takayama 2016). Castro-González et al. (2016) konnten darüber hinaus zeigen, dass höfliche Roboter von wenig technologieaffinen Personen als liebenswürdiger und motivierender wahrgenommen werden (Castro-González et al. 2016). Höflichkeit ist daher essentiell für die Ansprache von Personen durch Roboter (Srinivasan & Takayama, 2016) und fand auch im Rahmen des Projektes bei der Gestaltung der Sprachausgabe Berücksichtigung.

Neben der wahrgenommenen Höflichkeit stellt auch die Eindeutigkeit der Anfrage bzw. die Ambiguität einen wichtigen Faktor für den Erfolg einer Hilfsanfrage dar (Cameron et al., 2016; Srinivasan & Takayama, 2016). Daher wurde unter der Annahme, dass eine Variation von Ambiguität und Höflichkeit die Hilfsbereitschaft beeinflussen, ein kontrolliertes Experiment durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Formen von Hilfsaufforderungen bestehend aus den Komponenten Aufmerksamkeitserzeugung, Begründung, und Handlungsanweisung sowie die Zusammenhänge dieser drei abhängigen Variablen untersucht. In der Studie, die als Innersubjekt-Design (*within subjects*) durchgeführt wurde, sollten die 66 Teilnehmer verschiedene Varianten der Hilfsanfrage hinsichtlich Ambiguität und Höflichkeit sowie ihre Hilfsbereitschaft gegenüber dem Roboter in einem Fragebogen mit selbst entwickelten Items bewerten. Die Ergebnisse einer Varianzanalyse zeigten, dass sich die verschiedenen Variationen in allen abhängigen Variable unterscheiden. Konform zur Literatur ist eine Hilfsanfrage, welche alle drei Komponenten bedient, die erfolgreichste. Darüber hinaus hängen alle drei Variablen signifikant zusammen. Zwischen wahrgenommener Ambiguität und Höflichkeit, sowie der Hilfsbereitschaft konnte außerdem ein negativer Zusammenhang gefunden werden. Das bedeutet, dass Hilfsbereitschaft und Höflichkeit höher sind, je geringer die Ambiguität ist (Budde et al., 2018).

Dialoggestaltung: Grafische Nutzeroberfläche

Da im Rahmen des Projektes keine Spracherkennung zum Einsatz kam, wurde als Eingabemodalität ein Tablet an der Basis des Roboters angebracht. Es wurde eine eigens auf die Gestaltung und Funktionalität des Roboters angepasste grafische Nutzeroberfläche entwickelt. Dabei wurden neben den Ein- auch die Ausgabemöglichkeiten zur Unterstützung der verbalen Kommunikation mitberücksichtigt. Bei der Gestaltung dieser Benutzerschnittstelle wurde ein besonderes Augenmerk auf die Gebrauchstauglichkeit gelegt und die Dialogprinzipien

der DIN EN ISO 9241 als Grundlage für die Gestaltung herangezogen. Dabei sollte insbesondere die Aufgabenangemessenheit Berücksichtigung finden, denn diese kann maßgeblich für eine schnelle und einfach zu erbringende Hilfeleistung sein. Da Helfer kontextabhängig auch zufällig auf den Roboter treffen können, ist außerdem die Selbstbeschreibungsfähigkeit von Bedeutung. Und auch die Lernförderlichkeit im Sinne einer schnellen und einfachen Erlernbarkeit der Bedienung der Benutzeroberfläche bzw. des Roboters sollte gewährleistet sein (DIN EN ISO 9241). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde darauf geachtet, dass sich der angezeigte Dialogverlauf kontinuierlich den Zustands- und Kontextinformationen der Robotersteuerung wie z. B. den Positionsangaben und die Art des Hindernisses sowie Informationen zur ausgewählten Hilfsperson und den Vorgaben der Einsatzumgebung an die aktuellen Umgebungs- und Interaktionsbedingungen anpasst. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die verschiedenen Ausgabemodalitäten aufeinander abgestimmt funktionieren. Neben der Verschriftlichung der gesprochenen Dialoge wurden zusätzlich an geeigneter Stelle Piktogramme und Animationen zur Unterstützung der Sprachausgabe erarbeitet und in das System integriert, um eine schnelle und einfache Verständlichkeit in unterschiedlichen Umgebungsbedingungen sicherzustellen (siehe Abbildung 12.4).

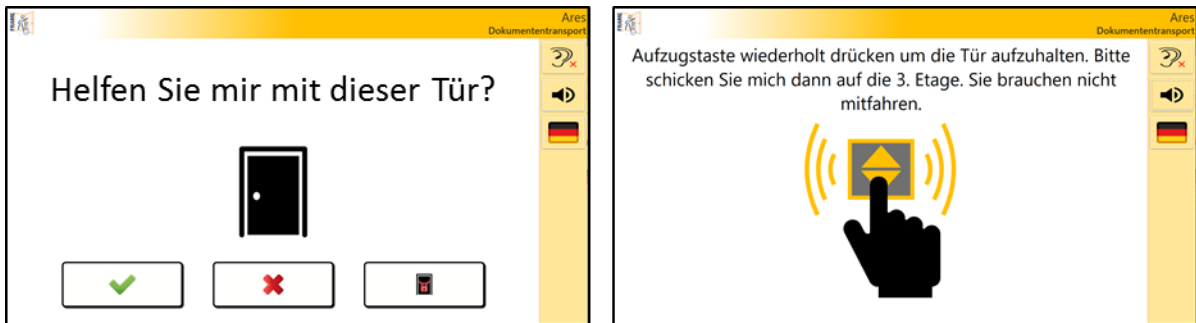


Abbildung 12.4: rechts: Piktogramm Türdurchfahrt; links: Piktogramm Aufzugfahrt (Schrift für die Abbildung vergrößert)

Weiterhin wurden Schaltflächen am seitlichen Rand der Benutzeroberfläche eingebunden, die einerseits darauf hinweisen sollen, dass eine Spracheingabe nicht möglich ist. Andererseits sollen hier durch die Möglichkeit der Umstellung der Sprache und durch die Regulierung der Lautstärke, dem menschlichen Interaktionspartner ein gewisses Maß an Individualisierbarkeit ermöglicht werden. Außerdem wurden Informationstexte eingearbeitet, die bei Bedarf aufgerufen werden können und die Funktionsweise der jeweiligen Schaltfläche beschreiben (siehe Abbildung 12.5).

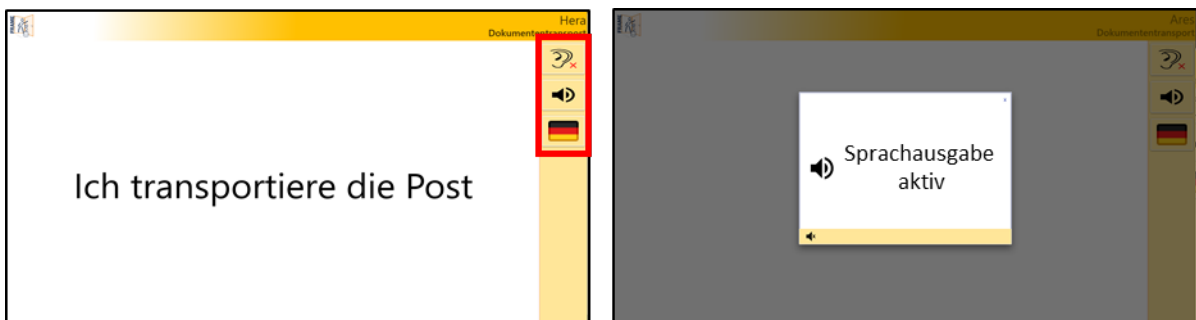


Abbildung 12.5: links: Menüband; rechts: Informationsausgabe (Schrift für die Abbildung vergrößert)

12.5 Forschungsausblick

Im Verlauf des Projektes wurden verschiedene Facetten der Mensch-Roboter-Interaktion beleuchtet. Bisher konnten noch nicht alle Untersuchungen ausgewertet und aufgearbeitet werden. So konnten zwar umfangreiche technische Funktionstests sowie sozial- und arbeitswissenschaftliche Untersuchungen in der Produktionsumgebung durchgeführt werden. Deren abschließende Auswertung und Aufbereitung stehen zum jetzigen Zeitpunkt noch aus, werden jedoch bis zum Projektende noch erfolgen.

In den aufgezeigten Arbeiten konnten unterschiedliche Aspekte und Zusammenhänge bezüglich des Interaktionsprozesses zwischen Menschen und hilfsbedürftigen Robotern näher bestimmt werden. Die Art der Interaktion ist ein Faktor, der sowohl die Wahrnehmung als auch die Bewertung der Interaktionspartner maßgeblich beeinflusst. Da die zu leistende Hilfe in den durchgeführten Untersuchungen nicht sehr umfangreich war, bleibt als Frage für zukünftige Forschung, wie sich Art und Umfang der zu leistenden Hilfe auf die Mensch-Roboter-Interaktion auswirken. Insbesondere vor dem Hintergrund gegenwärtiger Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens und deren Verknüpfungen zum Bereich der Robotik, werden vor allem die Dialogprinzipien der Selbstbeschreibungsfähigkeit, der Steuerbarkeit sowie der Systemtransparenz zunehmend wichtiger und damit auch die menschenzentrierte Gestaltung der technischen Systeme sowie der Interaktionsprozesse zwischen Mensch und Technik weiter an Bedeutung gewinnen.

12.6 Implikationen für die Praxis

Von Robotern um Hilfe gebeten zu werden, mag für Menschen "seltsam" erscheinen, da Hilfe und Unterstützung normalerweise umgekehrt erfolgen sollte. Doch diese fehlbare Automation kann bei guter Gestaltung in unterschiedlichen Einsatzbereichen einen Mehrwert generieren. Da in diesem Fall jedoch der Einsatz des Roboters nicht nur eine Unterstützung, sondern auch mit zusätzlichem Aufwand für den Menschen verbunden sein kann, gewinnt die Menschzentrierung des Gestaltungsprozesses abermals an Bedeutung – insbesondere im Arbeitskontext.

Für den Einsatz in der Praxis sollte immer der gesamte Interaktionsprozess bereits von der Anbahnung bis hin zur tatsächlichen Interaktion betrachtet und gestaltet werden. Die Erkennung des Interaktionsinteresses und die darauf aufbauende adaptive Dialoggestaltung sind für alle Einsatzgebiete eines Assistenzsystems, sowohl mit als auch ohne Roboter, von zentraler Bedeutung. Die Herausforderung liegt dabei im Spannungsfeld zwischen dem Informationsgewinn durch zusätzliche Sensorik und den damit verbundenen ethischen bzw. finanziellen Aspekten (z. B. Videoauswertung, Personenerkennung). Dabei gilt es im Rahmen der Dialoggestaltung auch die Facetten der nonverbalen Kommunikation zu berücksichtigen, die sich ebenfalls für den Einsatz eines Roboters ergeben. Demnach sind Funktionen wie Personenerkennung und Navigationsverhalten nicht ausschließlich aus einer rein technischen Perspektive zu betrachten. Auch die sozialen Implikationen und die damit verbundenen Gestaltungsmöglichkeiten sollten betrachtet und im Sinne einer guten und menschengerechten Technikgestaltung zu Einsatz gebracht werden.

12.7 Literatur

- Argyle, M. (2013). Körpersprache und Kommunikation (10. Überarbeitete Neuauflage ed.): *Junfermann*.
- Backhaus, N., Rosen, P., Scheidig, A., Gross, H.-M., & Wischniewski, S. (2018). "Somebody help me, please?!" Interaction design framework for needy mobile service robots. In *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, Genoa, Italy.
- Bajones, M., Weiss, A., & Vincze, M. (2016). „Help, anyone?“ A user study for modeling robotic behavior to mitigate malfunctions with the help of the user. *arXiv preprint arXiv:1606.02547*.
- Bennett, C., & Šabanović, S. (2014). Deriving minimal features for human-like facial expressions in robotic faces. *International Journal of Social Robotics* 6 (3), 367-381. <https://doi.org/10.1007/s12369-014-0237-z>
- Biswas, J., & Veloso, M. (2010). Wifi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots. In *2010 IEEE international conference on robotics and automation*. 4379-4384. IEEE.
- Breazeal, C. (2003). Emotion and sociable humanoid robots. *International journal of human-computer studies*. 59(1-2), 119-155. [https://doi.org/10.1016/S1071-5819\(03\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S1071-5819(03)00018-1)
- Breuers, S., Beyer, L., Rafi, U., & Leibe, B. (2018). Detection-Tracking for Efficient Person Analysis: the DetTA Pipeline. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.
- Brown, P., & Levinson, S.C. (1978). Universals in language usage: Politeness phenomena. In *Questions and politeness: Strategies in social interaction*. Cambridge University Press, 56-311.
- Bruce, A., Nourbakhsh, I., & Simmons, R. (2002). The role of expressiveness and attention in human-robot interaction. In *Proceedings 2002 IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 02CH37292)* (4), 4138-4142. IEEE.
- Budde, V., Backhaus, N., & Wischniewski, S. (2018). Needy Robots – Designing Requests for Help Using Insights from Social Psychology. In *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, Genoa, Italy.
- Buss, M., Carton, D., Gonsior, B., Kuehnlenz, K., Landsiedel, C., Mitsou, N., ... & Tscheligi, M. (2011). Towards proactive human-robot interaction in human environments. In *2011 2nd International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)* 1-6. IEEE.
- Cameron, D., Loh, E. J., Chua, A., Collins, E., Aitken, J. M., & Law, J. (2016). Robot-stated limitations but not intentions promote user assistance. In *5th International Symposium on New Frontiers in Human-Robot Interaction*, Sheffield, UK.

- Castro-González, Á., Castillo, J. C., Alonso-Martín, F., Olortegui-Ortega, O. V., González-Pacheco, V., Malfaz, M., & Salichs, M. A. (2016). The Effects of an Impolite vs. a Polite Robot Playing Rock-Paper-Scissors. In *International Conference on Social Robotics (ICSR)*, Kansas City, MO.
- Crawford, A. (1963). The perception of light signals: The effect of mixing flashing and steady irrelevant lights. *Ergonomics* 6 (3), 287-294. <https://doi.org/10.1080/00140136308930708>
- DIN, E. (1992). ISO 9241: Ergonomie requirements for office work with visual display terminals (VDTs).
- DIN, E. (2002). ISO 14915-1: Software-Ergonomie für Multimedia-Benutzungsschnittstellen– Teil 1: Gestaltungsgrundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14915-1: 2002). Deutsche Fassung EN ISO, 14915-1.
- Darley, J. M., & Batson, C. D. (1973). "From Jerusalem to Jericho": A study of situational and dispositional variables in helping behavior. *Journal of personality and social psychology*, 27(1), 100.
- Dautenhahn, K., Walters, M., Woods, S., Koay, K. L., Nehaniv, C. L., Sisbot, A., . . . Siméon, T. (2006). "How may I serve you?": A robot companion approaching a seated person in a helping context. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*. 172-179.
- DiSalvo, C. F., Gemperle, F., Forlizzi, J., & Kiesler S. (2002). All robots are not created equal: the design and perception of humanoid robot heads. In *4th conference on Designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques*. ACM, 321-326. <https://doi.org/10.1145/778712.778756>
- Duffy, B. R. (2003). Anthropomorphism and the social robot. *Robotics and autonomous Systems*, 42(3-4), 177-190. [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(02\)00374-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(02)00374-3)
- Eisenberg, N., Fabes, R. A., Miller, P. A., Fultz, J., Shell, R., Mathy, R. M., & Reno, R. R. (1989). Relation of sympathy and personal distress to prosocial behavior: a multimethod study. *Journal of personality and social psychology*, 57(1), 55.
- Ekman, P. & Friesen, W.V. (1971). "Constants across cultures in the face and emotion,". *Journal of personality and social psychology*, 17(2), 124-129.
- Ernest-Jones, M., Nettle, D., & Bateson, M., (2011). Effects of eye images on everyday cooperative behavior: a field experiment. *Evolution and Human Behavior*, 32(3), 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.evolhumbehav>
- Fischer, K. (2011). How people talk with robots: Designing dialogue to reduce user uncertainty. *AI Magazine*, 32(4).
- Fong, T., Thorpe, C., & Baur, C. (2003). Robot, asker of questions. *Robotics and Autonomous systems*, 42(3-4), 235-243.

Goetz, J., Kiesler, S., & Powers, A. (2003). Matching robot appearance and behavior to tasks to improve human-robot cooperation. In *12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Proceedings. ROMAN. 55-60. IEEE.

Gross, H. M., Boehme, H., Schroeter, C., Müller, S., König, A., Einhorn, E., ... & Bley, A. (2009). TOOMAS: interactive shopping guide robots in everyday use-final implementation and experiences from long-term field trials. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005-2012. IEEE.

Hall, E. T. (1963). A system for the notation of proxemic behavior. *American anthropologist*, 65(5), 1003-1026.

Häring, M., Bee, N., & André, E. (2011). Creation and evaluation of emotion expression with body movement, sound and eye color for humanoid robots. Paper presented at the ROMAN.

Heyer, C. (2010). Human-robot interaction and future industrial robotics applications. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4749-4754.

Hüttenrauch, H., & Eklundh, K. S. (2003). To help or not to help a service robot. In *12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Proceedings. ROMAN 2003. 379-384. IEEE.

Hüttenrauch, H., Eklundh, K. S., Green, A., & Topp, E. A. (2006). Investigating spatial relationships in human-robot interaction. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 5052-5059. IEEE.

Karreman, D., Utama, L., Joosse, M., Lohse, M., van Dijk, B., & Evers, V. (2014). Robot etiquette: How to approach a pair of people? In *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*.

Kim, T., & Hinds, P. (2006). Who should I blame? Effects of autonomy and transparency on attributions in human-robot interaction. In *ROMAN 2006-The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 80-85. IEEE.

Kato, Y., Kanda, T., & Ishiguro, H. (2015). May I help you? Design of Human-like Polite Approaching Behavior. In *Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Portland, OR.

Lambert, D. (2004). *Body language: HarperCollins*.

Levine, R. V., & Norenzayan, A. (1999). The pace of life in 31 countries. *Journal of cross-cultural psychology*, 30(2), 178-205.

Liebner, J., Scheidig, A., Gross, H.-M. (2019). Now I need help! Passing Doors and Using Elevators as an Assistance Requiring Robot. In *International Conference on Social Robotics (ICSR)*, 527-537 https://www.tu-ilmeneau.de/fileadmin/media/neurob/publications/conferences_int/2019/Liebner-ICSR-2019.pdf.

Linder, T., Breuers, S., Leibe, B., Arras, K. (2016). On Multi-Modal People Tracking from Mobile Platforms in Very Crowded and Dynamic Environments. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.

Mathur, M. B., & Reichling, D. B. (2016). Navigating a social world with robot partners: A quantitative cartography of the Uncanny Valley. *Cognition*, 146, 22-32.

Meyer, J., Miller, C., Hancock, P., de Visser, E. J., & Dorneich, M. (2016). Politeness in Machine-Human and Human-Human Interaction. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*.

Mirnig, N., Stollnberger, G., Miksch, M., Stadler, S., Giuliani, M., & Tscheligi, M. (2017). To err is robot: How humans assess and act toward an erroneous social robot. *Frontiers in Robotics and AI*, 4 (21).

Panek, P., Mayer, P., Schuller, F., & Zagler, W. L. (2015) Beiträge zur Modellierung von „Persönlichkeit“ bei assistiven Robotern für alte Menschen zwecks besserer Mensch-Roboter Interaktion, speech at 8. *AAL Kongress - Zukunft Lebensräume*, Frankfurt/Main, VDE Verlag Berlin Offenbach, ISBN 978-3-8007-3901-1, 452-458.

Reeves, B. & Nass, C. I. (1996). *The media equation: How people treat computers, television, and new media like real people and places*. Cambridge university press.

Rosenthal, S., & Veloso, M. M. (2012a). Mobile Robot Planning to Seek Help with Spatially-Situated Tasks. In *AAAI*, 4(5), 1.

Rosenthal, S. L. (2012b). Human-centered planning for effective task autonomy (No. CMU-CS-12-110). *Carnegie-Mellon UNIV Pittsburgh PA school of computer science*.

Rosenthal, S., Dey, A. K., & Veloso, M. (2009). How robots' questions affect the accuracy of the human responses. In *ROMAN 2009-The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 1137-1142, IEEE.

Rosenthal, S., Biswas, J., & Veloso, M. (2010). An effective personal mobile robot agent through symbiotic human-robot interaction. In *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Volume 1*.

Sanders, M. S., & McCormick, E. J. (1993). *Human factors in engineering and design*. 7th ed. New York, NY, England: Mcgraw-Hill Book Company.

Satake, S., Kanda, T., Glas, D. F., Imai, M., Ishiguro, H., & Hagita, N. (2009). How to approach humans?: Strategies for social robots to initiate interaction. In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*.

Srinivasan, V., & Takayama, L. (2016). Help me please: Robot politeness strategies for soliciting help from humans. In *Proceedings of the 2016 CHI conference on human factors in computing systems*, 4945-4955.

Svenstrup, M., Tranberg, S., Andersen, H. J., & Bak, T. (2009). Pose estimation and adaptive robot behaviour for human-robot interaction. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3571-3576. IEEE.

Valdez, P., & Mehrabian, A. (1994). Effects of color on emotions. *Journal of experimental psychology: General*, 123(4), 394.

van der Grinten, T., Müller, St., Westhoven, M., Wischniewski, S., Scheidig, A., Gross, H.-M (2019). Designing an Expressive Head For a Help Requesting Socially Assistive Robot. In *Human-Friendly Robotics (HFR)*.

Veloso, M., Biswas, J., Coltin, B., & Rosenthal, S. (2015). CoBots: Robust symbiotic autonomous mobile service robots. In *Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence*.

Walters, M. L., Syrdal, D. S., Koay, K. L., Dautenhahn, K., & Te Boekhorst, R. (2008). Human approach distances to a mechanical-looking robot with different robot voice styles. In *ROMAN 2008-The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*.

Watzlawick, P., Beavin, J. H. & Jackson, D. D. (2016). Menschliche Kommunikation: Formen, Störungen, Paradoxien. 13. Auflage. *Hogrefe AG*.

Westhoven, M., van der Grinten, T., & Müller, S. (2019a). Perceptions of a Help-Requesting Robot-Effects of Eye-Expressions, Colored Lights and Politeness of Speech. In *Proceedings of Mensch und Computer 2019*, 43-54.

Westhoven, M., Budde, V., Backhaus, N., Rosen, P., Wischniewski, S. (2019b). Gestaltung unterstützungsbedürftiger Robotersysteme. 1. Auflage. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, <https://doi.org/10.21934/baua:fokus20190618>.