

Felix Top

Gestaltungsmöglichkeiten und Potenziale von nutzerzentrierten Mensch-Maschine- Schnittstellen zur Laststeuerung an Kranen



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

**Gestaltungsmöglichkeiten und Potenziale von
nutzerzentrierten Mensch-Maschine-Schnittstellen zur
Laststeuerung an Kranen**

Felix P. Top

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. techn. Peter Mayr

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

2. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

3. Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Die Dissertation wurde am 15.02.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 25.07.2022 angenommen.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Fakultät für Maschinenwesen

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2022

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruck, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – dem Autor vorbehalten.

Layout und Satz: Felix Top

Copyright © Felix Top, 2022

ISBN: 978-3-948514-15-0

Printed in Germany, 2022

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München. Grundlage für die Arbeit war das von mir bearbeitete Forschungsprojekt *Entwicklung eines intuitiven Steuerungskonzepts für Lasthebemaschinen*, das über die AiF-Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e. V. im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München gefördert wurde. Bei den zahlreichen Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses sowie den Projektkollegen Lorenz Prasch und Jonas Schmidler vom Lehrstuhl für Ergonomie bedanke ich mich für die hervorragende Zusammenarbeit, das außerordentliche Engagement auch über die PA-Sitzungen hinaus, den konstruktiven Austausch, das kontinuierliche Feedback und die großzügige Unterstützung in allen Belangen.

Mein besonderer, herzlicher Dank gilt Herrn Professor Johannes Fottner für die stets wohlwollende Unterstützung meiner Forschung als Doktorvater, die fortlaufende Auseinandersetzung mit meinem Forschungsthema, die zahlreichen Denkanstöße sowie die großen Freiräume bei der Erarbeitung meiner Ergebnisse. Ich bin sehr dankbar für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die mir gebotenen Möglichkeiten, die wesentlich dazu beigetragen haben, dass meine Zeit am Lehrstuhl – weit über die fachlichen Aufgaben hinaus – auch eine Zeit der persönlichen Entwicklung geworden ist. Herrn Professor Klaus Bengler und Herrn Professor Willibald Günthner danke ich für das Interesse an meiner Forschungstätigkeit sowie die Bereitschaft, als Zweit- bzw. Drittprüfer diese Arbeit zu begutachten. Ferner bedanke ich mich bei Herrn Professor Peter Mayr für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Mein spezieller Dank gilt allen Kollegen am Lehrstuhl, die mich auf meinem Weg begleitet, meine Forschungstätigkeit durch ihre Sichtweise und spannende Diskussionen bereichert und vor allem dazu beigetragen haben, dass der Alltag und die Arbeitsatmosphäre so nett und freundschaftlich waren, wie man sich das nur wünschen kann. Herausheben möchte ich Johannes Zeiler, der für mich nicht nur ein toller Bürokollege gewesen, sondern ein echter Freund geworden ist. Vielen Dank auch an Leonhard Feiner und Markus Kohl für die wertvollen Hinweise bei der Erstellung dieser Arbeit.

Besonders bedanke ich mich auch bei unserer Lehrstuhlwerkstatt um Alfred Sachs, Werner Ottl, Julian Schoch und Johannes Bauer, die gemeinsam mit ihren Auszubildenden für jedes meiner Anliegen eine hervorragende Lösung gefunden haben, so ungewöhnlich es auch war. Weiter geht mein Dank an Brigitte Stephani und Claudia Common aus unserem Sekretariat für ihre Unterstützung in allen Belangen. Außerdem bedanke ich mich für die

hervorragende Beratung durch Dr. Stephan Haug von der Statistikberatung der TUM sowie durch Dr. Raphael Wagner bei allen Statistikfragen, die im Rahmen meiner Forschungstätigkeiten aufgetaucht sind. Bei allen Studenten, die mich im Rahmen ihrer Studienarbeiten oder durch Hiwi-Tätigkeiten unterstützt haben, bedanke ich mich sehr herzlich für ihr Engagement. Besonders hervorheben möchte ich Alexander Schock, Korbinian Zöls, Julia Krottenthaler und Sebastian Pütz, die alle über mehrere Jahre hinweg ihre Ideen und ihre Zeit eingebracht haben.

In besonderem Maß bedanke ich mich bei meinen Eltern für ihre bedingungslose Unterstützung zu jeder Zeit meines Lebens und bei meiner wunderbaren Frau Katrin für ihren unermüdlichen Rückhalt, ihren Optimismus und ihre Unterstützung, auf die ich zu jeder Zeit zählen kann. Ohne euch wäre mein Leben arm, und ich wäre nicht der, der ich bin. Vielen Dank!

Felix Top, im Oktober 2022.

Kurzdarstellung

Gestaltungsmöglichkeiten und Potenziale von nutzerzentrierten Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Laststeuerung an Kranen

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Gestaltungsrahmen zur Entwicklung nutzerzentrierter Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMIs) zur Laststeuerung an Kranen zu entwickeln. Es wird gezeigt, dass die Berücksichtigung eines systematischen Designansatzes eine erhöhte Gebrauchstauglichkeit der HMIs sowie eine verringerte mentale Beanspruchung beim Bediener erwarten lässt, was in erhöhter Intuitivität im Vergleich zum etablierten maschinenzentrierten HMI resultiert. Der entwickelte Gestaltungsrahmen bietet erstmals eine systematische Grundlage zur Ableitung nutzerzentrierter HMIs und kann bereits während des Entwicklungsprozesses zum Konzeptvergleich herangezogen werden.

Mit Hilfe des Gestaltungsrahmens können zwei nutzerzentrierte Steuerungskonzepte abgeleitet werden: das richtungsorientierte und das zielorientierte Steuerungskonzept. Es wird gezeigt, dass bei beiden Konzepten positive Einflüsse auf die Gebrauchstauglichkeit, mentale Beanspruchung und Intuitivität erwartet werden können. In einer Laborstudie (48 Probanden ohne Vorerfahrung) werden die beiden Steuerungskonzepte mit dem maschinenzentrierten HMI verglichen. Sowohl die Effekte auf die mentale Beanspruchung als auch auf die Gebrauchstauglichkeit belegen den positiven Einfluss der nutzerzentrierten Konzepte und die höhere Intuitivität.

Zur weiteren Untersuchung werden beide Steuerungskonzepte in je zwei Ausprägungen (insgesamt vier HMIs) an einem Ladekran mit vier Freiheitsgraden und Auslegerspitzensteuerung umgesetzt. Bei den zielorientierten HMIs erfolgt die Vorgabe des Zielpunkts entweder in Form eines Lichtpunkts, der mit einer 3D-Kamera erfasst wird, oder über Hologramme mit Hilfe der AR-Brille Microsoft HoloLens. Beide zielorientierten HMIs sind funktionsfähig, weisen jedoch technische Limitationen auf. Bei den richtungsorientierten HMIs erfolgt die Eingabe der gewünschten Bewegungsrichtung des Hakens entweder über Joysticks auf einer Funksteuerung oder über Wischbewegungen auf einem Tablet, so dass die Hakenbewegung immer parallel zur Eingabe ist. Das Proof of Concept wird für alle HMIs erbracht. In der Evaluationsstudie (56 Probanden in zwei Bedienergruppen) werden die richtungsorientierten HMIs mit dem maschinenzentrierten HMI verglichen. Es zeigt sich, dass sowohl Novizen als auch Experten von den richtungsorientierten HMIs profitieren, auch wenn die Effekte bei den Novizen stärker ausfallen. Dies liefert weitere Belege für die Validität des Gestaltungsrahmens und stützt gleichzeitig die Erwartung, dass die richtungsorientierten HMIs zu einer höheren Intuitivität führen.

Das Ziel, einen Beitrag zur Entwicklung, Implementierung und Evaluation von nutzerzentrierten HMIs zur Laststeuerung an Kranen zu leisten, wurde erreicht.

Abstract

Designs for and Potentials of User-Centered Human-Machine Interfaces for Load Control on Cranes

In this dissertation, a design framework for the development of user-centered load controls on cranes is developed. It is shown that, taking the design guidelines into account, an increase in the usability of HMIs and a reduction on the mental strain on the operator can be expected, resulting in increased intuitiveness compared to the established machine-centered HMIs. For the first time, the design framework provides a systematic basis for deriving user-centered HMIs and can already be used for concept comparison during the HMI development process.

The design framework is then used to derive two user-centered interaction paradigms: the direction-oriented and goal-oriented control concept. It is shown, that in both cases the design framework is fulfilled and thus positive influences on usability, mental strain and intuitiveness can be expected. In a laboratory study (48 subjects with no prior experience), the two interaction paradigms are compared with the machine-centered HMI. Both the effects on mental strain and usability demonstrate the positive influence of the user-centered HMIs and the higher intuitiveness. For further investigation both interaction concepts are implemented in two versions each on a loader crane with four degrees of freedom and boom tip control. In the case of the goal-oriented HMIs, the target point is specified either in the form of a light spot captured by a 3D camera or via holographies using the HoloLens AR glasses. Both target-oriented HMIs are functional, but have technical limitations. In the direction-oriented HMIs, the input of the desired direction of movement of the hook is done either via joysticks on a radio control or via swiping movements on a tablet, so that the hook movement is always parallel to the input. The proof of concept is provided. In the subsequent evaluation study (56 subjects in two user groups), the direction-oriented control concepts are compared with the machine-centered control concept. It is shown that both novices and experts benefit from the direction-oriented HMIs, although the effects are stronger for the novices. This provides further evidence for the validity of the design framework while at the same time supports the expectation that the direction-oriented HMIs lead to higher intuitiveness.

The goal of contributing to the development, implementation, and evaluation of user-centered HMIs for load control on cranes has been achieved.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XI
Formelzeichenverzeichnis	XIII
1 Motivation und Zielsetzung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Herausforderungen bei der Steuerung von Hebemitteln mit mehreren Freiheitsgraden	3
1.3 Problemstellung und angestrebte Ergebnisse	5
1.4 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit	7
2 Grundlagen und Definitionen	9
2.1 Ergonomische Grundbegriffe	9
2.1.1 Nutzerzentrierte Gestaltung	10
2.1.2 Gebrauchstauglichkeit	10
2.1.3 Intuitivität	13
2.1.4 Mentale Modelle	16
2.1.5 Kompatibilität	18
2.1.6 Mentale Beanspruchung	21
2.2 Automatisierungsebenen	26
2.3 Lasthebemaschinen (Krane)	28
3 Stand der Technik und Wissenschaft	31
3.1 Vorbemerkungen	31
3.2 Basiselemente der Mensch-Maschine-Interaktion	32
3.3 Interaktionselemente zur Benutzereingabe	33
3.4 Mensch-Maschine-Schnittstellen für Lasthebemaschinen in Industrie und Forschung	34
3.4.1 Anzahl bewegter Freiheitsgrade der Maschine	34
3.4.2 Bedienerkollektiv	35
3.4.3 Gestaltung bestehender Kransteuerungen	36
3.4.4 Kranfunksteuerungen	38
3.4.5 Vorschriften, Normen und Gestaltungsrichtlinien für Kransteuerungen	39
3.4.6 Strategien zur Verbesserung bestehender Mensch-Maschine-Schnittstellen für Krane	40
3.5 Mensch-Maschine-Schnittstellen in ähnlichen Systemen	46
3.5.1 Mobile Arbeitsmaschinen	46
3.5.2 Robotik	48
3.5.3 Konsumgüter	49
	VII

4	Forschungsbedarf und Forschungsfragen	51
4.1	Defizite aktueller Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Kransteuerung	51
4.2	Basisanforderungen und Forschungslücke	55
4.3	Forschungsfragen	58
5	Lösungsansatz: Systematische Generierung und Ausgestaltung nutzerzentrierter Steuerungskonzepte zur Kransteuerung	61
5.1	Gestaltungsrichtlinien für nutzerzentrierte Kransteuerungen	61
5.2	Resultierender Gestaltungsrahmen	66
5.3	Hinweise zur Ausgestaltung von Steuerungskonzepten	67
5.4	Ausgestaltung der Interaktionsparadigmen	70
5.4.1	Richtungsorientiertes Steuerungskonzept	71
5.4.2	Zielorientiertes Steuerungskonzept	74
5.5	Vergleich der Interaktionsparadigmen mit dem Gestaltungsrahmen	76
5.6	Beantwortung der Forschungsfrage 1	77
6	Potenziale nutzerzentrierter Interaktionskonzepte (Studie 1)	79
6.1	Methoden	79
6.1.1	Messung von mentaler Beanspruchung und Gebrauchstauglichkeit	79
6.1.2	Simulationsumgebung	80
6.1.3	Versuchsaufbau	82
6.1.4	Versuchsablauf	84
6.2	Hypothesen	84
6.3	Ergebnisse	86
6.3.1	Probandenkollektiv	86
6.3.2	Auswertungsverfahren	87
6.3.3	Auswertung: Deskriptive Statistik	90
6.3.4	Auswertung: Inferenzstatistik	95
6.4	Diskussion der Laborstudien-Ergebnisse	105
6.4.1	Maschinenzentriertes und nutzerzentrierte HMIs im Vergleich	105
6.4.2	Richtungs- und zielorientiertes HMI im Vergleich	108
6.4.3	Limitationen	109
6.5	Beantwortung der Forschungsfrage 2	111
7	Nutzungskontext: Ladekran mit Auslegerspitzensteuerung	113
7.1	Systembeschreibung	113
7.2	Messung der Hakenposition	115
7.3	Auslegerspitzensteuerung und Regelungskonzept	116
7.3.1	Steuerung: Inverse Kinematik	117
7.3.2	Regelungskonzept	121
7.3.3	Funktionsnachweis des Steuerungs- und Regelungskonzepts	121
8	Gestaltungsmöglichkeiten für zielorientierte Steuerungskonzepte	127
8.1	Interaktionselemente zur Zielvorgabe	127

8.2	Umsetzung des zielorientierten Interaktionsparadigmas	128
8.2.1	Markierung des Zielorts mit einem Lichtpunkt	129
8.2.2	Vorgabe eines Zielpunkts in der erweiterten Realität	132
8.3	Limitationen	134
8.4	Beantwortung der Forschungsfrage 3	139
8.4.1	Konsequenzen der Limitationen	139
8.4.2	Ausblick auf zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten	140
9	Gestaltungsmöglichkeiten für richtungsorientierte Steuerungskonzepte	141
9.1	Interaktionselemente zur Richtungsvorgabe	141
9.2	Technische Umsetzung des richtungsorientierten Interaktionsparadigmas . .	143
9.2.1	Richtungsvorgabe durch Joysticks	143
9.2.2	Richtungsvorgabe mit Hilfe eines touchfähigen Tablets inkl. passen- der App	148
9.3	Limitationen	150
9.4	Beantwortung der Forschungsfrage 3	152
10	Evaluation richtungsorientierter Steuerungskonzepte (Studie 2)	153
10.1	Methoden	153
10.1.1	Messung der Gebrauchstauglichkeit	154
10.1.2	Versuchsaufbau	154
10.1.3	Versuchsablauf	157
10.2	Hypothesen	158
10.3	Ergebnisse	159
10.3.1	Probandenkollektiv	159
10.3.2	Auswertungsverfahren	159
10.3.3	Auswertung: Deskriptive Statistik	161
10.3.4	Auswertung: Inferenzstatistik	166
10.4	Diskussion der Evaluationsergebnisse am realen Kran	174
10.4.1	Einfluss der HMIs auf die Gebrauchstauglichkeit	174
10.4.2	Gegenüberstellung ausgewählter Gestaltungsparameter	177
10.4.3	Limitationen	179
10.5	Beantwortung der Forschungsfrage 4	181
10.6	Konsequenzen für die Validität des Gestaltungsrahmens	182
11	Diskussion	185
11.1	Reflektion der erreichten Ziele und der Forschungsfragen	185
11.2	Grenzen der Konzepte	187
11.3	Übertragbarkeit der Steuerungskonzepte auf andere Anwendungsfälle . . .	190
11.3.1	Übertragbarkeit auf andere Krantypen	190
11.3.2	Übertragbarkeit auf ähnliche Maschinensysteme	191
11.4	Nutzen der Ergebnisse für ausgewählte Personengruppen	193

12 Zusammenfassung und Ausblick	195
12.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	195
12.2 Ausblick und Ableitung von weiterem Forschungsbedarf	199
Literaturverzeichnis	201
Verzeichnis studentischer Arbeiten	231
Verzeichnis der Veröffentlichungen	233
Abbildungsverzeichnis	235
Tabellenverzeichnis	241
A Hinweise zu Vorschriften, Normen und Gestaltungsrichtlinien für Kransteuerungen	A-1
B Vorverarbeitung der Messdaten für den Pupillendurchmesser (VR-Studie)	A-5
C Prüfung der Voraussetzungen für die statistischen Modelle	B-1
C.1 Linear Mixed Models (LMM)	B-1
C.1.1 VR-Studie (Kapitel 6)	B-3
C.1.2 Realstudie (Kapitel 10)	B-15
C.2 Mixed Analysis of Variance (ANOVA)	B-21

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AIC	Akaike-Informationskriterium
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
AR	Augmented Reality (erweiterte Realität)
AV	abhängige Variable
CC	Configuration Control
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLS	Dampened Least Squares
DOF	Degree of Freedom (Freiheitsgrad)
E	Gruppenzuordnung der Vorerfahrung: Experte
GLMM	Generalized Linear Mixed Model (Generalisiertes Lineares Gemischtes Modell)
GUI	Graphical User Interface (grafische Benutzeroberfläche)
GPM	Gradient Projection Method
HMI	Human-Machine Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
IMU	Inertial Measurement Unit (inertiales Messsystem)
ISO	International Organization for Standardization
JT	Jacobian Transpose
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
LB-Phase	Lastbewegungs-Phase
LMM	Linear Mixed Model (Lineares Gemischtes Modell)
Log	Logarithmus
LogLike	Log-Likelihood-Dichte
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System (Mikro-elektromechanisches System)
MV	Mean Value (Mittelwert)

N	Gruppenzuordnung der Vorerfahrung: Novize
PI	Pseudo-Inverse
RE	Response-Effect
RO	Richtungsorientiertes HMI
RTLX	Raw Task Load Index
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SE	Standard Error (Standardfehler)
SI	Système international d'unités (Internationales Einheitensystem)
SR	Stimulus-Response
SUS	System Usability Scale
TCP	Tool Center Point (Mittelpunkt des Endeffektors)
NASA-TLX	NASA Task Load Index
UV	unabhängige Variable
VR	Virtual Reality (virtuelle Realität)
WPI	Weighed Pseudo-Inverse
ZIPM	Zero-inflated Poisson-Modell (Poisson-Modell mit Nullenüberschuss)
ZO	zielorientiertes HMI
ZV-Phase	Zielvorgabe-Phase

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$A(x_A, y_A, z_A)$	[m, m, m]	Koordinaten des Startpunkts A der Lastbewegung
a	[m]	Abstand des Krandrehpunkts über dem Boden (Rahmenhöhe)
$B(x_B, y_B, z_B)$	[m, m, m]	Koordinaten des Zielpunkts B der Lastbewegung
b	[-]	Steigung der Regressionsgeraden (Statistik)
\dot{B}	[m/s, m/s, m/s]	Geschwindigkeitsvektor zur Bewegung von A nach B
\ddot{B}	[m/s ² , m/s ² , m/s ²]	Beschleunigungsvektor zur Bewegung von A nach B
\dddot{B}	[m/s ³ , m/s ³ , m/s ³]	Ruckvektor zur Bewegung von A nach B
e	[°, °, °, m]	Fehler in den Gelenkpositionen
F	[-]	F-Wert (Statistik)
$H(q)$	[-]	Performance-Kriterium nach [Cha-1995]
h	[m, m, m]	Vektor der Hakenposition
\dot{h}	[m/s, m/s, m/s]	Vektor der Hakengeschwindigkeit
\dot{h}_d	[m/s, m/s, m/s]	Vektor der gewünschten Hakengeschwindigkeit
\dot{h}_m	[m/s, m/s, m/s]	Vektor der gemessenen Hakengeschwindigkeit
I_n	[-]	Identitätsmatrix der Dimension $n \times n$
J_e	[-]	Jacobi-Matrix zur Beschreibung der Beziehung zwischen den Gelenkgeschwindigkeiten und der Hakengeschwindigkeit
l_n	[m]	Länge des n-ten Auslegerstücks des Krans
N	[-]	Stichprobengröße
n	[-]	Größe der Untergruppe aus der Stichprobe
p	[-]	p-Wert (Statistik)
$p(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$	[m, m, m, °, °, °]	Pose des Endeffektors

q_i	[m] oder [°]	Stellung des i-ten Bewegungsfreiheitsgrads des Krans
\bar{q}_i	[m] oder [°]	obere Gelenkbegrenzung des i-ten Gelenks
\underline{q}_i	[m] oder [°]	untere Gelenkbegrenzung des i-ten Gelenks
\mathbf{q}	[°, °, °, m]	Vektor der Gelenkpositionen
\mathbf{q}_d	[°, °, °, m]	Vektor mit den gewünschten Gelenkpositionen
\mathbf{q}_m	[°, °, °, m]	Vektor mit den gemessenen Gelenkpositionen
\dot{q}_i	[m/s] oder [°/s]	Gelenkgeschwindigkeit des i-ten Gelenks
$\dot{\mathbf{q}}$	[°, °, °, m]	Vektor der Gelenkgeschwindigkeiten
$\dot{\mathbf{q}}_d$	[°, °, °, m]	Vektor der gewünschten Gelenkgeschwindigkeiten
$\dot{\mathbf{q}}_m$	[°, °, °, m]	Vektor der gemessenen Gelenkgeschwindigkeiten
R^2	[-]	Modellgüte (Statistik)
r	[-]	Effektstärke nach Cohen (Statistik)
r_{Haken}	[m]	horizontaler Abstand des Hakens zum Krandrehpunkt
t	[-]	t-Wert (Statistik)
x_{global}	[m]	x-Wert im globalen Koordinatensystem
y_{global}	[m]	y-Wert im globalen Koordinatensystem
z	[-]	z-Wert (Statistik)
z_{Haken}	[m]	Höhe (vertikaler Abstand) des Hakens zum Boden
α	[-]	Signifikanz-Niveau (Statistik)
β	[°]	Winkel zwischen q_2 und der Horizontalen
γ	[°]	Winkel zwischen q_2 und q_3
Δ_{Nutzer}	[°]	Verdrehwinkel zwischen Bediener und globalem Koordinatensystem
η^2	[-]	partielle Effektstärke (Statistik: ANOVA)
χ^2	[m]	χ^2 -Wert des Likelihood-Quotienten-Tests (Statistik)

$\varphi_{Ausleger}$

[°]

Verdrehwinkel zwischen Kranausleger und der x -
Achse des globalen Koordinatensystems

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Ausgangssituation

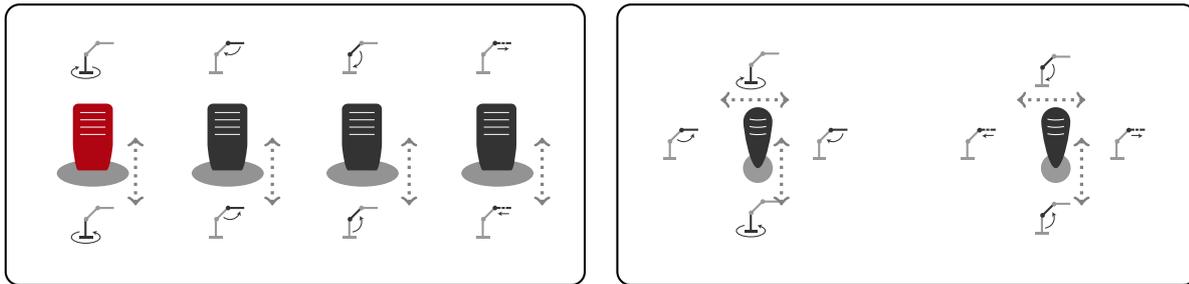
Krane sind wichtige Werkzeuge in zahlreichen Industriezweigen. Sie werden überall dort eingesetzt, wo schwere oder sperrige Lasten bewegt werden müssen, die von Hand nur schwer oder gar nicht zu handhaben sind. Für die verschiedenen Anwendungen existieren unterschiedliche Krantypen, die es erlauben, eine Last zu heben, zu senken oder horizontal zu bewegen, indem sie an einem Lastaufnahmemittel wie einer Kette oder einem Seil befestigt werden [DIN-15001-1]. Um den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden, sind Krane in diversen Ausführungen erhältlich, z. B. als Brückenkran, Wandlaufkran oder Turmdrehkran (vgl. [Sha-2007]). Mit Ausnahme einiger weniger Spezialanwendungen werden alle Krane – unabhängig von ihrem Einsatzgebiet – von einem menschlichen Bediener¹ (Kranführer) gesteuert, der im Wesentlichen drei Kernaufgaben hat [Abd-2003]: Er muss erstens den Kran, die Last und die Umgebung überwachen, zweitens dafür sorgen, dass gefährliche Situationen und Schäden vermieden werden und drittens die Kranantriebe steuern, damit sich die Last sicher vom Startpunkt zum Zielort bewegt.

Üblicherweise, d. h. bei Verwendung der Standard-Mensch-Maschine-Schnittstelle bzw. des Standard-HMI (Human-Machine Interface)², ist der Bediener dafür zuständig, die verschiedenen Freiheitsgrade³ des Krans separat zu steuern, die durch die Drehwerke, Hydraulikzylinder und Fahrtriebe des Krans definiert sind [Mia-2015]. Die Gesamtbewegung der Last ergibt sich aus der Überlagerung der Bewegungen der einzelnen Antriebe. Dieses allgemeine Interaktionskonzept ist unabhängig vom gewählten Eingabegerät der Kransteuerung und findet sich in Kranen aller Hersteller auf der ganzen Welt. Bei Verwendung von Linearhebeln (siehe Abbildung 1-1a) werden beide Bewegungsrichtungen eines Freiheitsgrads auf ein eindimensional bewegbares Stellteil abgebildet. Bei Verwendung von Joysticks werden mehrere DOFs mit einem mehrdimensionalen Eingabeelement gesteuert (siehe Abbildung 1-1b). Bei der Verwendung von Drucktastern werden zwei Taster verwendet, um jede der beiden möglichen Bewegungsrichtungen pro Freiheitsgrad auszulösen. Die allermeisten Krane werden mit einem der drei genannten Eingabeelemente gesteuert [Mia-2015].

¹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Folgenden auf die gleichzeitige Verwendung weiblicher und männlicher Sprachformen verzichtet und das generische Maskulinum verwendet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beide Geschlechter.

² Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden insbesondere Fachtermini aus dem Kontext der Ergonomie größtenteils in Englisch wiedergegeben. In Literatur und Wissenschaft sind die englischen Begriffe etabliert und die konsistente Verwendung ermöglichen dem fachkundigen Leser eine eindeutige und korrekte inhaltliche Interpretation.

³ Im weiteren Verlauf der Arbeit werden Freiheitsgrade im Plural als DOFs (Degrees of Freedom) bezeichnet.



(a) Linearhebel-Steuerung

(b) Joystick-Steuerung

Abbildung 1-1: Schematische Darstellung üblicher Steuerungskonzepte (gepunktete Pfeile: mögliche Bewegungsrichtungen). Die Zuordnung der Bewegungsrichtung der Stellteile zu den DOFs des Krans erfolgt über standardisierte Symbole

Außerdem sind viele Krane mit einer Funksteuerung ausgestattet, die es dem Bediener erlaubt, sich während der Steuerung relativ zum Kran zu bewegen oder sich vom Kran zu entfernen. Der Definition von Sheridan [She-1989; She-1995] folgend, spricht man in diesem Fall von Teleoperation, da der Bediener in die Lage versetzt wird, „Objekte aus der Distanz zu bewegen, zu erfassen und mechanisch zu manipulieren“ [Übersetzung durch den Autor]. Die Vorteile der Teleoperation sind vielfältig (vgl. Abschnitt 3.4.4: Flexibilität, Komfort, Sicherheitsgewinne) und haben in den vergangenen Jahren zu einer steigenden Verbreitung und damit einhergehend zu einer Heterogenisierung des Bedienerkollektivs geführt. Die Bedeutung einer sicheren und einfachen Mensch-Maschine-Interaktion nimmt auch durch diese Entwicklung tendenziell zu und wird durch einen Blick in das Unfallgeschehen unterstrichen.

Untersuchungen aus der Bauindustrie zufolge sind Bedienerfehler die Hauptquelle für alle Arten von Risiken beim Kranbetrieb [Sha-2011, S. 523 ff.]. Systematische Unfalluntersuchungen zeigen zum Beispiel, dass 43 % aller untersuchten Kranunfälle zwischen 2004 und 2010 auf Bedienerfehler zurückzuführen sind [Kin-2012]. Andere Untersuchungen bestätigen diesen Trend und geben an, dass 19 % aller Vorfälle auf Unachtsamkeit und weitere 24 % auf Bedienungsfehler zurückzuführen sind [Rav-2017]. Eine weitere aktuelle Studie zeigt, dass menschliche Faktoren bei bis zu einem Drittel aller Kranunfälle eine entscheidende Rolle spielen [Tom-2018].

Im Jahr 2018 machten Kranunfälle mehr als 10 % aller Arbeitsunfälle in Deutschland aus, die mit Fördertechnik zu tun hatten [Deu-2019]. Die höchste Anzahl der gemeldeten Unfälle wurde durch Lasten an Kranen verursacht: In diese Kategorie fallen über 22 % aller meldepflichtigen Unfälle mit Förderanlagen. In einem Drittel dieser dokumentierten Fälle wurden Arbeiter aufgrund gefährlicher Bediener- oder Lastbewegungen verletzt, eingeklemmt oder gequetscht. In 25 % der Vorfälle wurde das Unfallopfer von einem sich bewegenden Objekt getroffen, z. B. von einer sich bewegenden Last, dem Kran oder einem tief hängenden Teil des Hebezeugs [Deu-2019, S. 83]. In vielen Fällen ist die Überwachung durch den Bediener mangelhaft. Internationale Untersuchungen bestätigen die genannten Grö-

Benordnungen: [Dha-2019] zeigt bei einer systematischen Untersuchung von Kranunfällen der Jahre 2014-2016 im Industrieumfeld, dass aus 13 % der Unfälle ein Personenschaden (= meldepflichtiger Arbeitsunfall) resultiert. Weitere aktuelle Statistiken zum industriellen und Bau-Umfeld, die die genannten Trends für andere Länder bestätigen, finden sich beispielsweise unter [U.S-2019].

Es wird deutlich, dass eine erhebliche Anzahl der gemeldeten Verletzungen auf unsachgemäße Kranbedienung zurückzuführen ist. Die Zahlen unterstreichen, dass eine genauere Betrachtung des HMI für die Kransteuerung angebracht ist.

1.2 Herausforderungen bei der Steuerung von Hebemitteln mit mehreren Freiheitsgraden

Neben seinen Sicherheits- und Überwachungsaufgaben besteht die Hauptaufgabe des Bedieners darin, die einzelnen Antriebe des Krans mit Hilfe der Steuerung (d. h. des HMI) korrekt zu steuern, um die gewünschte Lastbewegung als Überlagerung aller Antriebsbewegungen zu erreichen. Heutige Kransteuerungen sind entweder als achsbasierte (d. h. freiheitsgradbasierte) oder – weit weniger üblich – als Auslegerspitzensteuerungen (s. Abschnitt 3.4) ausgeführt. Die Ermittlung der erforderlichen Betätigungsrichtung der Bedienelemente erfordert im Fall der achsbasierten Steuerung vom Bediener eine gedankliche Umsetzung der gewünschten Lastbewegung auf die einzelnen Antriebe der Maschine, wobei sowohl die Eigenschaften des Antriebs (zulässige Bewegungen und Geschwindigkeiten) als auch die Bewegungsrichtung richtig eingeschätzt werden müssen. Anschließend muss der Bediener die ermittelten Antriebsbewegungen durch Betätigung der richtigen Bedienelemente auslösen. Zu diesem Zweck werden die Eingabelemente der Funksteuerung durch genormte Schilder gekennzeichnet (siehe Abbildung 1-1). Um die Effizienz zu erhöhen, können mehrere Bedienelemente gleichzeitig bewegt werden.

Folglich muss der Bediener – häufig simultan – zwei interne Umkodierungen vornehmen, um eine korrekte Lastbewegung zu erreichen:

- a) die Aufteilung der gewünschten Lastbewegungen auf die Bewegungen der einzelnen Kranantriebe, und
- b) die Zuordnung des korrekten Stellteils an der Steuerung zu den entsprechenden Kranbewegungen.

Bei den selteneren Auslegerspitzensteuerungen entfällt Umkodierung a), da sie automatisch vom Steuergerät des Krans vorgenommen wird. Umkodierung b) bleibt jedoch auch in diesem Fall vom Bediener durchzuführen.

Umkodierungen sind mit einem mentalen Aufwand verbunden und stellen deshalb eine potenzielle Ermüdungs-, Frustrations- und Fehlerquelle dar (vgl. [Lov-1962; Nit-2011, S. 15]).

Dies steht einer unkomplizierten und effizienten Kransteuerung entgegen und ist besonders für weniger erfahrene Bediener eine Herausforderung, da der Bediener ständig mit mehreren gleichzeitig zu bewältigenden Aufgaben konfrontiert wird. Wenn man bedenkt, dass sowohl die Produktivität als auch die Sicherheit des Kranbetriebs von der Effektivität und Effizienz der Interaktion zwischen Bediener und Kran abhängt (vgl. [Kiv-2013a; Fan-2018; Nei-2001; Spa-2015]), wird die Bedeutung der Optimierung von Kran-HMIs offensichtlich.

Das Standard-HMI für die Kranbedienung basiert auf einem maschinenzentrierten Design: drei Antriebe der Maschine bedeuten beispielsweise, dass die Maschine drei DOFs besitzt, die über drei verschiedene Stellteilbewegungen angesteuert werden, um letztendlich den einzigen Haken wie gewünscht zu bewegen. Dies verdeutlicht: Konventionelle Kransteuerungen bilden das Systemmodell eines Krans ab und widersprechen damit dem mentalen Modell (vgl. [Joh-1983]) des menschlichen Bedieners, der sich auf die Bewegung der *einen* Last und nicht auf die Bewegung *mehrerer* DOFs des Krans konzentrieren sollte.

Bei Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung entfällt ein Teil der notwendigen Umkodierungen, was bereits eine Verbesserung der konventionellen, maschinenzentrierten Steuerung bewirkt. Die Zuordnung der Eingabebefehle zu den Bewegungsrichtungen des Hakens erfolgt jedoch auch in diesem Fall über den maschinenzentrierten Ansatz und entsprechende Symbole. Sowohl die Darstellung der Bewegungsrichtung des Hakens als auch die Vorgabe der gewünschten Hakenbewegung durch den Bediener finden immer im Koordinatensystem des Krans statt.

Besonders aufwendig werden die mentalen Umkodierungen bei der Kranbedienung, wenn für die Bedienung eine Funksteuerung zum Einsatz kommt. In diesem Fall kann sich der Bediener relativ zum Kran bewegen und verdrehen. Deshalb muss er neben der aktuellen Position des Krans und der Gerätekinematik auch seine eigene Orientierung relativ zum Koordinatensystem des Krans berücksichtigen, um die gewünschte Lastbewegung auf die richtigen Eingabebefehle abzubilden. Sind das eigene und das Koordinatensystem des Krans inkongruent, ist – zusätzlich zu den bereits genannten Herausforderungen der Umkodierung – das Prinzip der Kompatibilität [Bub-1993] nicht erfüllt. Die Zuordnung der richtigen Eingabebefehle zu den Kranantrieben an der Funksteuerung kann daher zu noch komplexeren und anspruchsvolleren mentalen Prozessen für den Bediener führen. Aus diesem Grund erschwert die Flexibilität des Bedienerstandorts oft das mentale Berechnen der korrekten Eingabebefehle (vgl. [Che-2007, S. 1233]). Die Vorteile der Teleoperation gegenüber einem festen Bedienplatz haben die Kranfunksteuerung in vielen Fällen jedoch zu einem unverzichtbaren Werkzeug gemacht [Mia-2015]. Es wird aber auch deutlich, dass dem Bediener und dem HMI als Kernkomponente der Mensch-Maschine-Interaktion dabei eine besondere Schlüsselrolle zukommt [Ara-2007; Hir-2012].

1.3 Problemstellung und angestrebte Ergebnisse

Da alle Kranbewegungen vom Bediener gesteuert werden, ist die Gestaltung des HMI eine kritische Komponente für die Prozess- und Bediener-sicherheit. Eine sichere, effektive und effiziente Kranbedienung erfordert eine ausreichende Ausbildung und Erfahrung, da es sich um eine anspruchsvolle Aufgabe handelt. Besonders bei den häufigen gleichzeitigen Bewegungen mehrerer DOFs ist die damit verbundene kognitive Belastung für den Bediener hoch und folglich die Aufgabenerfüllung erschwert.

Die mehrdimensionale Steuerungsaufgabe der Kranbedienung, bei der Eingabebefehle separat – oft auch gleichzeitig – getätigt werden, widerspricht nicht nur der eigentlichen Aufgabe, eine Last bewegen zu wollen und somit dem mentalen Modell [Joh-1983], sondern stellt eine erhebliche mentale Belastung für den Bediener dar. Da es sich um mehrere Einzelaufgaben handelt, die dieselben Ressourcen benötigen, lässt sich dieser Komplexitätszuwachs durch die *Multiple Resource Theory* [Nav-1979; Wic-2008] erklären. Die Mehrdimensionalität reduziert die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Entscheidungsprozesse während der Benutzung [Lov-1962; Gar-1970], was wiederum die Sicherheit im Umgang mit dem System beeinträchtigt. So kann die Bedienung zu Frustration führen, wie jedes System, das sich nicht so verhält, wie es von den Bedienern erwartet wird [Bes-2006]. Aus ergonomischer Sicht treten Bedienprobleme auch deshalb auf, weil die Koordinatensysteme von Bediener, Stellteilen und Maschine nicht übereinstimmen, was eine Verletzung der Kompatibilität (s. z. B. bei [Bub-1993]) darstellt. Es gilt als hinreichend belegt, dass dies zu schlechterer Systeminteraktion führt (vgl. [DeJ-2004], für Krane vgl. [Sen-2000]). Auch wenn Eingabefehler nicht zwangsläufig zu einer Beschädigung der Systemkomponenten führen, hat sich gezeigt, dass mangelnde Kompatibilität bei teleoperierten Systemen zu einer verminderten Leistung und einem geringeren Vertrauen in die Bedienung und ferner zu unnötiger Frustration beim Bediener führt [Her-2013]. Folglich lässt das derzeitige Design von Kransteuerungen ein großes Verbesserungspotenzial offen, weshalb die vorgestellte Forschung darauf abzielt, die derzeitigen HMIs für die Kranbedienung im Hinblick auf Kompatibilität, Intuitivität und Benutzerfreundlichkeit zu verbessern.

Die genannten Herausforderungen treten darüber hinaus bei weiteren Maschinen auf, die mehrere DOFs besitzen und zum Manipulieren von Objekten (Lasten) verwendet werden. Bei bisher existierenden Steuerungen ist der Bediener zu jedem Zeitpunkt gefordert, sich in die Bewegungskordinaten aus Sicht der Maschine hineinzudenken. Dies gilt für kraftbetriebene Hebemittel (Krane), für den Bereich der (Tele-)Robotik und grundsätzlich für alle manuell gesteuerten Maschinen mit mehreren DOFs, bei denen ein Bediener die zentrale Steuerungsinstanz ist (vgl. Abschnitt 3.1). Dies ermöglicht, dass sich die angestrebten Ergebnisse der vorliegenden Forschungsarbeit in angrenzende Fachbereiche transferieren lassen, obwohl sich die Arbeit zunächst der Betrachtung von Kranen widmet.

Der bekannte Kognitionswissenschaftler und Vater des nutzerzentrierten Designansatzes Don Norman beschreibt in seinem Buch *The Design of Future Things* das Ziel der Interaktion mit intelligenten technischen Systemen wie folgt:

„When workers want the engine to move, or to rotate or to be lowered again, they simply lift, rotate push or press down (...). The result is a perfect collaboration. The workers do not think of themselves as using a machine: they just think of themselves as moving the engine.“ [Nor-2007, S. 87]

Ein wesentlicher Schlüssel für die Verbesserung der HMIs von sich bewegenden Maschinen ist folglich, die eigentliche Aufgabe des Bedieners in den Mittelpunkt der Mensch-Maschine-Interaktion zu stellen und Umkodierungen dadurch zu eliminieren. Dies geschieht systematisch durch einen nutzerzentrierten Designansatz (vgl. Abschnitt 2.1), der in der vorliegenden Arbeit für die Entwicklung von HMIs zur Laststeuerung abgeleitet und angewendet wird.

Betrachtet man den aktuellen Stand der Technik (s. Kapitel 3) für Kransteuerung sowie für verwandte Domänen in der Maschinensteuerung, so zeigt sich, dass bisherige Entwicklungen hauptsächlich auf der Verwendung einer HMI-Konstruktionsidee und/oder dem erstmaligen Einsatz von bestimmten Sensortechnologien in diesem Zusammenhang beruhen. Obwohl einige Lösungen vielversprechende Verbesserungen in Bezug auf die Bedienerleistung und die Bedienerzufriedenheit zeigen, existiert keine systematische Betrachtung der Gründe, warum bestimmte HMIs aus Sicht des menschlichen Bedieners anderen überlegen sein sollten. Somit sind neue Konzepte das Ergebnis beliebiger Gestaltungsprozesse, da sie sich nicht auf einen etablierten methodischen Rahmen für die Konstruktion von Kran-HMIs stützen. Ein solcher Gestaltungsrahmen kann die Entwicklung von nutzerzentrierten Kran-HMIs unterstützen, die einerseits für die Steuerung der Maschine geeignet sind, andererseits aber vor allem einfache und effiziente Interaktionen fördern und damit die mentalen Anforderungen an den Bediener reduzieren. Insbesondere die Berücksichtigung eines nutzerzentrierten Designansatzes hat das Potenzial, die Produktivität, Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion systematisch zu verbessern (vgl. [Sch-2018]).

Die vorliegende Arbeit möchte daher einen Beitrag leisten, den beschriebenen Problemstellungen einen strukturierten Gestaltungsrahmen mit entsprechenden Gestaltungsregeln zur Entwicklung nutzerzentrierter und somit aufgabenorientierter Kransteuerungen entgegenzusetzen. Hierfür wird ein passender Gestaltungsrahmen entwickelt. Basierend darauf werden systematisch mögliche Steuerungskonzepte abgeleitet, implementiert und evaluiert. Sowohl beim Gestaltungsrahmen als auch bei der Evaluation werden technische Aspekte (z. B. Umsetzbarkeit im industriellen Umfeld und an verschiedenen Krantypen) sowie ergonomische Schlüsselparameter wie Gebrauchstauglichkeit, Intuitivität, Kompatibilität, mentale Beanspruchung und die Unterstützung eines angemessenen mentalen Mo-

dells berücksichtigt, um dem Ansatz der nutzerzentrierten Gestaltung gerecht zu werden und die Effekte messbar aufzuzeigen.

1.4 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Die Entwicklung des Gestaltungsrahmens zur nutzerzentrierten Entwicklung von Steuerungskonzepten für Krane sowie die anschließende Ableitung und Evaluation konkreter Lösungsalternativen erfolgt iterativ und nutzerzentriert gemäß DIN-9241-210 (vgl. Abbildung 1-2) [DIN-9241-210]. Optimierungskriterien sind hierbei Kompatibilität, Gebrauchstauglichkeit sowie die mentale Beanspruchung als indirekte Messgrößen für Intuitivität und eine angemessene mentale Modellbildung.

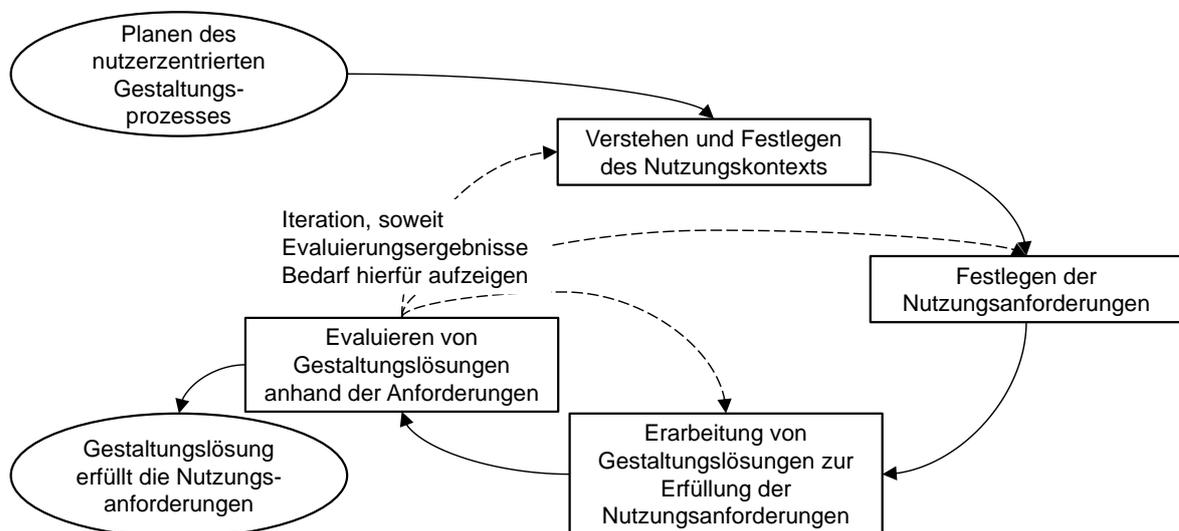


Abbildung 1-2: Iterativer Prozess zur nutzerzentrierten Gestaltung gebräuchstauglicher Systeme, adaptiert aus [DIN-9241-210]

Der weitere Verlauf der Arbeit gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 werden die wichtigsten Grundbegriffe definiert und im Kontext erläutert. Der Fokus liegt hierbei auf den ergonomischen Grundbegriffen (u. a. nutzerzentrierte Gestaltung, Gebrauchstauglichkeit, Intuitivität etc.) sowie dem Einfluss von Automatisierung und Assistenz auf die Bedienung von technischen Systemen (insb. Krane), um die für den weiteren Verlauf der Arbeit notwendigen Werkzeuge und Methoden darzustellen.

In Kapitel 3 folgt ein Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der Interaktionsprinzipien für die Bedienung von Maschinen. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf bestehenden HMIs aus Wissenschaft und Industrie für Krane und ähnliche Maschinensysteme (Arbeitsmaschinen, Robotik, Werkzeugmaschinen etc.).

In Kapitel 4 wird darauf aufbauend der Forschungsbedarf im Bereich nutzerzentrierter HMIs für Krane strukturiert dargestellt und in und Form der Forschungsfragen erfasst, bevor in Kapitel 5 der Gestaltungsrahmen für die Entwicklung von nutzerzentrierten Kransteuerungen abgeleitet wird. Mit Hilfe dieses Gestaltungsrahmens werden anschließend die Umsetzungsschritte zur systematischen Steuerungsentwicklung erläutert und zwei so entstehende innovative Interaktionsparadigmen abgeleitet.

In Kapitel 6 erfolgt die erste Evaluation der beiden Interaktionsparadigmen mit Hilfe einer Laborstudie mit 48 Probanden (Studie 1). Die Laborstudie dient einerseits zur Evaluation des abgeleiteten Gestaltungsrahmens im Hinblick auf die mentale Beanspruchung und Gebrauchstauglichkeit der Interaktionsparadigmen und andererseits auch zum direkten Vergleich der beiden neuen Interaktionsparadigmen. Der reale Nutzungskontext für die Implementierung der nutzerzentrierten HMIs wird in Kapitel 7 beschrieben.

In den Kapiteln 8 sowie 9 werden die praktische Umsetzbarkeit der beiden Interaktionsparadigmen untersucht und die HMIs an einem realen Ladekran implementiert. Umsetzungshindernisse, die sich insbesondere bei der Realisierung des ersten HMI ergeben, werden dargelegt. Anschließend wird die Gebrauchstauglichkeit des zweiten Konzepts in einer Probandenstudie mit 56 Teilnehmern in zwei Bedienergruppen (Experten und Novizen) im Nutzungskontext eines realen Krans evaluiert (Studie 2). Die zweite Studie untersucht insbesondere, ob sich die in Studie 1 im Labor gemessenen Effekte auch bei einer realen Anwendung zeigen lassen.

Kapitel 11 umfasst die Diskussion der Forschungsergebnisse, in deren Rahmen eine kritische Reflektion der Ergebnisse, die Grenzen der Konzepte sowie mögliche Übertragungspotenziale auf andere Anwendungsfälle dargestellt werden. Eine Zusammenfassung inkl. eines ausführlichen Ausblicks auf weiteres Forschungspotenzial (Kapitel 12) schließt die Arbeit ab.

Teil- und Zwischenergebnisse der in dieser Dissertation zusammengefassten Forschungstätigkeiten wurden vom Autor in Form eines Forschungsberichts sowie diverser Konferenz- und Zeitschriftenbeiträge in Teilen vorveröffentlicht. Alle Veröffentlichungen sind in der Übersicht auf Seite 233 aufgeführt. Im Verlauf der Dissertation wird zudem auf die entsprechenden Veröffentlichungen verwiesen, wenn ihnen Teil- und Zwischenergebnisse für das jeweilige Kapitel der Dissertationsschrift entnommen wurden.

2 Grundlagen und Definitionen

In diesem Kapitel werden wichtige Grundlagen und Definitionen gebündelt, die für die Entwicklung des Gestaltungsrahmens für nutzerzentrierte Laststeuerungen sowie die Konzeption und Evaluation konkreter Steuerungsalternativen notwendig sind. Dem iterativen Prozess zur nutzerzentrierten Gestaltung aus DIN ISO 9241 folgend, dient dieser Abschnitt dem *Planen des nutzerzentrierten Gestaltungsprozesses* sowie dem dafür notwendigen *Verstehen und Festlegen des Nutzungskontexts*. Einige Inhalte dieses Kapitels wurden vom Autor bereits in [Fot-2020; Top-2021b; Top-2021a] veröffentlicht.

2.1 Ergonomische Grundbegriffe

Die Ergonomie als wissenschaftliche Disziplin konzentriert sich auf die Rolle des Menschen innerhalb des Systems und seine Interaktion mit den anderen Systemkomponenten [DIN-26800; DIN-6385]. Ziel der Ergonomie ist es folglich, die Art, wie Menschen aufmerksam sind, wahrnehmen, denken, behalten, entscheiden und handeln zu verstehen und in der Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen zu berücksichtigen. Diese Fokussierung ermöglicht die Verbesserung sowohl der Gesamtleistung des Systems als auch des Wohlbefindens des Menschen [DIN-9241-11].

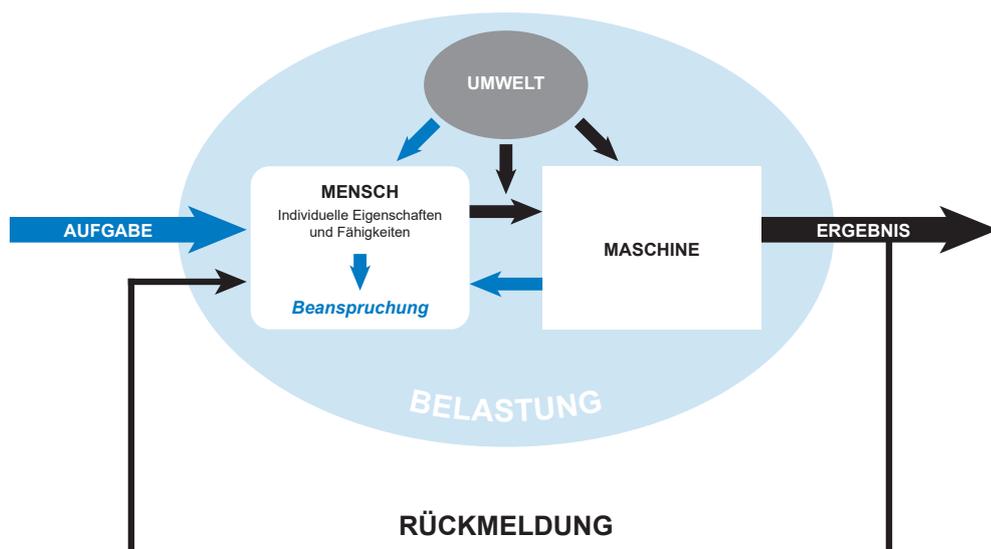


Abbildung 2-1: Der Mensch als Teil des Regelkreises im Belastungs- und Beanspruchungskonzept nach [Rüh-1981]

Auf der Grundlage des Mensch-Maschine-Modells nach Rühmann und Bubb [Rüh-1981] (s. Abbildung 2-1) kann die Interaktion eines Bedieners mit einem technischen System unter Einfluss der umgebenden Umwelt in die wesentlichen Bestandteile Aufgabe, objektive Belastung, subjektive Beanspruchung (unter Berücksichtigung der Eigenschaften und Fertigkeiten des Bedieners) sowie Ergebnis und Rückmeldung untergliedert werden. Der Mensch interagiert dabei mit dem System, um die übergeordnete Aufgabe zu erfüllen. Die Bedeutung des Menschen wird dadurch unterstrichen, dass die Gesamtleistung des Systems vom zuverlässigen Beitrag aller Teilsysteme abhängt. Da der Mensch ein Teilsystem mit hoher Variabilität und geringer Zuverlässigkeit darstellt, sollten die technischen Teilsysteme so gestaltet werden, dass die Interaktion des Menschen mit diesen Komponenten erleichtert wird [Rus-2018]. Die Anpassung des Systems an die Informationsverarbeitung des Menschen ist besonders wichtig, um ein optimal funktionierendes System zu erhalten.

2.1.1 Nutzerzentrierte Gestaltung

„Many human-machine systems do not work as well as they could because they impose requirements on the human user that are incompatible with the way people attend, perceive, think, remember, decide, and act: that is, the way in which people perform or process information.“ [Wic-2000, S. xvii]

Die Gestaltung eines Systems unter Berücksichtigung der Bedürfnisse, Fähigkeiten und des Verhaltens des Menschen wird als nutzerzentrierte Gestaltung oder nutzerzentriertes Design bezeichnet. Es existiert umfangreiche Literatur zu den Grundlagen und der Anwendung von nutzerzentrierter Gestaltung. Zu den Standardwerken gehören die Publikationen von Norman [Nor-2013], Nemeth [Nem-2004] und Wickens [Wic-2000]. Die DIN-9241-11 definiert nutzerzentrierte Gestaltung als einen Gestaltungsansatz für interaktive Systeme, der Methoden und Techniken aus der Ergonomie mit dem Schwerpunkt der Gebrauchstauglichkeit (engl: usability) nutzt, um das System benutzerfreundlicher zu gestalten [DIN-9241-11]. Der Entwurfsprozess sollte auf einem tiefgreifenden Verständnis des Menschen, seiner Aufgabe und seiner Arbeitsumgebung basieren und die gesamte Erfahrung des Menschen bei der Interaktion mit dem technischen System berücksichtigen [DIN-9241-210]. Zur gesamten Erfahrung gehören die sensorische Wahrnehmung, die kognitive Verarbeitung und die motorische Handlung des Menschen. Ein erfolgreicher nutzerzentrierter Designprozess stärkt die menschlichen Qualitäten in der Interaktion [DIN-9241-11]. Messbar schlägt sich dies in der Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit nieder.

2.1.2 Gebrauchstauglichkeit

Die DIN EN ISO 9241 definiert Gebrauchstauglichkeit als „Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nut-

zungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ [DIN-9241-11]. Abhängig von dem System/Produkt bzw. der Dienstleistung, die genutzt wird, kann die Gebrauchstauglichkeit für bestimmte Benutzer in einem bestimmten Kontext erfasst werden. Nur im Zusammenspiel der drei Dimensionen Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung kann von guter Gebrauchstauglichkeit gesprochen werden (vgl. Tabelle 2-1) [Fro-2000].

Tabelle 2-1: Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit nach [DIN-9241-11]

Effektivität	Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen
Effizienz	im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzter Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen
Zufriedenstellung	Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellungen gegenüber der Nutzung des Produkts, Abwesenheit von Frustration

Zum Erreichen dieser Ziele existieren grundsätzliche Empfehlungen zur Gestaltung von HMIs. Die VDI 3850-1 nennt drei Gestaltungsbereiche, die einen Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit haben und sich zudem untereinander beeinflussen können: die Aufgabengestaltung, die Dialoggestaltung sowie die Informationsgestaltung innerhalb des Dialogs (siehe Abbildung 2-2) [VDI-3850-1]. Zur Gestaltung und Bewertung eines Dialogs, also der Interaktion von Mensch und Maschine, haben sich die sieben Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241 etabliert, die in Tabelle 2-2 aufgeführt sind. DIN 894-1 greift diese Grundsätze auf und definiert sie als „Gestaltungsleitsätze für Operator-Aufgaben-Beziehungen“ und folglich als zentrale ergonomische Grundsätze, die bei der Gestaltung eines Mensch-Maschine-Systems zu berücksichtigen sind [DIN-894-1, S. 4 ff.]. DIN 92419 erweitert den Anwendungsbereich der Grundsätze der Dialoggestaltung explizit auf die ergonomische Gestaltung assistiver Systeme [DIN-92419, S. 5].

Eine mangelnde Gebrauchstauglichkeit kann verhindern, dass der Bediener das vorgegebene Ziel erreicht oder das System überhaupt nutzt, während eine besonders hohe Gebrauchstauglichkeit einen Wettbewerbsvorteil für das Produkt darstellen kann. Die Gebrauchstauglichkeit des Systems kann sich auch auf die anderen nutzerzentrierten Qualitäten auswirken, da eine hohe Gebrauchstauglichkeit das System für potenzielle Bediener zugänglicher macht, das Bedienererlebnis verbessert und Risiken, die mit der Nutzung des Systems verbunden sind, reduziert [DIN-9241-11].

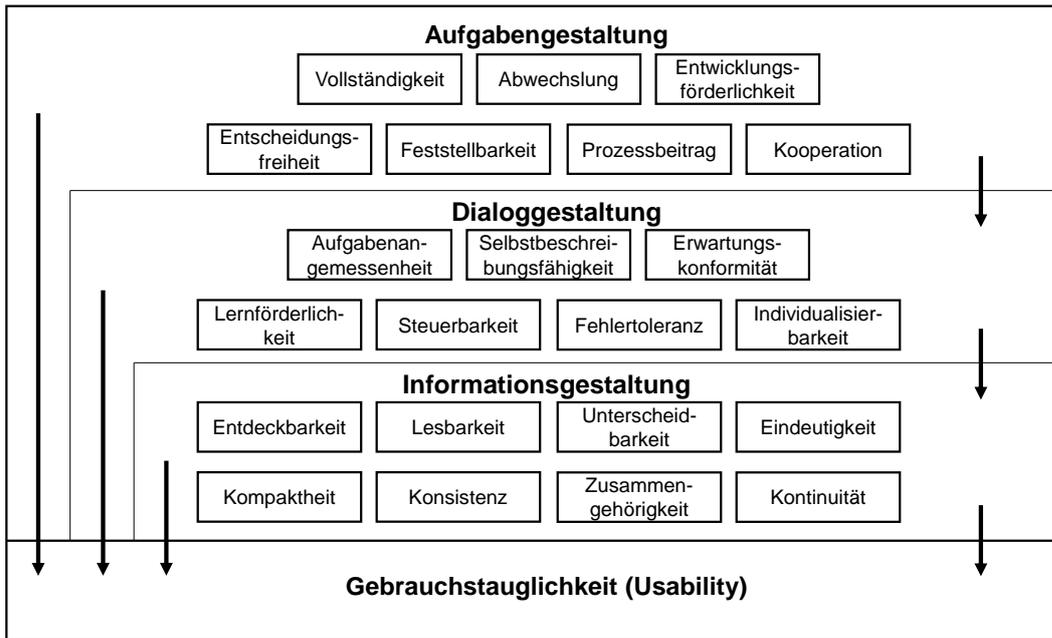


Abbildung 2-2: Zusammenhang der Prinzipien zur Gestaltung von Benutzungsschnittstellen mit der Gebrauchstauglichkeit, adaptiert aus [VDI-3850-1]. Pfeile signalisieren einen Einfluss eines Gestaltungsprinzips (Startpunkt des Pfeils) auf ein anderes (Zielpunkt)

Tabelle 2-2: Die sieben Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110 [DIN-9241-110]

Aufgabenangemessenheit	Ein interaktives System ist aufgabenangemessen, wenn es den Benutzer unterstützt, seine Arbeitsaufgabe zu erledigen, d. h. wenn Funktionalität und Dialog auf den charakteristischen Eigenschaften der Arbeitsaufgabe basieren, statt auf der zur Aufgabenerledigung eingesetzten Technologie.
Selbstbeschreibungsfähigkeit	Ein Dialog ist in dem Maße selbstbeschreibungsfähig, in dem für den Benutzer zu jeder Zeit offensichtlich ist, in welchem Dialog bzw. an welcher Stelle im Dialog er sich befindet, welche Handlungen unternommen werden können und wie diese ausgeführt werden können (vgl. auch [Göt-2007]).
Erwartungskonformität	Ein Dialog ist erwartungskonform, wenn er den aus dem Nutzungskontext heraus vorhersehbaren Benutzerbelangen sowie allgemein anerkannten Konventionen entspricht.
Lernförderlichkeit	Ein Dialog ist lernförderlich, wenn er den Benutzer beim Erlernen der Nutzung des interaktiven Systems unterstützt und anleitet.
Steuerbarkeit	Ein Dialog ist steuerbar, wenn der Benutzer in der Lage ist, den Dialogablauf zu starten sowie seine Richtung und Geschwindigkeit zu beeinflussen, bis das Ziel erreicht ist.
Fehlertoleranz	Ein Dialog ist fehlertolerant, wenn das beabsichtigte Arbeitsergebnis trotz erkennbar fehlerhafter Eingaben entweder mit keinem oder mit minimalem Korrekturaufwand seitens des Benutzers erreicht werden kann.
Individualisierbarkeit	Ein Dialog ist individualisierbar, wenn Benutzer die Mensch-System-Interaktion und die Darstellung von Informationen ändern können, um diese an ihre individuellen Fähigkeiten und Bedürfnisse anzupassen.

Messung der Gebrauchstauglichkeit

Man unterscheidet grundsätzlich drei Arten zur Erhebung der Gebrauchstauglichkeit: Beurteilung, Beobachtung (physiologische oder physikalische Messungen) und Befragung (z. B. mittels Fragebögen). Abhängig von der Art der Erhebung wird zwischen objektiven und subjektiven Maßen differenziert.

Mögliche Ansätze, die Gebrauchstauglichkeit zu beurteilen, sind Expertenevaluationen in Form von Heuristiken [Nie-2010]. Die Heuristiken von Nielsen sind hierfür sicherlich der bekannteste Ansatz [Nie-1994b; Nie-1994a, S. 25-62]. Daneben existiert eine Vielzahl von Alternativen und entsprechende Normen [DIN-9241-110]. Eine weitere Möglichkeit zur Messung der Gebrauchstauglichkeit in Form von Beobachtungen und Befragungen sind Bedienerstudien. Sie können durchgeführt werden, um verschiedene Aufgaben am gleichen HMI, iterative Versionen desselben Systems oder verschiedene Schnittstellentechnologien zu vergleichen oder um vergleichbare Schnittstellen zu bewerten [Ban-2008]. Bedienerstudien können zur Bewertung aller drei Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit eingesetzt werden [Hor-2006]. Der Grad der Zielerreichung wird für jede Dimension separat erfasst. So kann beispielsweise die Effektivität bewertet werden, indem überprüft wird, ob der Bediener eine gegebene Aufgabe erledigen kann, bzw. indem seine Fehlerraten sowie die räumliche und zeitliche Präzision gemessen werden. Die Effizienz wird meist durch Zeitmessungen, Eingaberate und mentale Beanspruchung operationalisiert, während die Zufriedenheit über Interviews oder standardisierte Fragebögen gemessen wird. Gerade letztere haben in der Gebrauchstauglichkeitsforschung große Popularität erlangt, da sie ein effizientes Werkzeug mit hoher Sensitivität sein können. Zu den gängigsten standardisierten Fragebögen gehören der „Post Study System Usability Questionnaire“ [Lew-1995], das „Software Usability Measurement Inventory“ [Kir-1993] und der „SUS (System Usability Scale)“ [Bro-1996; Fin-2006]. Insbesondere der SUS ist Gegenstand zahlreicher weiterführender Untersuchungen [Lew-2009; Lew-2017; Lew-2018] und gilt als gut untersucht.

2.1.3 Intuitivität

Im alltäglichen Sprachgebrauch ist es üblicher, ein Produkt als intuitiv zu bezeichnen, als sich auf seine Gebrauchstauglichkeit zu beziehen. Das Forschungsgebiet der intuitiven Interaktion ist jedoch vergleichsweise jung. Deshalb existiert noch keine allgemeingültige Definition des Begriffs *intuitiv*. Betrachtet man die zwei gängigsten Definitionen von Blackler et al. [Bla-2003b; Bla-2007; Bla-2010] sowie der Arbeitsgruppe „Intuitive Use of User Interfaces“ (IUUI) um Mohs, Naumann und Hurtienne [Moh-2006; Nau-2007], lässt sich folgende Aussage ableiten:

Intuitivität ist das Ergebnis der unbewussten Anwendung von Vorwissen während der Interaktion eines Menschen mit einem bestimmten System.

Die un(ter)bewusste Anwendung von bereits vorhandenem Wissen ermöglicht es dem Bediener, sich auf seine Aufgabe zu konzentrieren, anstatt geistige Anstrengung in das Verständnis der Systemschnittstelle zu investieren (vgl. auch [Ull-2014, S. 15 ff.]). Wenn demnach die Interaktion des Bediener mit einem System von einem ersten Eindruck abhängt, der über unbewusste assoziative Prozesse gebildet wird, kann die Interaktion als intuitiv bezeichnet werden. Folglich wird die Erleichterung intuitiver Interaktionen als eine naheliegende Möglichkeit verstanden, die mentale Beanspruchung des Bediener zu reduzieren [Nau-2007; Ull-2014, S. 19]. Basierend auf der Definition von Intuitivität haben Naumann et al. [Nau-2007] das Kontinuum des Wissens (engl: continuum of knowledge) entwickelt, wie es in Abbildung 2-3a dargestellt ist.

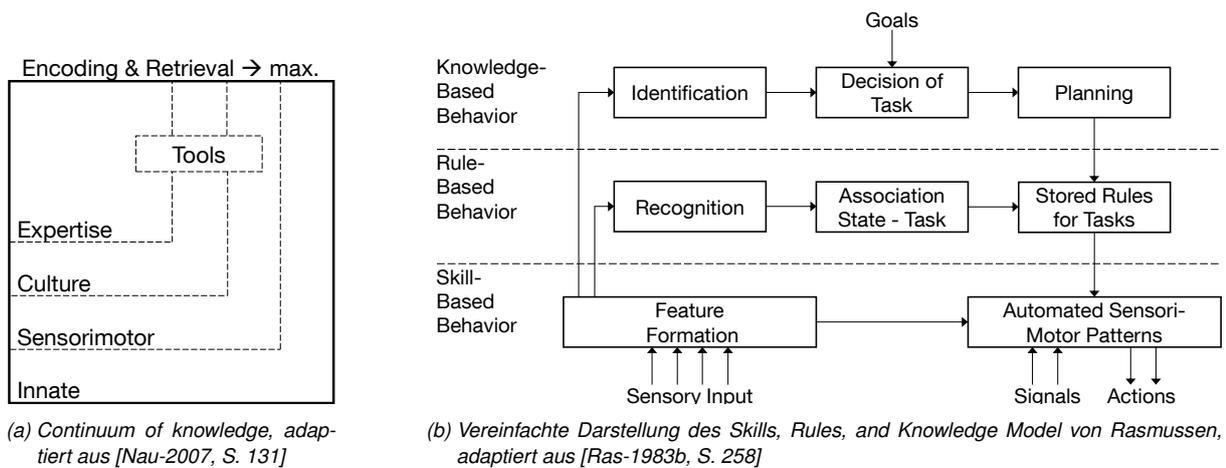


Abbildung 2-3: Modelle zum Vergleich verschiedener Interaktionsebenen.

Beim Kontinuum des Wissens handelt es sich um ein Modell zur Unterscheidung von Klassen von bereits vorhandenem Wissen, das – abhängig vom Kontext und dem Bediener – intuitive Interaktion ermöglicht. Das Kontinuum beginnt mit angeborenem Wissen (innate), das auf der Genaktivierung im pränatalen Stadium beruht. Die beiden folgenden Ebenen Sensomotorik und Kultur unterscheiden zwischen Wissen, das universell in der frühen Kindheit erworben wird oder das von der Kultur abhängt, in der ein Mensch aufgewachsen ist. Die komplexeste Wissenssebene wird als Expertise bezeichnet und wird während der Schul- und Berufsausbildung erworben. Indem man sich durch das Kontinuum nach unten bewegt, wird die Gruppe von Menschen, die das Wissen besitzt und daher in der Lage ist, die intuitive Interaktion zu erleben, größer und zunehmend heterogener [Bla-2007]. Darüber hinaus ist das Wissen in niedrigeren Wissenssebenen nicht nur mehr unter den Bedienern verbreitet, sondern auch stärker gefestigt, weil es häufiger verwendet bzw. abgerufen wird. Dies führt dazu, dass Menschen sich in Situationen ohne kontextbezogene Vorerfahrung eher auf niedrigere Wissenssebenen verlassen, weil dieses Wissen kontextunabhängig (d. h. beispielsweise ohne Expertenwerkzeuge) anwendbar ist.

Diese Sichtweise auf intuitive Interaktion ermöglicht es, eine Verbindung zu einer der prominentesten Theorien zur Erklärung menschlicher Handlungsweisen herzustellen: dem Re-

gulationsebenenmodell (Skills, Rules, and Knowledge: SRK-Modell) von Rasmussen [Ras-1983b]. Grundsätzlich kann der Mensch ein Signal (sensorischer Input) auf drei Ebenen verarbeiten, um zu einer ausgeführten Reaktion zu gelangen. Diese Verhaltensebenen werden in der Komplexität ihrer Verarbeitung und den damit benötigten kognitiven Ressourcen aufsteigend als fertigkeitbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten bezeichnet (s. Abbildung 2-3b) [Ras-1983b]. Je seltener und komplexer eine spezifische Reiz-Reaktionsfolge also ist, desto schwieriger ist sie für den Menschen zu bewältigen und umso mehr kognitive Ressourcen werden beansprucht.

In unbekanntem Situationen ist wissensbasiertes Verhalten gefragt. Der Mensch muss die relevanten Parameter der Situation identifizieren und anhand dieser Informationen ein Aufgabenziel definieren. Er muss dann eine Aufgabenregel entwickeln, die es ihm ermöglicht, das gesetzte Ziel zu erreichen. Wenn eine Situation schon einmal erlebt wurde, muss der Mensch die Wiederholung erkennen und die bereits gebildete Aufgabenregel ausführen. Dies wird als regelbasiertes Verhalten bezeichnet. Beim fertigkeitbasierten Verhalten schließlich ist das Handlungsmuster für die Situation bereits verinnerlicht, so dass es automatisch aktiviert wird, wenn der Mensch mit den entsprechenden Bedingungen konfrontiert wird. Fertigkeitbasiertes Verhalten setzt in der Regel erhebliche Erfahrung in der jeweiligen Aufgabe voraus.

Überträgt man diese Erkenntnisse auf das Modell der intuitiven Interaktion, so kann durch die unbewusste Anwendung von bereits vorhandenem Wissen aus einer anderen Situation oder einem Systemzustand die Phase des wissensbasierten Verhaltens übersprungen werden. Stattdessen werden Regeln aus anderen Situationen angewendet oder sogar automatisch (unbewusst) aktiviert, was zu regelbasierten oder fertigkeitbasierten Interaktionen führt. Diese Beziehung zwischen den regel- und fertigkeitbasierten Ebenen des Regulationsebenenmodells und intuitiven Interaktionen gilt unter Forschern als hinreichend etabliert [Bla-2003a; Nau-2007]. Sie hebt den Vorteil intuitiver Interaktionen hervor, indem sie das Erlernen der Interaktion mit einem System erleichtern. Intuitivität ist folglich eine Eigenschaft der Interaktion und nicht des Systems an sich. Das Systemdesign kann intuitive Interaktionen erleichtern, aber nicht sicherstellen, da intuitive Interaktion immer auch vom Bediener abhängt, der mit dem System interagiert. Wenn eine Interaktion intuitiv gestaltet werden soll, ist es daher zweckmäßig, das System so zu gestalten, dass möglichst alle Bediener die Interaktion durch unbewusstes Anwenden von bereits vorhandenem Wissen verstehen. Hierbei helfen u. a. die bereits genannten Empfehlungen zur Gestaltung gebrauchstauglicher Systeme (vgl. Abschnitt 2.1.2).

Messung von Intuitivität

Zur Messung von Intuitivität existieren subjektive und objektive Mittel. Beispiele für standardisierte subjektive Maße für Intuitivität sind die Checkliste „Evaluate Intuitive Use“ [Moh-

2006], der „Questionnaire for the Subjective Consequences of Intuitive Use“ [Nau-2010] und der „User Technology Familiarity Questionnaire“ [Bla-2010]. Die Checkliste „Evaluate Intuitive Use“ fragt den Teilnehmer nach der wahrgenommenen Mühelosigkeit der Interaktion, der wahrgenommenen Fehlerquote, der wahrgenommenen Erreichung der definierten Ziele und dem wahrgenommenen Lernaufwand. Der „User Technology Familiarity Questionnaire“ verwendet die drei letztgenannten dieser vier Kriterien und fügt Subskalen für mentale Beanspruchung und Vertrautheit hinzu. Im Vergleich dazu besteht der Ansatz des „User Technology Familiarity Questionnaire“ darin, die Vorerfahrung der Teilnehmer mit ähnlichen Benutzeroberflächen zu untersuchen, wobei eine höhere Vertrautheit mit einem höheren Potenzial für intuitive Interaktionen verbunden ist.

Soll Intuitivität objektiv erfasst werden, muss auf Kriterien der Verhaltensebene zurückgegriffen werden. Sehr häufig wird dafür die zur Aufgabenerfüllung benötigte Zeit genutzt. Die Nutzung von bereits vorhandenem Wissen ohne die Notwendigkeit einer bewussten kognitiven Kontrolle sollte schnellere Interaktionen im Vergleich zu bewussteren kognitiven Prozessen ermöglichen. Allerdings muss eine schnelle Interaktion nicht gleichbedeutend mit einer intuitiven Interaktion sein, so dass es notwendig ist, die Bewertung der Zeit durch zusätzliche Maße zu ergänzen [Bla-2015]. Die Konsequenz einer intuitiven Interaktion ist eine höhere mentale Effizienz, d. h. eine Reduzierung der mentalen Beanspruchung des Bedieners. Eine Interaktion ist demnach intuitiv, wenn die Anforderungen an die kognitiven Ressourcen minimal sind, auch wenn sie einen höheren Aufwand in anderen Dimensionen (z. B. Zeit) verursachen [Nau-2007, S. 134]. Daher ist die Messung der mentalen Beanspruchung des Bedieners eine bewährte Methode, um intuitive Interaktionen zu erkennen. Zur objektiven Messung der mentalen Beanspruchung stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.1.6), die letztendlich in Kombination mit Messgrößen der Verhaltensebene (z. B. Zeit zur Aufgabenerfüllung) zur indirekten (aber objektiven) Messung von Intuitivität verwendet werden können.

2.1.4 Mentale Modelle

Um zu erklären, wie Menschen vorhandenes Wissen nutzen, um Aufgaben zu bewältigen, verwenden Forscher häufig das Konstrukt der mentalen Modelle. Kommt es zur Interaktion mit komplexen technischen Systemen, bildet der Mensch hiervon eine abstrakte Repräsentation, die das Verständnis dieser Systeme erleichtern und den Umgang mit ihnen im Alltag vereinfachen soll [Joh-1983]. Ein mentales Modell stellt ein strukturelles Modell dar, das bestimmt, wie und ob Umgebungshinweise verarbeitet und Informationen in das Verständnis des Menschen von seiner Umgebung integriert werden [Van-1996]. Mentale Modelle sind eine interne Repräsentation des erwarteten Verhaltens eines externen Prozesses.

Durch die Bildung eines mentalen Modells kann der Bediener lernen, wie er mit einem neuen System interagieren kann, indem er die Reaktionen des Systems versteht und vorher-

sagen kann [Car-1987; Gre-2000]. Daher sind mentale Modelle in der Regel unvollständig und unterliegen Veränderungen, die von den bisherigen Erfahrungen des Bedieners mit dem System abhängen. Ein unzureichendes mentales Modell des Systems veranlasst den Bediener, falsche oder unnötige Aktionen durchzuführen, was zu einer steigenden mentalen Beanspruchung durch den zusätzlichen Aufwand und unerwartete Systemreaktionen führt [DIN-10075-2]. Darüber hinaus umgehen vorhandene mentale Modelle die Notwendigkeit, neuartige Systeme von Grund auf erlernen zu müssen, da sie eine Struktur für die Integration neuer Informationen in bereits vorhandene Wissensstrukturen bieten. Dies ermöglicht einen effizienteren Lernprozess, der nachweislich zu einer schnelleren Informationsverarbeitung und einer höheren Leistung führt [Kie-1984]. Für die meisten Systeme wird das mentale Modell des Bedieners nicht ein einziges Modell sein, das alle Systemreaktionen unter allen möglichen Bedingungen erklärt. Stattdessen kann der Mensch mehrere mentale Modelle entwickeln, die zum Systemverhalten unter verschiedenen Umständen passen. Das Verständnis des mentalen Modells des Bedieners ist ein wichtiger Ansatz, um zu verstehen, warum der Bediener auf eine bestimmte Weise mit einem System interagiert, und um Wege zu finden, wie die Leistung des Mensch-Maschine-Systems verbessert werden kann [Nor-1983]. Ein gutes, der Aufgabe angemessenes mentales Modell ist eine wichtige Grundlage für eine geringe mentale Beanspruchung und damit eine effiziente Interaktion [Nor-1983].

Mentale Modelle können jedoch nicht als eine homogene Gruppe von internen Repräsentationen betrachtet werden, die das Wissen des Bedieners strukturieren. Forscher haben versucht, verschiedene Arten von mentalen Modellen zu unterscheiden, die unterschiedlichen Anforderungen genügen. Die wichtigste Eigenschaft eines klassischen Modells ist, dass es die mentale Simulation des Systemverhaltens ermöglicht [Gre-2000]. Diese klassischen mentalen Modelle lassen sich weiter differenzieren in Surrogate-Modelle, Metaphern, Glas-Box-Modelle und Netzwerkdarstellungen [Car-1987]. Surrogate-Modelle bilden die Beziehungen zwischen Eingabe und Ausgabe des Zielsystems genau ab, ohne dass sie eine perfekte Darstellung der Funktionsweise der Vorgänge innerhalb des Systems erfordern. Metaphern stellen einen direkten Vergleich mit den Funktionsprinzipien eines anderen, vergleichbaren Systems her. Glas-Box-Modelle sind eine Kombination aus beidem, da sie mehrere Metaphern verwenden, um die Fähigkeiten eines Surrogate-Modells bei der genauen Anpassung der Systemreaktionen an Bedienereingaben zu erreichen. Netzwerkdarstellungen schließlich kombinieren mögliche Systemzustände und die Möglichkeiten des Bedieners, zwischen ihnen zu wechseln.

Im Gegensatz zu solchen aufwendigen internen Repräsentationen des Zielsystems gibt es vereinfachte Modelle, die Young als Task-Action-Mappings definiert [You-2014]. Im Gegensatz zu klassischen mentalen Modellen enthalten Task-Action-Mappings kein umfangreiches Wissen darüber, wie ein System funktioniert. Stattdessen speichern sie die konkreten Aktionen, die erforderlich sind, um eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen. Sie setzen also – im

Gegensatz zu den Surrogate-Modellen – nicht die Eingabe in Verbindung mit der Ausgabe (interaktionsbasierte Betrachtung), sondern verbinden die Aufgabe des Bedieners mit der zum Lösen der Aufgabe notwendigen Aktion (aufgabenorientierte Betrachtung).

Ob ein Task-Action-Mapping oder ein klassisches mentales Modell für den Bediener vorteilhafter ist, hängt von der Anwendung ab. Beispielsweise ist ein klassisches mentales Modell besser geeignet, um zu erklären, warum sich ein System unter ungewöhnlichen Umständen auf eine bestimmte Art und Weise verhält, da ein Task-Action-Mapping keine Erklärung der Funktionsprinzipien des Systems liefert. In diesen Situationen des wissensbasierten Verhaltens ist das detaillierte mentale Modell notwendig, um neue Erkenntnisse zu generieren, z. B. durch die Entwicklung neuer Zusammenhänge, die zur aktuellen Situation passen. Da sich das klassische mentale Modell jedoch ausschließlich auf die allgemeinen Funktionsprinzipien des Systems konzentriert, fehlt ihm die direkte Anwendbarkeit für spezifische Aufgaben. In dieser Hinsicht unterscheidet es sich von einem Task-Action-Mapping, dessen Hauptziel es ist, die Aktionen zu speichern, die zur Bewältigung einer bestimmten Aufgabe erforderlich sind.

Folglich begünstigen Task-Action-Mapping die Auswahl der korrekten Handlung bei leistungsorientierten Aufgaben durch regel- oder fertigkeitbasiertes Verhalten [You-2014; Ras-1983a]. Nach Young [You-2014] ist das elaborierte mentale Modell unter diesen Bedingungen praktisch irrelevant. Alles in allem hängt die Antwort auf die Frage, welche Art von mentalem Modell durch das Systemdesign ermöglicht werden sollte, von der Art der Aufgaben ab, mit denen der Bediener regelmäßig konfrontiert wird. Wenn man dem Bediener ermöglicht, durch ein detailreiches mentales Modell ein tiefes Verständnis des Systems zu entwickeln, kann er leichter mit neuartigen Anwendungsfällen oder Fehlfunktionen umgehen, während konsistente Task-Action-Mappings für die Interaktion im alltäglichen Gebrauch von großem Nutzen sind [You-2014].

Konkret bedeutet dies, dass sich Nutzer häufig nicht bewusst sind, wie ein System tatsächlich funktioniert. Ihre Interaktion basiert viel mehr alleinig auf dem ihnen eigenen mentalen Modell. Hierbei ergibt sich die Aufgabe an die Interaktionsgestaltung, das mentale Modell der Nutzer möglichst genau in der Mensch-Maschine-Schnittstelle abzubilden, so dass die Übertragung vom mentalen Modell auf die Realität einfach möglich wird [Fit-1953]. Grundsätzlich vereinfacht werden können solche Übertragungen durch Berücksichtigung von Kompatibilitätsprinzipien [Zha-2011].

2.1.5 Kompatibilität

Kompatibilität ist definiert als das Ausmaß des Umkodierungsaufwands bei der menschlichen Informationsverarbeitung, wobei eine niedrige Kompatibilität einem hohen Kodierungsaufwand entspricht [Sch-1993]. Es ist daher naheliegend, Schnittstellen mit hoher Kompatibilität anzustreben.

In den 1950er Jahren zeigten Fitts und Seeger, dass die räumliche Übereinstimmung zwischen einem Satz visueller Reize und einem Satz manueller Antwortelemente sowohl die Geschwindigkeit als auch die Genauigkeit der Reaktionen der Teilnehmer beeinflusst: Je höher die räumliche Entsprechung ist zwischen den Reizen (Stimuli) und den Antwortelementen (Response-Elemente), desto besser sind die Leistungen der Teilnehmer [Fit-1953]. Die beobachteten Effekte werden als räumliche Stimulus-Response-Kompatibilität (SR-Kompatibilität) bezeichnet. In einem zweiten Experiment verwendeten Fitts und Deininger nur eine entsprechende Anordnung, manipulierten aber die Paarungen zwischen den Stimuli und den Response-Elementen [Fit-1954]. Sie kamen zu dem Schluss, dass die Voraussetzungen für SR-Kompatibilität erstens kongruente Stimulus- und Response-Sets und zweitens kongruente Paarungen zwischen den einzelnen Stimuli und Response-Elementen sind. Heute werden diese beiden Bedingungen nach Kornblum et al. [Kor-1990] üblicherweise als Set-Level-Kompatibilität und Element-Level-Kompatibilität bezeichnet. Darüber hinaus entwickelten Kornblum et al. ein allgemeines Modell zur Beschreibung der SR-Kompatibilität [Kor-1990]. Ihnen zufolge basiert die Set-Level-Kompatibilität darauf, dass Stimuli und Response-Elemente in einer gemeinsamen Dimension variieren, die als Dimensionsüberlappung bezeichnet wird. Als Beispiel für die Dimensionsüberlappung könnten Stimuli und Response-Elemente beide in einer geraden horizontalen Linie angeordnet sein (s. auch [Umi-1990, S. 111], für multidimensionale Stimuli vgl. [Gar-1970]). Element-Level-Kompatibilität liegt vor, wenn Stimuli und Response-Elemente auf der Basis ihrer Ebene in der gemeinsamen Dimension übereinstimmen. Beispielsweise bedeutet dies, dass das Antwort-Element, das sich ganz rechts auf der horizontalen Linie befindet, mit dem ganz rechten Stimulus-Element gepaart werden sollte und so weiter.

Die Berücksichtigung von Kompatibilitätsprinzipien hat einen erheblichen Einfluss auf die menschliche Informationsverarbeitung. Diese kann in drei Stufen unterteilt werden: Stimulusidentifikation, Reaktionsauswahl und motorische Ausführung (vgl. [Pro-1990]). Der Effekt der SR-Kompatibilität wird der Stufe der Reaktionsauswahl zugeschrieben. Ein populäres Modell zur Erklärung der beobachteten Effekte, die sich aus der Berücksichtigung bzw. Nichtberücksichtigung von Kompatibilität ergeben, ist das duale Prozessmodell (Dual Process Model), das zwei Wege der Reaktionsauswahl unterscheidet [Kor-1990]. In diesem Modell basiert der erste Weg auf der bewussten Identifikation des präsentierten Reizes und der anschließenden bewussten Auswahl der gewünschten Antwortalternative (unterer Zweig in Abbildung 2-4). Der zweite Weg beschreibt die automatische (d. h. unbewusste) Aktivierung einer Reaktion bei Wahrnehmung des Reizes, unabhängig davon, ob sie in der aktuellen Situation richtig ist oder nicht (oberer Zweig in Abb. 2-4). Unbewusste Verarbeitung ist ein wesentlicher Parameter intuitiver Interaktion.

Abbildung 2-4 illustriert, wie das duale Prozessmodell auf SR-Kompatibilitätsparadigmen angewendet werden kann. Wenn keine dimensionale Überlappung zwischen den Stimulus- und Response-Sets besteht, verwendet der Mensch nur den bewussten Verarbeitungsweg,

was zu vergleichsweise langsamen Reaktionen führt. Im Gegensatz dazu ermöglicht das Vorhandensein von Set-Level-Kompatibilität auch den automatischen Verarbeitungsweg, und die Antwort, die mit dem präsentierten Stimulus kompatibel ist, wird aktiviert [Pro-1997]. Im Fall der Element-Level-Kompatibilität führen die beiden Verarbeitungswege zu kongruenten Antworten, was ebenfalls zu schnelleren Reaktionen führt.

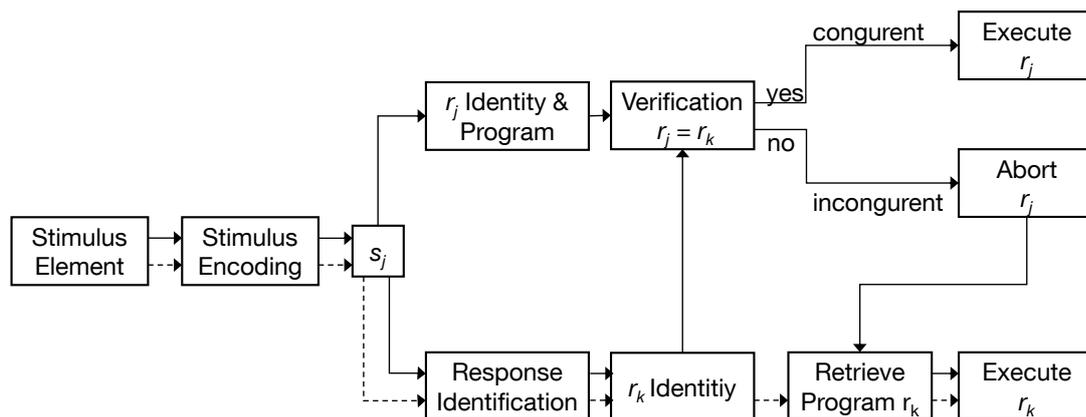


Abbildung 2-4: Dual Process Model für SR-Kompatibilitätstasken mit dimensionaler Überlappung zwischen Stimulus und Response (durchgezogene Linien) und ohne dimensionale Überlappung zwischen Stimulus und Response (gestrichelte Linien). Der obere Ast zeigt den automatischen (unbewussten) und der untere Ast den bewussten Verarbeitungsweg. Adaptiert aus [Kor-1990, S. 257]

Ein weiterer Kompatibilitätseffekt wird als Response-Effect-Kompatibilität (RE-Kompatibilität) bezeichnet. Im Falle von Response-Effect-Kompatibilität folgt auf die Antwort des Teilnehmers ein Effekt. Die Response-Elemente und Effekt-Elemente sind entweder während einer Lernphase assoziiert oder die Response- und Effekt-Sets haben eine dimensionale Überlappung [Shi-2010]. Daher können Antwort- und Effekt-Paarungen entweder kompatibel oder inkompatibel sein. Mehrere Studien haben gezeigt, dass kompatible RE-Mappings zu schnelleren Reaktionszeiten führen (z. B. [Kun-2001; Kun-2003; Föl-2017]).

Darüber hinaus wird die Kompatibilität auch durch die visuelle Perspektive des Menschen beeinflusst. In den meisten Fällen sind Bedienelemente und die Sicht auf die gesteuerte Strecke aufeinander abgestimmt. Wenn der Bediener jedoch Bedienelemente verwendet, die sich vor ihm befinden, der Kopf aber zur Seite gedreht werden muss, damit die gesteuerte Strecke zu sehen ist, kann die Steuerung nur entweder in einem globalen Bezugssystem mit den Bewegungen der Strecke kompatibel sein (sog. Control-Display-Kompatibilität) oder

in dem Bezugssystem, das durch das Gesichtsfeld des Bedieners definiert ist (sog. Visual-Field-Kompatibilität) [Wor-1998]. Die Experimente von [Wor-1998] zeigten, dass die Bedienleistung stark von der Visual-Field-Kompatibilität, nicht aber von der Control-Display-Kompatibilität beeinflusst wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Berücksichtigung aller Faktoren, die zur Kompatibilität eines HMI beitragen, entscheidend ist, um eine effektive und effiziente Mensch-Maschine-Interaktion zu gewährleisten [Spa-1993]. Idealerweise gestalten sich Interaktionen so, dass SR-Kompatibilität (als Ergebnis von Set-Level- und Element-Level-Kompatibilität), RE-Kompatibilität sowie Visual-Field-Kompatibilität herrschen.

2.1.6 Mentale Beanspruchung

Trotz der Tatsache, dass der Begriff seit den 1970er Jahren verwendet wird, gibt es keine allgemein akzeptierte Definition für das Konstrukt *mentale Beanspruchung*. Das Problem zeigt sich auch durch die Verwendung ähnlicher Begriffe wie kognitive Belastung, kognitive Anstrengung, mentale Anstrengung, psychische Beanspruchung oder emotionale Beanspruchung, die eine genaue begriffliche Trennung vermissen lassen [Lon-2014]. Selbst die internationale Norm zu ergonomischen Grundlagen der psychischen Arbeitsbelastung [DIN-10075-1] liefert keine Definition (für eine Übersicht weiterer Standards vgl. [Nac-1995]). Daher muss das Verständnis von mentaler Beanspruchung auf einem Konsens zwischen verschiedenen Definitionen in der wissenschaftlichen Literatur beruhen.

Die meisten Forscher (Auflistungen finden sich z. B. in [Lon-2014; Cai-2007]) verwenden eine Bedarfs- und Ressourcenbeziehung, um mentale Beanspruchung zu definieren. Dieses Konzept folgt der Annahme, dass die menschliche Kapazität zur Informationsverarbeitung begrenzt ist [Wel-1978]. Folglich können die Anforderungen, die durch verschiedene Aufgaben gestellt werden, einen unterschiedlichen Anteil der verfügbaren mentalen Ressourcen verbrauchen und darum konkurrieren (Multiple Resource Theory, vgl. [Wic-1983; Wic-2008; Nav-1979]). Die beiden Faktoren, die zum Empfinden von Arbeitsbelastung beitragen, werden oft als Belastung und Beanspruchung bezeichnet [DIN-10075-1; You-2015]. Der Begriff *Belastung* ist gleichbedeutend mit dem Begriff *externe Anforderungen*. Die *Beanspruchung* setzt die externen Anforderungen in Beziehung zu den verfügbaren Ressourcen. Wenn die Anforderungen die verfügbaren Ressourcen übersteigen, verschlechtert sich die Bedienerleistung.

Basierend auf dieser Ressourcenperspektive lässt sich ableiten, dass die Beziehung zwischen mentaler Beanspruchung und Leistung den in Abbildung 2-5 dargestellten Eigenschaften folgt.⁴

⁴ Die Abbildung zeigt die modifizierte Version dieser Beziehung nach Sharples und Megaw [Sha-2015]. In der ursprünglichen, unmodifizierten Version (zu finden in [Wic-2000]) fehlt z. B. die Erklärung der Unterbeanspruchung.

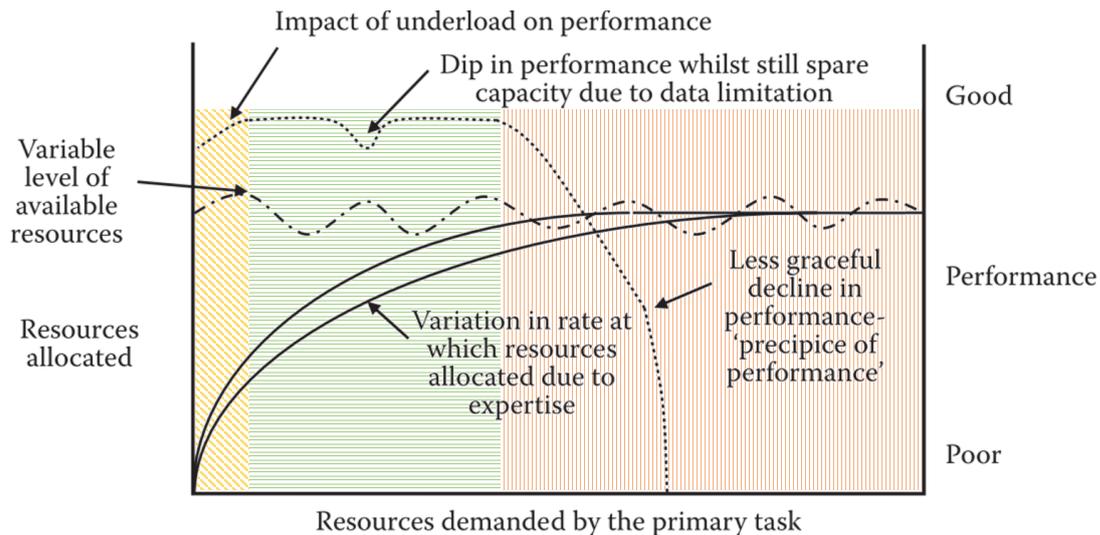


Abbildung 2-5: Zusammenhang zwischen den der Primäraufgabe zugewiesenen Ressourcen (linke y-Achse) und den von der Primäraufgabe geforderten Ressourcen (x-Achse), sowie zwischen der erreichten Leistung (rechte y-Achse) und den von der Primäraufgabe geforderten Ressourcen. Zitiert aus [Sha-2015, S. 521], farbliche Hervorhebungen durch den Autor

Die x-Achse stellt die Ressourcen dar, die von der Aufgabe gefordert werden. Die y-Achse auf der linken Seite zeigt das Aktivierungsniveau, d. h. die Menge der zugeteilten Ressourcen, während sich die y-Achse auf der rechten Seite auf das erreichte Leistungsniveau bezieht. Die Abbildung illustriert den derzeitigen Konsens, dass es einen optimalen Bereich der mentalen Beanspruchung gibt (grün bzw. horizontal schraffiert). Dieser optimale Bereich deckt sich mit der besten Leistung. Innerhalb des optimalen Bereichs kann ein Anstieg der geforderten Ressourcen (Bedarf) durch die Zuweisung zusätzlicher Ressourcen (Kapazität) kompensiert werden. Somit steigt die mentale Beanspruchung als Anteil der verfügbaren Ressourcen, die eingesetzt werden, während die Leistung meist konstant bleibt. Dieser Bereich wird als Reservekapazitätsbereich bezeichnet [You-2015]. Die Region endet, wenn sich die geforderten Ressourcen den maximal verfügbaren Ressourcen nähern. Ab diesem Punkt können zusätzliche Aufgabenanforderungen nicht mehr durch den Einsatz weiterer Ressourcen kompensiert werden, so dass die Leistung sinkt. Dies wird als Überlastbereich bezeichnet (rot bzw. vertikal schraffiert).

Auf der anderen Seite können auch zu geringe Aufgabenanforderungen problematisch sein, da sie zu einer mentalen Unterforderung führen (gelb bzw. diagonal schraffiert). Obwohl eine sehr geringe Ressourcenanforderung im Hinblick auf die Verarbeitungskapazität des Menschen unproblematisch erscheint, ist bekannt, dass eine Unterforderung ähnlich nachteilig für die menschliche Leistung sein kann wie eine Überforderung. Es wird argumentiert, dass die unzureichende Stimulation, die durch Unterforderung verursacht wird, zu einer Verringerung der Aufmerksamkeitsressourcen und zu einer verminderten Erregung führt [Sha-2015]. Das Problem der Unterforderung wird durch die Tatsache verstärkt, dass der Übergang zwischen akzeptabler Beanspruchung und Unterforderung schwieriger zu anti-

zipieren und zu messen ist als der Übergang zwischen akzeptabler Beanspruchung und Überlast [You-2015]. Im Allgemeinen werden sowohl Unterforderung (siehe Abbildung 2-5, gelber bzw. diagonal schraffierter Bereich) als auch Überlast (roter bzw. vertikal schraffierter Bereich) durch ein Missverhältnis zwischen externen Anforderungen und den verfügbaren Ressourcen des Bedieners verursacht. Hinzu kommt, dass die Leistungsverschlechterung im Überlastbereich in der Regel kein linearer Effekt ist, wie Abbildung 2-5 zeigt. Sharples und Megaw [Sha-2015] betonen, dass in der Überlastregion ein kleiner Anstieg der geforderten und verbrauchten Ressourcen eine stark nachteilige Auswirkung auf die Leistung haben kann. In Bezug auf die eingesetzten Ressourcen hängt es von der Qualifikation des Bedieners und dem Automatisierungsgrad des verwendeten technischen Systems ab, wie viel Ressourcen bei einer Erhöhung der Aufgabenanforderungen eingesetzt werden müssen. Darüber hinaus kann der Anstieg des Aufwands geringer ausfallen, wenn zusätzliche Aufgabenanforderungen auf separate Ressourcenpools zurückgreifen, anstatt um dieselben Ressourcen zu konkurrieren.

Neben der direkten Auswirkung auf die Aufgabenleistung hat die mentale Beanspruchung zusätzliche Konsequenzen für den mentalen Zustand des Menschen, die sein Wohlbefinden und seine kognitiven Verarbeitungsfähigkeiten beeinflussen. Eine Variable, die häufig mit mentaler Beanspruchung in Verbindung gebracht wird, ist Stress [Han-2017; Han-2019]. Stress kann die wahrgenommene mentale Beanspruchung erhöhen [Als-2019]. Darüber hinaus ist die mentale Beanspruchung einer der stärksten Prädiktoren für Ermüdung [Gre-2009]. Da der Bediener bei hoher mentaler Beanspruchung bereits über minimale Restressourcen verfügt, wird seine Fähigkeit, auf unerwartete Ereignisse oder Notsituationen angemessen zu reagieren, zusätzlich beeinträchtigt [Sha-2015]. Neben diesen kurzfristigen Effekten, die sich auf die Aufgabenausführung auswirken, kann die anhaltende Erfahrung hoher mentaler Beanspruchung zu langfristigen Beeinträchtigungen der psychischen Gesundheit wie dem Burnout-Syndrom führen [DIN-10075-1].

Messung von mentaler Beanspruchung

Um die mentale Beanspruchung des Bedieners sowie seine verbleibenden Verarbeitungskapazitäten zu beurteilen, ist es notwendig, die mentale Beanspruchung des Bedieners zu messen [Wic-2000]. Die multidimensionale Natur der mentalen Beanspruchung hat zur Entwicklung einer Vielzahl von Messalternativen geführt [You-2015]. Daher ist es für jeden Zweck notwendig, geeignete und zuverlässige Instrumente auszuwählen, die zu der jeweiligen Untersuchung passen. Hierbei wird zwischen vier verschiedenen Messansätzen unterschieden: Erfüllung der Primäraufgabe, Erfüllung einer Sekundäraufgabe, psychophysiologische und subjektive Messungen [DIN-10075-3].

Die bei weitem häufigste Gruppe von Maßnahmen zur Bewertung der mentalen Beanspruchung sind Metriken der primären Aufgabenerfüllung [You-2015]. Sie zeigen die Fähigkeit

des Bedieners an, mit den Anforderungen der Aufgabe umzugehen. Abhängig vom Anwendungsfall können Beispiele für Leistungsindizes die Zeit zur Aufgabenerfüllung, die Anzahl der Fehler, die Anzahl der Steuerungsaktionen oder die mittlere Steuerungsgeschwindigkeit sein [Wic-2000]. Der Vorteil der Messung der primären Aufgabenerfüllung ist, dass sie eine zuverlässige Bewertung der mentalen Beanspruchung im Überlastbereich liefert. Wenn die Anforderungen der Aufgabe die rote Linie der Beanspruchung überschreiten, nimmt die Leistung ab. Daher gelten diese Maße zur Erkennung von Arbeitsbelastungsschwankungen als geeignet. Die primäre Aufgabenerfüllung sollte bei jeder Untersuchung der mentalen Arbeitsbelastung erfasst werden und wird auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet. So gut die Maße der primären Aufgabenerfüllung für die Erfassung der Beanspruchung im Überlastungsbereich geeignet sind, so unzureichend sind sie jedoch für die Messung der mentalen Beanspruchung im Reservekapazitätsbereich, also unterhalb des Überlastbereichs. Hierfür sind andere Messverfahren prädestiniert.

Zur empirischen Messung der mentalen Beanspruchung auch unterhalb des Überlastbereichs existieren sowohl psychophysiologische als auch subjektive Ansätze. Sekundäraufgaben werden nicht betrachtet. Der Zweck von Sekundäraufgaben ist zwar, die Bewertung der primären Aufgabenleistung zu ergänzen, um die Messung der mentalen Beanspruchung im Bereich der Reservekapazitätsregion zu ermöglichen, allerdings interferieren Sekundäraufgaben häufig auf ungünstige Weise mit der Primäraufgabe und verschlechtern dadurch die Beurteilung von Überlastphänomenen durch die Primäraufgabe [Sha-2015]. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt deshalb nur eine Kombination psychophysiologischer und subjektiver Ansätze, um von den jeweiligen Vorteilen der beiden Ansätze zu profitieren. Die Hauptstärke psychophysiologischer Messungen besteht darin, dass sie während des Experiments kontinuierlich angewendet werden können und die meisten von ihnen minimale Interferenzen mit der primären Aufgabe verursachen [Cha-2019b]. Sie können auch eine sensible Bewertung in Situationen liefern, in denen ein variierender Einsatz mentaler Anstrengung oder die Anwendung unterschiedlicher Bedienstrategien die Bewertung über Leistungsmaße und subjektive Bewertungsskalen erschweren. Somit sind sie objektive Methoden, die nicht von der subjektiven Wahrnehmung des Bedieners beeinflusst werden dürfen, sondern die natürliche Reaktion des Bedieners auf die Aufgabe anzeigen [Cha-2019b].

Es existieren verschiedene psychophysiologische Maße für Rückschlüsse von den physiologischen Reaktionen des Bedieners auf seinen mentalen Zustand [Man-2019]. Charles und Nixon geben einen aktuellen Überblick über die verschiedenen Ansätze [Cha-2019b]. Sie unterscheiden zwischen Messungen der elektrischen Hirnaktivität, der elektrokardiographischen Aktivität, des Blutdrucks, der Atmung, hautbasierten Messungen und okularen Messungen. Die Messung der elektrischen Hirnaktivität erfordert jedoch teure und stationäre Geräte [Cha-2019b], und elektrokardiographische Messungen, Blutdruck, Atmung und hautbasierte Messungen besitzen mit den verfügbaren Geräten nicht die erforderliche Emp-

findlichkeit und Auflösung für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit (vgl. [Cha-2019b; Sha-2015]).

Die Messung des Pupillendurchmessers bzw. der -erweiterung (engl.: pupil dilation) als okulare Messmethode hat eine lange Tradition in der Messung der mentalen Beanspruchung (z. B. [Hes-1964; Kah-1966]) und wird als Maß für die Beanspruchung bei kognitiven Aufgaben verwendet (vgl. [Sch-2009]). Der Vorteil von okularen Messungen ist, dass sie nur minimal mit dem Versuchsablauf interferieren, insbesondere wenn sie mit einem aus der Ferne verwendeten Beobachtungsgerät (z. B. kamerabasierter Eye-Tracker) durchgeführt werden. Schwächen von okularen Messungen sind vor allem ihre Empfindlichkeit gegenüber Licht, Luftqualität, Koffein und Drogen [Cha-2019b] sowie ihre Reaktion auf andere kognitive Zustände wie Müdigkeit und emotionalen Stress. Trotz der genannten Schwächen gilt die Messung der Pupillenerweiterung als geeignet, um die mentale Beanspruchung objektiv zu bestimmen, zumal die meisten Schwächen mit einem geeigneten Versuchsdesign behoben werden können. Daher wird sie im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Bezüglich der Grenzen psychophysiologischer Messungen wird z. B. auf [Wic-2000] und [Cha-2019b] verwiesen.

Darüber hinaus ist es üblich, gleichzeitig eine subjektive Messgröße für die mentale Beanspruchung zu erfassen, da die eigene Wahrnehmung des Bedieners den direktesten Einblick in seine mentale Beanspruchung sowohl im Reservekapazitäts- als auch im Überlastbereich ermöglicht. Die am häufigsten verwendeten subjektiven Maße sind standardisierte Rating-Skalen. Der NASA-TLX (NASA Task Load Index) [Har-1988] ist das bekannteste dieser Verfahren [Cai-2007]. Er umfasst sechs Subskalen zur Messung der mentalen Beanspruchung: geistige Anforderungen, körperliche Anforderungen, zeitliche Anforderungen, Leistung, Anstrengung und Frustrationsgrad. Jede der Dimensionen wird mit Punkten von 0 bis 100 bewertet, die anschließend über ein standardisiertes Gewichtungsverfahren miteinander verrechnet werden. Mit einer ungefähren Dauer von sechs Minuten ist der NASA-TLX zudem ein relativ schnelles Messverfahren. Unter Berücksichtigung des Vorschlags, das ursprüngliche Gewichtungsverfahren zu eliminieren (z. B. von [Nyg-1991; Bye-1988]), hat auch der so genannte RTLX (Raw Task Load Index) in der wissenschaftlichen Forschung weite Verbreitung gefunden. Aufgrund seiner in zahlreichen Studien nachgewiesenen Validität kommt der RTLX im Rahmen dieser Arbeit parallel zur objektiven okularen Messung der mentalen Beanspruchung zum Einsatz.

Bei der Messung desselben Konstrukts mit Methoden, die sehr unterschiedliche Ansätze verwenden, besteht eine Möglichkeit, dass unterschiedliche Maße der mentalen Beanspruchung unterschiedliche Ergebnisse liefern. Mit der primären Aufgabenerfüllung, den psychophysiologischen Effekten der Pupillenerweiterung und der subjektiven Messung über den RTLX kommen im Rahmen dieser Arbeit etablierte Messverfahren zum Einsatz, deren Validität in der Literatur schlüssig belegt ist.

2.2 Automatisierungsebenen

Um die Intuitivität zu erhöhen, ist die Berücksichtigung der menschlichen Informationsverarbeitung bei der Gestaltung eines Systems im Einklang mit den Bedürfnissen und Fähigkeiten des Bedieners *eine* Möglichkeit, die Anforderungen an den Bediener zu verringern. Ein alternativer Ansatz besteht darin, bestimmte Anforderungen an die Informationsverarbeitung von vornherein zu eliminieren. Dies ist der Ansatz der Automatisierung. Sie wird zum einen für Aufgaben eingesetzt, die entweder der Mensch nicht ausführen kann, zum anderen um menschliche Leistungsgrenzen zu umgehen bzw. um menschliche Leistung zu ergänzen oder um die Wirtschaftlichkeit und Produktivität zu steigern [Wic-2000; DIN-92419]. Da die Automatisierung – ebenso wie die Umgestaltung des HMI – das Potenzial hat, die Interaktion mit einem System zu verändern und somit die Bedürfnisse und Fähigkeiten des Bedieners besser zu berücksichtigen, kann die Automatisierung auch als ein weiteres Werkzeug der nutzerzentrierten Gestaltung betrachtet werden.

Die verschiedenen Automatisierungslösungen lassen sich danach klassifizieren, welcher Anteil der Aufgaben des Menschen an das System übergeben wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Klassifikation von Endsley und Kaber [End-1999] für Echtzeit-Steuerungssysteme genutzt. Die Klassifikation wurde für eine Vielzahl von kognitiven und motorischen Aufgaben in Bereichen wie Flugsicherung, Flugzeugpiloten, automatisierte Fertigung und Teleoperation entwickelt. Endsley und Kaber verteilen in den vier Funktionen Überwachen, Generieren von Alternativen, Auswählen einer Alternative und Durchführen, die Verantwortung zwischen dem Menschen (H) und dem Rechner (C), um zehn Stufen der Automatisierung zu unterscheiden (s. Tabelle 2-3).

Im Fokus dieser Arbeit stehen die ersten drei Ebenen: Manuelle Steuerung, Aktionsunterstützung (Action Support) und Stapelverarbeitung (Batch Processing). Diese sind wie folgt definiert [End-1999, übersetzt vom Autor]:

1. „Manuelle Steuerung: Der Mensch führt alle Aufgaben aus, einschließlich der Überwachung des Systemzustands, der Generierung von Alternativen, der Auswahl der auszuführenden Alternative (Entscheidungsfindung) und der physischen Umsetzung.
2. Aktionsunterstützung: Auf dieser Ebene unterstützt das System den Bediener bei der Ausführung der gewählten Aktion, obwohl einige menschliche Steuerungsaktionen erforderlich sind. Ein häufiges Beispiel ist ein Teleoperationssystem, das die Steuerung eines Manipulators auf der Grundlage menschlicher Eingaben vorsieht.
3. Stapelverarbeitung: Obwohl der Mensch die auszuführenden Optionen generiert und auswählt, werden sie dann dem System zur automatischen Ausführung übergeben. Die Automatisierung bezieht sich also in erster Linie auf die physische Umsetzung der Aufgaben. Es gibt viele Systeme, die auf diesem (...) Automatisierungsniveau arbeiten, wie z. B. (...) der Tempomat in einem Auto.“

Tabelle 2-3: Automatisierungsebenen für Echtzeit-Steuerungssysteme nach [End-1999]; Verteilung der Aufgaben zwischen Mensch (H) und Rechner (C)

	Monitoring	Generating	Selecting	Implementing
Manual Control	H	H	H	H
Action Support	H/C	H	H	H/C
Batch Processing	H/C	H	H	C
Shared Control	H/C	H/C	H	H/C
Decision Support	H/C	H/C	H	C
Blended Decision Making	H/C	H/C	H/C	C
Rigid System	H/C	C	H	C
Automated Decision Making	H/C	H/C	C	C
Supervisory Control	H/C	C	C	C
Full Automation	C	C	C	C

In Bezug auf den menschlichen Bediener soll die Automatisierung die mentale Beanspruchung reduzieren, indem sie einen Teil der begrenzten kognitiven Ressourcen freisetzt [Wic-2000]. Durch die Verringerung der Aufgabenanforderungen reduziert die Automatisierung die Auswirkungen des Kompetenzgefälles zwischen Experten und Anfängern und entlastet den Anfänger von einer bewussten Informationsverarbeitung [Bai-1978]. Branchenübergreifend besteht dabei wissenschaftlicher Konsens, dass die optimale Lösung bei der Prozessunterstützung aus Mensch *und bzw. mit* Maschine, besteht, um den Herausforderungen von Komplexität und Unsicherheit in verschiedensten Situationen zu begegnen (vgl. hierzu Bengler et al. [Ben-2012], Schmidtler [Sch-2018]).

Der Effekt der Automatisierung auf die mentale Beanspruchung ist jedoch nicht ausschließlich positiv. Wenn automatisierte Systeme ohne Rücksicht auf den Bediener entworfen werden, werden häufig diejenigen Funktionen, die gut verstanden werden, automatisiert, während weniger verstandene und daher potenziell schwierigere Aufgaben dem menschlichen Bediener überlassen werden [Bai-1983]. Übliche Restaufgaben für den Menschen sind die Überwachung des Systems und die Übernahme bei Systemfehlern – Aufgaben, die der Mensch im Allgemeinen nicht besonders gut beherrscht (vgl. [Bub-2015, S. 268; War-2017]). Wenn der Bediener nicht an der Steuerung des Systems beteiligt ist, nehmen sowohl seine Fähigkeiten als auch sein Situationsbewusstsein ab. Dem Konzept der Ressourcenverteilung folgend, reduziert der Bediener die Menge der verfügbaren mentalen Ressourcen, um sie an die Aufgabenanforderungen anzupassen. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wird die Fähigkeit des Bedieners, auf einen plötzlichen Anstieg der Anforder-

rungen, z. B. durch einen Ausfall der Automatisierung, zu reagieren, beeinträchtigt. Dieser Effekt ist in der wissenschaftlichen Literatur unter dem Begriff *Ironie der Automatisierung* bekannt und gut dokumentiert [Bai-1983; End-1999; Kab-2000; War-2017]. Er führt zu einer hohen Wahrscheinlichkeit von menschlichen Fehlern, da es zu einer mentalen Unter- oder Überforderung des Bedieners aufgrund veränderter Verarbeitungsanforderungen kommen kann [You-2002; You-2015]. Um dies zu verhindern, sollte eine nutzerzentrierte Automatisierung den menschlichen Bediener immer in der Kontrollschleife des Mensch-Maschine-Systems behalten [Bil-1997; War-2017; Bub-2015, S. 268]. Eine Alternative wäre, ein Assistenzsystem zu entwickeln, das auch einem nicht-routinierten Bediener den Umgang mit Sonderfällen, die sich zum Beispiel bei Fehlern der Automatisierung ergeben, sicher ermöglicht. Ein Assistenzsystem (Automatisierung) hat so zur Folge, dass weitere Assistenzsysteme notwendig werden können.

2.3 Lasthebemaschinen (Krane)

Lasthebemaschinen kommen in logistischen Prozessen immer dann zum Einsatz, wenn eine Last zwischen zwei Punkten bewegt werden soll und eine Vertikalbewegung für die Bewegung der Last durchzuführen ist. Vertikalbewegungen können nötig sein, um Höhenunterschiede oder Hindernisse auf dem gewünschten Weg zwischen Start- und Zielpunkt zu überwinden. Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird mit dem Begriff Lasthebemittel immer ein Kran bezeichnet. Nach DIN 15001 sind Krane „Fördermittel für unterbrochene Förderung, bei dem die Last an einem Tragmittel (Seil oder Kette) hängt, gehoben, gesenkt und in einer oder mehreren waagrechten Richtungen bewegt werden kann“ [DIN-15001-1]. Krane gehören somit zu den Fördermitteln für Stückgut mit intermittierender Förderung.

Grundsätzlich hat Logistik immer das Ziel, die richtige Menge der richtigen Objekte zur rechten Zeit am richtigen Ort zu den richtigen Kosten mit den richtigen Informationen in der richtigen Qualität bereitzustellen (ursprünglich abgeleitet aus [Plo-1964]). Hierbei kann in vier Grundfunktionen der Logistik unterschieden werden:

1. Transport zur Raumüberbrückung (Fördern und Transportieren)
2. Umschlagen zur Mengenanpassung (Verteilen, Zusammenführen)
3. Lagern zur Zeitüberbrückung
4. Handhaben

Für alle Grundfunktionen können dabei abhängig von Größe und Gewicht der zu transportierenden Objekte Hebemittel notwendig sein.

Darüber hinaus sind Krane unverzichtbare Hilfsmittel in der produzierenden Industrie zum Handhaben schwerer und sperriger Bauteile und Maschinen, im Bauwesen, im straßen-, schienen- und wassergebundenen Güterverkehr (sowohl im Industrie- als auch im Pri-

vatsektor) sowie in der Forstwirtschaft. Sie sind somit wesentliche Ermöglicher für das Transport- und Produktionsumfeld des 21. Jahrhunderts.

Krane lassen sich gemäß DIN 15001 nach der Bauart oder dem Verwendungszweck in verschiedene Kategorien einteilen.

Einteilung nach der Bauart [DIN-15001-1]

- Laufkatzen
- Auslegerkrane und Drehkrane
- Brückenkrane
- Portalkrane
- Wandlaufkrane
- Turmdrehkrane
- Fahrzeugkrane
- Schwimmkrane
- Kabelkrane

Einteilung nach dem Anwendungsbereich [DIN-15001-2]

- Werkstattkrane
- Maschinenhauskrane
- Lagerkrane
- Hüttenwerkskrane
- Walzwerkskrane
- Schmiedekrane
- Vergütekranen
- Baukrane
- Montagekrane
- Hafenkrane
- Wertkrane
- Schiffskrane
- LKW-Ladekrane
- Bergungskrane
- Containerkrane
- Krane für sonstige Aufgaben

Je nach Bauart und Anwendungsbereich können Krane ortsfest oder beweglich sein und im Innen- oder Außenbereich eingesetzt werden. Eine eindeutige Zuordnung bestimmter Bauarten zu festen Anwendungsbereichen ist nur in Einzelfällen sinnvoll. Die Entwicklung und der Einsatz von nutzerzentrierten Kransteuerungen, wie sie in der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden, soll grundsätzlich für alle Krantypen und alle Anwendungsbereiche möglich sein.

3 Stand der Technik und Wissenschaft

3.1 Vorbemerkungen

Eingrenzung des Betrachtungsgegenstands

Dieses Kapitel behandelt den aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft im Bereich Maschineninteraktion. Der Fokus der Darstellung liegt auf Lasthebemaschinen (Kranen) sowie dazu ähnlichen Maschinensystemen, die durch einen menschlichen Bediener gesteuert werden. Als ‚ähnliche Maschinen‘ gelten alle Maschinen, bei deren Bedienung zur Steuerung eines Endeffektors mehrere DOFs berücksichtigt werden müssen. Dieser Umstand resultiert in der Regel in einem erhöhten Regelungsaufwand, der entweder vom Bediener oder von einem Rechner übernommen werden kann. Als Beispiele sind hier zu nennen:

Tabelle 3-1: Maschinensysteme mit hohem Regelungsaufwand bei Steuerung eines Endeffektors

Maschinensystem	Endeffektor	Regelungsaufgabe
Kran	Lastposition (Haken)	Regelung der Gelenke (rotatorische, translatorische DOFs)
Kameradrohnen	Schwerpunktpose	Regelung der Propeller (rotatorische DOFs)
Autobetonpumpen	Endschlauch	Regelung der Gelenke (rotatorische DOFs)
Industrieroboter	Endeffektor-Pose	Regelung der Gelenke (rotatorische DOFs)
Hydraulikbagger, Radlader	Schaufel- bzw. Löffelstellung	Regelung der Gelenke (rotatorische DOFs)
Arbeits-/Hebebühnen	Fahrkorb	Regelung der Gelenke (rotatorische, translatorische DOFs)
Straßenhobel, Planierdraupe	Pose des Planierschilds	Regelung der Gelenke (rotatorische, translatorische DOFs)

Vorgehensweise

Die Betrachtung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik erfolgt in vier Schritten:

1. Basiselemente der Mensch-Maschine-Interaktion: Darstellung der Schritte einer erfolgreichen Interaktion des Bedieners mit der Maschine sowie der Stellgrößen zur Interaktionsgestaltung
2. Interaktionselemente zur Eingabe eines Bedienerwunschs: Überblick über die zur Auswahl stehenden Interaktionselemente

3. HMI für Lasthebemaschinen: Überblick über existierende HMIs sowie die verwendeten Interaktionsparadigmen zum Bewegen von Lasten
4. HMI für ähnliche Maschinensysteme: Überblick über innovative HMIs von Maschinen mit erhöhtem Regelungsaufwand, deren Funktionsweise auf die Steuerung von Maschinen zur Lastmanipulation übertragbar ist, und/oder die bereits heute einen nutzerzentrierten Gestaltungsansatz erkennen lassen

Insbesondere aus dem vierten Schritt wird deutlich, dass Betrachtungen zur nutzerzentrierten Gestaltung nicht auf das Gebiet von Kransteuerungen beschränkt sind. Einerseits existieren bereits Maschinen und Geräte sowohl im industriellen Umfeld als auch im Endverbraucherbereich, deren Interaktionsprinzipien eine Abkehr vom maschinenzentrierten Gestaltungsansatz und dadurch Potenziale erahnen lassen. Diese bereits bekannten Ideen werden hier dargestellt und auf ihre Übertragbarkeit in den Bereich der Kransteuerungen geprüft. Andererseits zeigt sich, dass – über den Fokus dieser Arbeit hinaus – auch Maschinen und Geräte außerhalb des Bereichs ‚Hebemittel‘ existieren, die von den Ergebnissen dieser Arbeit in Zukunft profitieren können.

Dem iterativen Prozess zur nutzerzentrierten Gestaltung aus DIN ISO 9241 folgend, dient dieses Kapitel dem *Planen des nutzerzentrierten Gestaltungsprozesses* sowie dem dafür notwendigen *Verstehen und Festlegen des Nutzungskontexts*.

3.2 Basiselemente der Mensch-Maschine-Interaktion

Die Grundprinzipien der menschlichen Interaktion mit einem technischen System sind in Abbildung 3-1 gesamthaft dargestellt. Im Lauf jeder erfolgreichen Interaktion mit einem technischen System werden alle gezeigten Schritte durchlaufen.

Das Ziel jeder Interaktion ist die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe [VDI-3850-1]. Ausgehend von der vom Bediener zu lösenden Aufgabe (Wunsch) muss diese zunächst von ihm auf die Maschine übertragen werden. Hierfür muss der Bediener die relevanten Umgebungs-, System- und Aufgabeninformationen aufnehmen und filtern (sensorische Perzeption) und anschließend mit Hilfe seines mentalen Modells des technischen Systems abstrahieren (Denken, Problemlösen, Schlussfolgern, Entscheiden). Ein angemessenes mentales Modell hilft ihm dabei, den Wunsch und die zur Umsetzung des Wunschs notwendige Eingabe zu erkennen, da es dabei unterstützt, die Reaktion der Maschine auf seine Eingaben korrekt vorherzusagen. Anschließend erfolgt die Auswahl und Betätigung der notwendigen Interaktionselemente, um der Maschine den Wunsch mitzuteilen (motorische Handlung). Innerhalb der Maschinensteuerung wird durch die Betätigung der Elemente ein entsprechendes Signal (Messgröße) ausgegeben, das mit Hilfe der Steuerungslogik so verarbeitet wird, dass die Aktion der Maschine resultiert, die der Bediener antizipiert hat. Der Bedienerwunsch (und damit die Arbeitsaufgabe) ist erfüllt. Nur bei vollständigem Zusammenspiel

aller Schritte der Interaktion ist eine effiziente, effektive und zufriedenstellende Erfüllung der Arbeitsaufgabe möglich [DIN-6385].

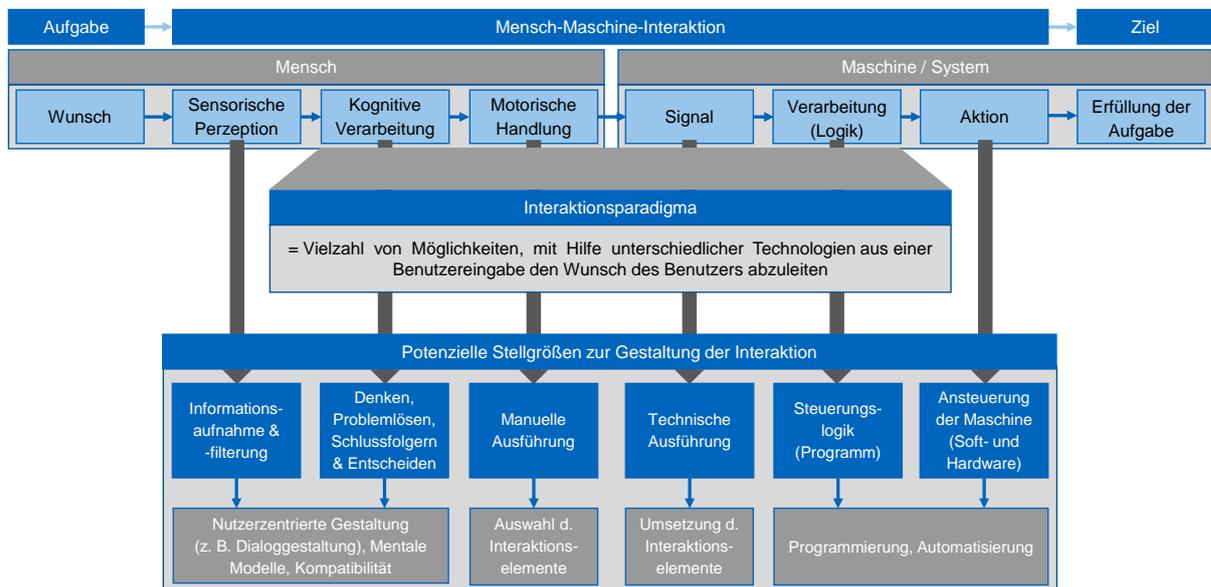


Abbildung 3-1: Schritte und potenzielle Stellgrößen bei der Mensch-Maschine-Interaktion mit dem Ziel, eine Arbeitsaufgabe zu erfüllen (eigene Darstellung)

Die Vielzahl von Möglichkeiten, mit Hilfe unterschiedlicher Technologien aus einer Bedieneringabe den Wunsch des Bedieners abzuleiten, werden im Kontext der vorliegenden Arbeit als Interaktionsparadigmen bezeichnet. Ein Interaktionsparadigma beschreibt folglich die Art und Weise, wie mit einer Maschine über eine Benutzerschnittstelle interagiert wird. Jeder der vier Schritte innerhalb des Interaktionsparadigmas ist eine potenzielle Stellgröße, um die Interaktion durch die *Gestaltung des Systems* zu verbessern. Möglichkeiten zur Vereinfachung der kognitiven Leistung zur Antizipation der Maschinenreaktion sowie die Beschreibung einer Logik, die eine einfache Interaktion unterstützt, sind Gegenstand von Kapitel 5. Als letzte Stellgröße für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion verbleibt die Auswahl des Interaktionselements, das in einer dazu passenden Messgröße resultiert.

3.3 Interaktionselemente zur Benutzereingabe

Abbildung 3-2 zeigt eine Zusammenfassung der zur Verfügung stehenden Interaktionselemente. Die Eingaben können entweder koordinatengebend (ein- oder mehrdimensional) oder nicht-koordinatengebend (i. d. R. Tasten oder Erkennertechnologien) erfolgen.

Alle aufgeführten Interaktionselemente gelten als etabliert. Die Auswahl von möglichst sinnvollen Interaktionselementen ist aufgabenabhängig (vgl. [Rog-2005]) und erfolgt daher im

Rahmen der Gestaltung der Steuerungskonzepte. Als Teil des aktuellen Stands der Technik bilden die dargestellten Elemente eine wichtige Grundlage für den Gestaltungsrahmen und die Ausgestaltung nutzerzentrierter Interaktionsparadigmen.

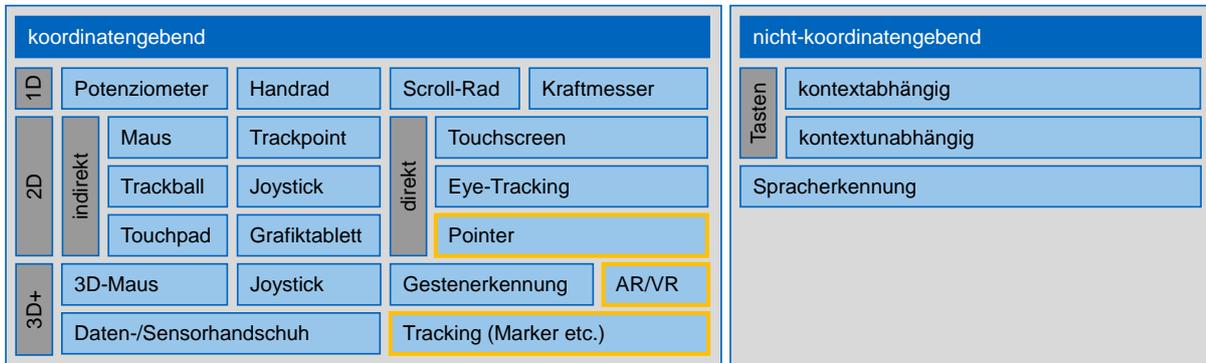


Abbildung 3-2: Interaktionselemente aus [VDI-3850-2] zur Eingabe des Bedienerwunschs (gelb umrahmte Elemente: Ergänzung durch den Autor)

3.4 Mensch-Maschine-Schnittstellen für Lasthebemaschinen in Industrie und Forschung

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über existierende HMIs zum Bewegen von Lasten im Kontext der Kransteuerung gegeben. Einige Inhalte dieses Abschnitts wurden vom Autor bereits in [Fot-2020] veröffentlicht.

3.4.1 Anzahl bewegter Freiheitsgrade der Maschine

Abhängig von der Bauart und dem konkreten Anwendungsfall weisen Lasthebemaschinen (Krane) unterschiedlich viele bewegte Freiheitsgrade (DOFs) auf [DIN-15001-1; DIN-15001-2]. Alle Antriebsbewegungen haben einen direkten Einfluss auf die Position des Hakens, der zur Lastaufnahme dient. Die Haken- bzw. Lastbewegung ergibt sich somit stets als Überlagerung aller Bewegungen der einzelnen DOFs. Im Gegensatz zu Lastmanipulatoren aus der Robotik werden dabei nur diejenigen DOFs angegeben, die einen Einfluss auf die Position der Last (d. h. des Hakens) im Raum $h(x, y, z)$ haben. Die rotatorischen DOFs der Hakenposition (α, β, γ) sowie die Summe aus Positions- und Drehfreiheitsgraden (sog. Pose: $p(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$) ist für Krane in der Regel nicht von Belang, da die Ausrichtung der Last am Haken rein durch die Schwerkraft vorgegeben wird. Es ist normalerweise nicht möglich, die Last am Haken um Achsen zu rotieren, die nicht parallel zur Erdbeschleunigung zeigen. In Tabelle 3-2 ist für einige besonders verbreitete Krantypen und Anwendungsbereiche die typische Anzahl von Bewegungsfreiheitsgraden dargestellt.

Tabelle 3-2: Anzahl der DOFs für ausgewählte Krantypen (eigene Auswertung)

Krantyp	DOFs	
	üblich	Sonderfall
Laufkatzen	2	1
Auslegerkrane, Drehkrane	1-4	
Brückenkrane, Portalkrane	3	2, 4
Wandlaufkrane	3	2
Turmdrehkrane, Fahrzeugkrane	3	4
LKW-Ladekrane	4-7	3
Kabelkrane	2	3

Die Entwicklung und der Einsatz von nutzerzentrierten Kransteuerungen, wie sie in der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden, soll für Krane mit beliebig vielen DOFs möglich sein.

3.4.2 Bedienerkollektiv

Lasthebemittel verschiedenster Art kommen in den unterschiedlichsten industriellen und privatwirtschaftlichen Bereichen zum Einsatz. Das Bedienerkollektiv, also die Zusammensetzung der Bediener aus verschiedenen Bedienergruppen, ist bei Kranen somit stark vom Krantyp und vom Anwendungsfall abhängig. Während in Großbetrieben meistens ein Kranführer speziell für die Kranbedienung geschult und eingesetzt wird, erledigen diese Aufgabe in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) verschiedene, unterschiedlich qualifizierte Mitarbeiter zusätzlich zu ihrer regulären Tätigkeit.

Allgemein lässt sich sagen: Je extremer der Anwendungsfall, je größer der Kran – bezogen auf Hublast, Hubhöhe, Ausladung etc. – und je höher die Umschlagsleistung, desto erfahrener ist in der Regel der Kranbediener. So kommen bei Großkranen (Industrie- und Anlagenbau, Baustellen, Güterumschlag etc.) fast ausschließlich ausgebildete Vollzeit-Kranfahrer zum Einsatz, die speziell für einen Krantyp geschult sind und entsprechende Erfahrung im Umgang mit großen Kranen und schweren Hublasten mitbringen⁵. Insbesondere kurze Hebevorgänge mit niedrigen Lasten (z. B. im Bereich bis einige 100 kg) werden meist von weniger erfahrenen Bedienern als Ergänzung zu ihrer eigentlichen Arbeitstätigkeit durchgeführt (sog. Gelegenheitsbediener), beispielsweise in Werkstätten bzw. werkstattähnlichen Produktionsumgebungen oder im Handwerk. An vielen Stellen kommen auch Bediener ohne Erfahrung (sog. Novizen) in Kontakt mit Kranen, zum Beispiel auf privaten Baustellen oder im Güterverkehr (LKW-Fahrer etc.).

⁵ Zur Ausbildung von Kranfahrern siehe bspw. [Zim-1995].

In Gesprächen mit diversen Industriepartnern [Top-2017; Top-2017b; Top-2018a] aus dem Kranhersteller-, Kranbetreiber und Kranbedienerbereich wird deutlich, dass der Fachkräftemangel auch vor Kranbedienern nicht Halt macht: Es wird zunehmend schwerer, den Bedarf an erfahrenen und gut ausgebildeten Kranfahrern zu decken, da einerseits bedingt durch steigende Produktionsleistungen immer mehr Hebeaufgaben durchzuführen sind. Andererseits werden aufgrund der positiven Arbeitsmarktsituation mit vielfältigen Berufswahlmöglichkeiten nur wenige Personen neu als Kranführer qualifiziert. Dies hat zur Folge, dass die wenigen vorhandenen Experten vorrangig für Großkrane und extreme Umschlagsleistungen eingesetzt werden und somit immer mehr Hebeaufgaben von Gelegenheitsbedienern durchgeführt werden müssen.

Die Entwicklung und der Einsatz von nutzerzentrierten Kransteuerungen soll folglich sowohl für Experten als auch für Gelegenheitsbediener und Novizen eine intuitivere Kranbedienung ermöglichen.

3.4.3 Gestaltung bestehender Kransteuerungen

In der überwiegenden Zahl der Fälle werden Krane manuell gesteuert. Automatisierte Kransysteme finden sich lediglich in wenigen Anwendungsbereichen in Minen oder in der produzierenden Schwerindustrie (Stahlwerke etc.) [Abd-2003], also in Anwendungsfällen, wo gleiche Bewegungszyklen mit schweren Lasten häufig wiederholt werden. Die Vorteile von manuell bedienten Kranen liegen in der hohen Flexibilität und Robustheit bei der Kranbedienung, da der Bediener gleichzeitig steuernde, regelnde und überwachende Funktionen übernimmt. Dies zeigt sich in den drei Kernaufgaben der manuellen Kransteuerung, die der Bediener in diesem Fall hat [Abd-2003]:

- Überwachung des Krans, der Last und der Umgebung,
- Vermeidung von gefährlichen Situationen und Schäden aller Art (auch Personenschäden) durch Sorgfalt und entsprechende Vorkehrungen, und
- Steuerung der Lastbewegung, so dass die gewünschte Trajektorie resultiert.

Um den Bediener optimal in das Mensch-Maschine-System einzubinden, kommt dem HMI bei Kranen eine wichtige Bedeutung zu.

Bestehende manuelle Kransteuerungen sind das Ergebnis vieler Jahrzehnte technischer Entwicklung [Mia-2015]. Die manuelle Steuerung kann gemäß DIN EN 13557 entweder von einem Führerhaus, das fest am Kran verbaut ist, oder von einem flurgebundenen, d. h. tragbaren Steuerpult aus, durchgeführt werden. Das Steuerpult kann dabei entweder über eine Kabelverbindung oder kabellos mit dem Kran gekoppelt sein [DIN-13557].

Aktuelle Kransteuerungen sind als achsbasierte Steuerungen ausgelegt und basieren folglich auf dem Krankoordinatensystem. Das bedeutet, dass die Bewegung eines bestimmten

Steuerelements zu einer Bewegung des zugeordneten einzelnen Freiheitsgrads (d. h. Antriebs) am Kran führt. Die Zuordnung der einzelnen Stellteil-DOFs zu den entsprechenden Kranantrieben erfolgt dabei über Symbole, die neben den Stellteilen auf der Funksteuerung angebracht sind. Die Symbole sind in aller Regel einheitlich für jeden Krantyp vorgegeben (siehe z. B. [DIN-12999] für Ladekrane, vgl. auch Abbildung 1-1). Der Hauptunterschied bei bestehenden Kran-Funksteuerungen aus Sicht des Bedieners liegt in der Gestaltung der Stellteile. Während als Funktionstasten bei allen Kransteuerungen Taster, Stellräder oder berührungsempfindliche Bildschirme zum Einsatz kommen, unterscheiden sich die Stellteile zur Bewegung der Kran-DOFs je nach Hersteller und Krantyp. Die am häufigsten verwendeten Stellteile zur Kranbewegung sind in Abbildung 3-3 dargestellt. Dies gilt sowohl für die Bedienung von einem festen Fahrerplatz (Anordnung der Stellteile um einen Fahrersitz herum, z. B. in einer Kabine) aus als auch für die Steuerung durch bewegte Bediener.



Abbildung 3-3: Bauformen unterschiedlicher Kransteuerungen: Linearhebel (links), Joysticks mit zwei Funktionen (mitte), Drucktaster (rechts), zitiert aus [HBC-2019a]

Ein Linearhebel lässt sich lediglich nach vorne und hinten kippen, während ein Joystick⁶ mit zwei DOFs gleichzeitig nach vorne/hinten und links/rechts bewegt werden kann. Ein Joystick mit drei Funktionen hat zusätzlich zu den beiden DOFs des 2-Funktionen-Joysticks einen Dreh-Freiheitsgrad an der Joystick-Spitze. Üblicherweise werden zur Messung der Auslenkung von Linearhebeln und Joysticks in aktuellen Steuerungen Potentiometer verwendet. Drucktaster besitzen lediglich einen halben Freiheitsgrad, da für die Bewegung eines Kranantriebs in Vor- und Rückwärtsrichtung zwei separate Taster notwendig sind. Grundsätzlich können mehrere Stellteile simultan ausgelenkt werden, was zu gleichzeitigen Bewegungen der Kranantriebe führt.

Die Auswahl der in einem spezifischen Einsatzfall verwendeten Stellteile und damit die Gestaltung der Steuerung ist abhängig vom Krantyp, dem Einsatzmarkt und den Vorlieben der Kranbetreiber und Hersteller. Grundsätzlich lässt sich jedoch jeder Krantyp mit jedem Steuerungstyp steuern, solange die Steuerung genauso viele Bedien-DOFs aufweist wie der Kran Bewegungs-DOFs besitzt.

⁶ Häufig werden Joysticks auch als Meisterschalter bezeichnet.

3.4.4 Kranfunksteuerungen

Funksteuerungen haben gegenüber kabelgebundenen Steuerungen (Mitgängersteuerungen) und gegenüber Steuerungen von einem festen Bedienpult (Kabine) aus eine Reihe von Vorteilen: Neben großer Flexibilität und hohem Bedienerkomfort ergeben sich durch die Verwendung von Funksteuerungen erhebliche Sicherheitsgewinne. Einerseits hat der Bediener die Möglichkeit, seinen Standpunkt frei so auszuwählen, dass er optimale Sicht auf die Last sowie die Transportumgebung hat, um seine Überwachungsfunktion optimal auszufüllen. Andererseits ist er gleichzeitig dazu in der Lage, seinen Standpunkt so anzupassen, dass er möglichst keinen weiteren Gefahren wie Baugruben, anderen Arbeitsprozessen im Umfeld oder Parallelverkehr ausgesetzt ist. Aufgrund der zahlreichen Vorteile können mittlerweile fast alle Krane zumindest optional mit Funksteuerung ausgestattet werden [Mia-2015].

Kabellose Verbindungen werden dabei – abhängig von der gewünschten Reichweite – in der Regel über eine Funk- (große Reichweite: sog. Fernsteuerung) oder Infrarotschnittstelle (kleine Reichweite, zusätzlich ist eine Sichtverbindung notwendig: Mitgängersteuerung) realisiert [Koo-2011, 98 f.]. Selten kommen auch ultraschallbasierte kabellose Verbindungen zum Einsatz. Einen Überblick über etablierte Funksteuersysteme für die Industrie und die notwendigen Grundlagen der Funksteuerung liefert [Bre-2015].

Die Stellteile, die bei Funksteuerungen zum Einsatz kommen, unterscheiden sich nicht gegenüber der Bedienung von einem festen Bedienplatz. Ebenso sind Funksteuerungen heutzutage in aller Regel als achsbasierte Steuerung ausgeführt. Der Hauptunterschied zur Steuerung von einer Kabine aus ist, dass die Stellteile kompakt auf einem tragbaren Eingabegerät (Sender) angeordnet werden.



Abbildung 3-4: HBC-pilot zur Einhand-Steuerung von Kranen und Maschinen, zitiert aus [HBC-2019a]

Eine Ausnahme in der Gestaltung herkömmlicher achsbasierter Steuerungen bildet die Funksteuerung HBC-pilot der Firma HBC-radiomatic [HBC-2019b]. Der HBC-pilot (siehe Abbildung 3-4) besitzt zusätzlich zu zwei Tasterpaaren zur Bewegungssteuerung noch zwei Kipp-DOFs. Durch Kippbewegungen der Funksteuerung in verschiedene Richtungen können zwei zusätzliche Antriebe angesteuert werden. Auch in diesem Fall handelt es sich

jedoch um eine klassische achsbasierte Steuerung. Eine gleichzeitige, kombinierte Bewegung mehrerer Kran-DOFs durch Betätigung eines einzelnen Stellteils ist nicht möglich.

Im Rahmen der Entwicklung nutzerzentrierter Interaktionskonzepte soll nicht nur der Sender zur Eingabe des Bewegungswunschs betrachtet werden, sondern es werden im Sinne eines ganzheitlichen Interaktionsparadigmas alle in den Prozess eingebundenen Komponenten miteinbezogen. Abbildung 3-5 zeigt zu diesem Zweck den prinzipiellen Aufbau einer kabellosen Steuerung nach VDI-Richtlinie 4412 [VDI-4412]. Der Aufbau beinhaltet ein Steuergerät (Sender), ein Empfangsgerät (Empfänger) und den zu steuernden Kran. Neben der Gestaltung der Stellteile zur Eingabe des Bewegungswunschs durch einen Kranbediener mit Hilfe entsprechender Stellteile sollen bei der Untersuchung neuartiger Innovationsparadigmen auch notwendige Methoden zur Signalverarbeitung am Empfangsgerät (Ausgabeeinheit) und eine dazu passende Ansteuerung der Kranbewegung (Steuergerät + Antriebssteuerung) entwickelt werden. Alle Teile des Interaktionsparadigmas, die im Rahmen der Gestaltung der Funksteuerung verändert werden können, sind in Abbildung 3-5 farblich hervorgehoben. Zwischen den farblich markierten Blöcken befindet sich die Funkstrecke, deren Weiterentwicklung nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist. Der prinzipielle Schnittstellenaufbau ist analog zur Darstellung der Mensch-Maschine-Interaktion in Abbildung 3-1.

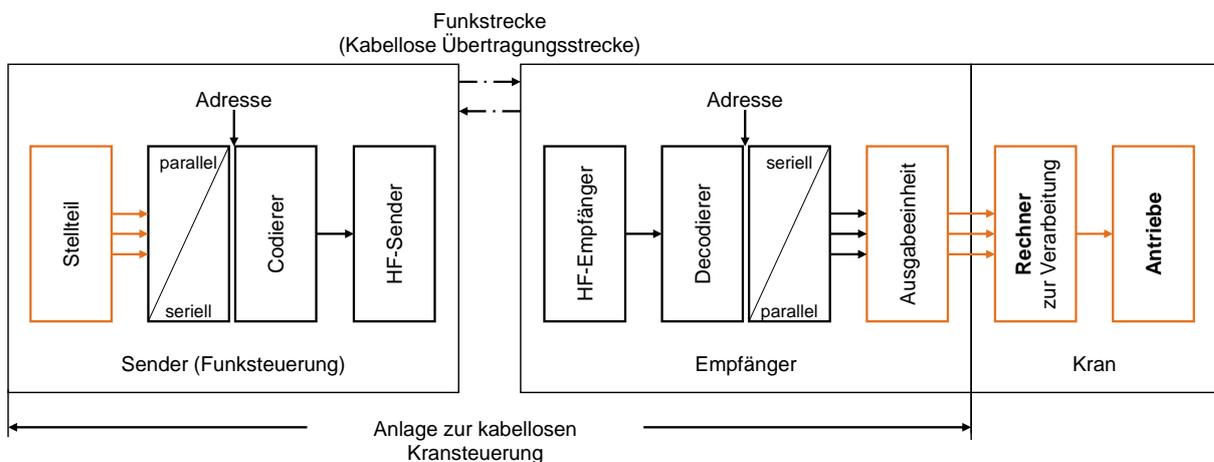


Abbildung 3-5: Blockschema einer Funksteuerung, adaptiert aus [VDI-4412] (farbliche Hervorhebungen durch den Autor)

3.4.5 Vorschriften, Normen und Gestaltungsrichtlinien für Kransteuerungen

Da Krane in der Regel im Umfeld von Personen betrieben werden, wird der korrekten und sicheren Funktion sowie der Entwicklung von risikomindernden Maßnahmen im Fehlerfall große Bedeutung beigemessen. Aus diesem Grund existieren eine ganze Reihe von Unfallverhütungsvorschriften und Sicherheitsvorgaben. Eine zusammenfassende Darstellung dieser Aspekte und der relevanten Quellen findet sich im Anhang A.

Hinweis zum Umgang mit normativen Vorgaben

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass Normen zwar in aller Regel die derzeit anerkannten Regeln der Technik darstellen, die Verwendung aber grundsätzlich freiwillig ist. Da der Normungsprozess zudem mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden ist, kann es ferner sein, dass eine Norm zwar einerseits anerkannte Regeln der Technik abbildet, jedoch andererseits inhaltlich zum Anwendungszeitpunkt bereits überholt ist, und dass demzufolge Entwicklungen existieren, die erheblich vom Inhalt der Norm abweichen.

Da es sich bei der Entwicklung und Evaluierung von nutzerzentrierten Kransteuerungen um eine wesentliche Weiterentwicklung des aktuellen Stands der Technik handelt, können die normativen Vorgaben nicht als alleinige Leitsätze fungieren, sondern dienen lediglich der Orientierung und insbesondere der sicherheitstechnischen Begutachtung auf dem Weg zur praktischen (und ggf. industriellen) Implementierung. Aus diesem Grund haben die normativen Vorgaben im Rahmen der Dissertation informativen Charakter und sind nicht Kerninhalt der Arbeit.

Nichtsdestotrotz wird allein durch die hohe Anzahl der Vorschriften, Normen und Gestaltungsrichtlinien deutlich, dass Sicherheits- und Gestaltungsaspekten bei der Steuerung von Kranen eine erhebliche Bedeutung zukommt. Die Unfallstatistiken aus Abschnitt 1.1 – insbesondere der hohe Anteil von Unfällen, deren Ursache menschliches Versagen ist – unterstreichen, dass die Interaktion von Mensch und Maschine bei Lasthebemitteln aktuell nicht zufriedenstellend gelöst ist (vgl. auch Untersuchungen von [Bea-2006; Fan-2018; Nei-2001]). Neue Konzepte sollten daher einen Fokus auf die Vermeidung von Bedienfehlern legen, den Bediener und seine Bedürfnisse ins Zentrum der Interaktion stellen und gleichzeitig einen sicheren Kranbetrieb gewährleisten (vgl. [Su-2015; Spa-2015]).

3.4.6 Strategien zur Verbesserung bestehender Mensch-Maschine-Schnittstellen für Krane

Es existieren in Wissenschaft und Industrie bereits Vorarbeiten und Ansätze, bestehende Kransteuerungskonzepte zu verbessern. Im Wesentlichen wird dabei einer der folgenden Ansätze oder eine Kombination aus beiden verfolgt:

- a) Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung (engl.: boom tip control) zum Auflösen der Inkompatibilität zwischen der Eingabe am Interaktionselement und der Bewegung der Last (d. h. des Hakens). Statt der konventionellen Kransteuerung über die Bewegung einzelner DOFs, die in Summe die gewünschte Haken- bzw. Lastbewegung ergeben, wird bei einer Auslegerspitzensteuerung direkt die Bewegung des Lastaufnahmemittels vorgegeben.

- b) Verwendung alternativer, optimierter Interaktionsparadigmen, d. h. von Eingabemöglichkeiten, die über die etablierten Linearhebel, Joysticks oder Taster hinausgehen.

a) Auslegerspitzensteuerungen

Um die Inkompatibilität zwischen Bedienereingabe und Lastbewegung bei herkömmlichen Freiheitsgrad-Steuerungen aufzulösen, sind Auslegerspitzensteuerungen ein vielversprechender Ansatz. Bei der Auslegerspitzensteuerung wird die gewünschte Bewegung des Lastaufnahmemittels (d. h. des Hakens) direkt vorgegeben, damit sich alle Gelenkbewegungen zu der gewünschten Haken- bzw. Lastbewegung kumulieren, anstatt die Bewegungen mehrerer einzelner DOFs unabhängig voneinander zu steuern. Dazu gibt der Kranführer direkt die gewünschte Richtung und Geschwindigkeit der Last ein, indem er eine entsprechende haptische Schnittstelle betätigt. Ein Rechner berechnet dann mittels einer Rückwärtskinematik⁷ die notwendigen Richtungen und Geschwindigkeiten aller einzelnen Kranantriebe, so dass sich in Summe die gewünschte Hakenbewegung ergibt. Die Maschinensteuerung steuert dann alle notwendigen DOFs simultan an, so dass dies in der vom Bediener vorgegebenen Bewegung des Hakens resultiert. Die Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung ist grundsätzlich gleichermaßen bei einem festen Bedienerplatz (Kabine) wie bei einem bewegtem Bediener (Funksteuerung) möglich.

Angewandte Forschung im Bereich der Auslegerspitzensteuerung existiert bereits viele Jahre im Bereich der Robotik (vgl. Abschnitt 3.5.2). Im Themenfeld der Lasthebemittel sind Auslegerspitzensteuerungen vor vor allem in den Bereichen Forstmaschinen, Ladekrane und Autobetonpumpen Gegenstand aktueller Entwicklungen, wie zum Beispiel in [Bak-2011; Fod-2016; Hen-2016; Löf-2009; Mor-2014; Pro-2003; Top-2019b; Wes-2014]. Darüber hinaus existieren Ansätze im Bereich Montageassistenz, z. B. [Cam-2016]. Neben diesen Forschungsansätzen gibt es bereits einige kommerzielle Krane, die mit einer Auslegerspitzensteuerung ausgestattet werden können, was zeigt, dass diese auch für Maschinenhersteller von großem Interesse ist [Joh-2013; HIA-2018; Eps-2018; Pal-2019; Tec-2019a; Leh-2019; Dem-2019; Dem-2020]. Der Fokus der industriellen Anwendungen liegt derzeit im Bereich Forstwirtschaft, Ladekrane und verwandter Geräte (z. B. Autobetonpumpen) sowie in der Montagetechnik. Einige der genannten Hersteller bewerben bei der Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung eine reduzierte mentale Belastung auf Seiten des Bedieners und damit einhergehend weniger Frustration, steigende Geschwindigkeiten, geringere Fehlerzahlen und kürzere Hubzyklen, was insgesamt zu einem besseren Bedienerlebnis, einer Erhöhung der Umschlagsleistung und auch zu einem Sicherheitsgewinn führen soll. Allerdings liefern die Hersteller bisher keine unabhängig überprüfbareren Belege im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen für diese Aussagen.

⁷ In der Robotik wird häufig auch von einer inversen Kinematik gesprochen.

Ansätze aus der Forschung zeigen bei der Verwendung von Auslegerspitzensteuerungen auch bei wissenschaftlicher Betrachtung ein erhebliches Verbesserungspotenzial im Vergleich zu konventionellen, achsbasierten Steuerungen. [Cha-2016; Fod-2016; Man-2017; Kru-1992; Löf-2009; Man-2017; Man-2019; Ped-2010; Pen-2009a; Pen-2009b; Pen-2009c; Pen-2012a; Pen-2013] weisen sowohl qualitativ als auch quantitativ Potenziale durch den Einsatz der Auslegerspitzensteuerung nach. Insbesondere zeigt [Löf-2009] am Beispiel von Forstmaschinen, dass die Auslegerspitzensteuerung zu kürzeren Einlernzeiten und geringerer mentaler Beanspruchung des Bedieners führt. [Man-2017] bestätigt in einer Studie mit Novizen das vielversprechende Potenzial von Auslegerspitzensteuerungen bei hydraulischen Kranen für Forstarbeiten (Rückezüge): Zykluszeiten und Fehlerquoten sind mit Auslegerspitzensteuerungen signifikant geringer als mit konventionellen Freiheitsgrad-Steuerungen. Als Grund hierfür wird vermutet, dass die durch Kompatibilitätsprobleme und die Einzelansteuerung der Antriebe auftretenden Umkodierungsaufgaben auf Bedienerseite durch eine Auslegerspitzensteuerung reduziert werden.

Bei allen in diesem Abschnitt vorgestellten Konzepten, in denen herkömmlich gestaltete Steuerungen (Linearhebel, Joysticks, Taster) und eine Auslegerspitzensteuerung verwendet werden, muss sich der Bediener entweder an einem festen Fahrerplatz befinden, der sich mit dem Ausleger mitdrehen kann (Kabine/Hochsitz) [Löf-2009; Man-2017; Man-2019; Eps-2018; Fod-2016; Wes-2014; Joh-2013], oder er muss zwischen seinem beweglichen Bedienerkoordinatensystem, d. h. dem Koordinatensystem der Funksteuerung, und dem festen Maschinenkoordinatensystem umrechnen, da die Bewegung des Bedieners zu einer Verdrehung des Bedienerkoordinatensystems gegenüber dem Maschinenkoordinatensystem führt [HIA-2018; Pal-2019]. Aufgrund der zahlreichen Vorteile der Teleoperation gegenüber einer festen Bedienstation ist der grundsätzliche Verzicht auf Funksteuerungen jedoch keine Lösung. Ein nutzerzentriertes Steuerungskonzept sollte idealerweise sowohl bei der Steuerung von einem festen Bedienplatz als auch mit Hilfe einer Funksteuerung und bewegtem Bediener das gleiche Interaktionsparadigma (inkl. Auslegerspitzensteuerung) ermöglichen, auch bei wechselnder Position und Orientierung des Bedieners.

Bei der Betrachtung der bisher umgesetzten Auslegerspitzensteuerungen wird deutlich, dass insbesondere zwei Randbedingungen besonderes Potenzial bei der Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung erkennen lassen: sehr hohe Umschlagsleistungen (Forstgeräte sowie Auslegerkrane z. B. im Hafeneinsatz) oder Krane mit besonders vielen DOFs (Rückezüge, Ladekrane). Basierend auf diesen messbaren Effekten wird die Auslegerspitzensteuerung als geeignetes Konzept zur Verbesserung der Kransteuerung im Hinblick auf Benutzerfreundlichkeit und Bedienerakzeptanz angesehen. Somit sind Auslegerspitzensteuerungen ein weiteres mögliches Element eines Gestaltungsrahmens für nutzerzentrierte Kransteuerungen.

Während sich das Konzept der Auslegerspitzensteuerung nur mit der Ausgabeseite im Kranbetrieb, also der Steuerung und Bewegung des Hakens, beschäftigt, gibt es auch zahl-

reiche Ansätze, die Eingabeseite, also die Aufnahme des Bedienerwunschs, zu optimieren. Erst die Kombination einer möglichst bedienergerechten Eingabe mit einer maschinengerechten Ausgabe führt letztendlich zum Gesamtpaket einer gegenüber herkömmlichen Kransteuerungen verbesserten Last- bzw. Hakensteuerung und damit zu einem vollständigen Interaktionsparadigma.

b) Alternative Eingabemöglichkeiten für den Bedienerwunsch

Die weitere Recherche zeigt, dass die Verbesserung herkömmlicher Freiheitsgrad-Steuerungen für Hebemittel Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben war und ist. Die untersuchten Ansätze streuen dabei thematisch sehr breit. Explizit werden auch Interaktionsparadigmen untersucht, die zur Eingabe des Bedienerwunschs über die herkömmlichen Eingabemittel, also über die bekannten Eingabemittel Linearhebel, Joystick und Taster, hinaus gehen.

Peng entwickelte mehrere Konzepte, mit denen der Bediener den gewünschten Weg der Last direkt vorgeben kann. Durch die Verfolgung verschiedener Objekte, die vom Bediener getragen werden können, folgt die Last den Bewegungen des Bedieners. Als Objekte kommen zum Beispiel ein reflektierender Marker auf einem Stab bzw. Handschuh (sog. Magic Wand) [Pen-2009b; Pen-2012b] oder ein aktiver RFID-Tag zum Einsatz, der vom Bediener in der Hand gehalten wird [Pen-2009c; Pen-2012a]. Bewegt sich der Kranbediener mit dem Marker, folgt der Kran seiner Bewegung. Hierbei kommen Überkopfkameras mit Bildverarbeitung (beim Magic Wand) oder RFID-Trilateration zum Einsatz. Zu diesem Zweck sind der Kran und seine Umgebung mit Kameras bzw. RFID-Empfängern ausgestattet. Durch Bildverarbeitung oder simultane Laufzeitmessungen kann die Position des Tags und damit das Ziel des Hakens ermittelt werden. Probandenstudien zur Evaluation der Hakensteuerung beider Konzepte finden sich in [Pen-2013, ab S. 69]. Die genannten Arbeiten zeigen sowohl für den Magic Wand als auch für den RFID-Tag Einsparpotenziale von bis zu 40 % (abhängig von Umfeld und Bewegungsfolge) bei der Bedienzeit sowie eine erhebliche Verbesserung der kognitiven Belastung durch die Verwendung von ergonomisch optimierten Eingabemöglichkeiten. Zudem sinkt durch eine ergonomische Ausgestaltung der Bedienschnittstelle und die damit entfallende Umkodierung zwischen Bediener- und Maschinenkoordinatensystem die Fehlerzahl erheblich, da die Wahrscheinlichkeit von Fehlbedienungen durch verbesserte Kompatibilität zwischen Bediener und Maschine sinkt. Die Steuerung der Hakenbewegung durch optisches oder elektromagnetisches Tracking ist jedoch nicht in allen Anwendungsfällen problemlos möglich: Kamerabasiertes Tracking reagiert empfindlich auf sich stark verändernde Lichtverhältnisse oder große Reichweiten, während RFID-Tracking räumlich verteilte RFID-Empfänger und somit eine entsprechende Infrastruktur in der Umgebung des zu steuernden Krans benötigt.

[Cam-2016; Kaz-2004; Col-2003; Sch-2019] präsentieren Assistenzsysteme zum Lasthandling, bei dem der Bediener die Last durch Berührung manipuliert. Zu diesem Zweck werden die vom Bediener aufgebrauchten Kräfte in Betrag und Richtung gemessen und der Kranhaken folgt der Richtung der aufgebrauchten Kraft. Dies geschieht entweder über am Kran angebrachte Sensoren, oder wie bei [Kaz-2004] über einen mit Sensoren ausgestatteten Handschuh (sog. Magic Glove). Die vorgestellten Konzepte sind sehr ähnlich zum E-Balancer, einer von der Firma Demag vorgestellten industriellen Lösung mit ähnlicher Funktion [Dem-2019]. Nachteil dieser Konzepte mit direkter physischer Manipulation⁸ ist, dass der Haken zu jeder Zeit für den Bediener zugänglich sein muss, was eine Anwendung mit großen Hubhöhen oder zur Überwindung nicht begehbarer Bereiche (Baugruben etc.) ausschließt. Sie eignen sich daher vorrangig für die Unterstützung von Mitarbeitern in sehr begrenzten Bereichen, zum Beispiel beim Handling schwerer Lasten in der Produktion.

Kivila untersucht die Potenziale von Steuerungs-Koordinatensystemen, die sich mit dem Bediener mitdrehen. Dies ermöglicht ihm, den Haken direkt aus seiner Perspektive heraus zu steuern [Kiv-2014]. Hierfür nutzt er eine RFID-basierte Bedienerlokalisierung, um die Orientierung des Bedieners zum Haken zu bestimmen. Wenn der Haken aus Sicht des Bedieners „nach vorne“ fahren soll, erfolgt auch eine Eingabe „nach vorne“ an der Funksteuerung, welcher die Hakenbewegung dann parallel folgt. Er zeigt auf, dass die Möglichkeit der direkten Hakensteuerung aus der Bedienerperspektive bei unerfahrenen Bedienern (Novizen) zu signifikant niedrigeren Fahrzeiten und Fehlerzahlen sowie zu einer erhöhten Zufriedenheit der Bediener führt. Er bestätigt damit – speziell im Kontext der Kranbedienung – grundsätzlich aus anderen Bereichen bekannte Zusammenhänge zwischen Kompatibilität, Bedienerorientierung und Gebrauchstauglichkeit (siehe z. B. bei [Fit-1953; Wor-1989; DeJ-2004]). Die in [Kiv-2014] vorgestellten Lösungen wurden jedoch nur in Innenräumen unter Verwendung von Portalkranen getestet und erfordern zudem eine kostspielige räumliche Infrastruktur. Dennoch bestätigen die Ergebnisse, dass die Effektivität der Mensch-Maschine-Interaktion stark von der Kompatibilität und der Berücksichtigung der Orientierung des Bedieners beeinflusst werden kann.

Weiterführend existieren mit den Arbeiten von Kivila et al., Sorensen et al., Chakraborty et al. und Suter et al. Untersuchungen zur Steuerung von Hakenbewegungen mit Hilfe von berührungsempfindlichen Eingabegeräten (Touch-Bildschirme) [Kiv-2013a; Kiv-2013b; Kiv-2014; Sor-2007; Cha-2016; Sut-2007]. Die Ergebnisse zeigen, dass es nicht sinnvoll ist, lediglich die Gestaltung einer herkömmlichen Funksteuerung mit Tastern o. Ä. auf einen Touch-Bildschirm zu übertragen, da die haptische Rückmeldung verloren geht. Hierdurch steigt der Aufwand bei der Kranbedienung, was im Umkehrschluss zu einer erhöhten Belastung des Bedieners, steigenden Umschlagszeiten und erhöhten Fehlerzahlen führt. Wird die Eingabemodalität am Bildschirm jedoch auf den Eingabemodus (Touchbedienung) optimiert und gleichzeitig eine zur Toucheingabe passende Maschinenansteuerung realisiert,

⁸ In der Robotik spricht man von physical human-robot interaction.

ergeben sich signifikante Verbesserungspotenziale zu bestehenden Kransteuerungen, insbesondere bei der Genauigkeit und Fehleranzahl. Hierfür werden Auslegerspitzensteuerungen mit verschiedenen gestalteten Joystick-Imitationen auf dem Bildschirm oder den Kippbewegungen eines Smartphones kombiniert.

Tu zeigt in seiner Arbeit Möglichkeiten auf, Methoden der erweiterten Realität zur Kransteuerung zu nutzen [Tu-2020]. Er stellt ein HMI vor, das die Vorgabe eines gewünschten Ziels für den Haken eines Hallenkranes ermöglicht und nutzt hierfür Hologramme und die AR-Brille Hololens von Microsoft. Basierend auf der Differenz zwischen einer vom Bediener im Raum platzierten Zielpunkt-Holografie und dem realen Haken werden die einzelnen Aktoren nacheinander angesteuert: zuerst wird die Laufkatze bewegt, dann die Kranbrücke und schließlich das Hubwerk. Tu zeigt auf, dass sich AR-Brillen grundsätzlich für die Eingabe von Zielpositionen bei der Kranbedienung eignen.

Einen ganz anderen Ansatz verfolgen Pietrusewicz et al. [Pie-2020]. Unterschiedlich viele Kameras im Umfeld des Krans werden in diesem Fall dafür genutzt, den Bediener zu verfolgen und seine Bewegung auf formalisierte Gesten zu untersuchen. Diese Gesten werden zur Steuerung des Hakens verwendet. Kamerabasierte Gestensteuerungen bieten grundsätzlich Potenzial (vgl. auch [Ama-1999; Fri-2003]), jedoch ist Ihre Anwendung bei Hebemitteln im Außenbereich aufgrund stark wechselnder Lichtverhältnisse, begrenzter Reichweiten und einer hohen Verschmutzungsgefahr gründlich abzuwägen. Dies gilt insbesondere bei einem großen räumlichen Abstand zwischen der Kamera und den zu erfassenden Gesten. Die Kombination von Gestensteuerungen und erweiterter Realität (AR-Brillen) könnte hier ein vielversprechender Ansatz sein, um den bisherigen Schwächen zu begegnen, da die AR-Brille und damit die erkennende Kamera auf dem Kopf des Bedieners positioniert ist und sich somit stets nah zur ausgeführten Geste befindet.

Noch über die Anwendung von formalisierten Gesten hinaus gehen Majewski et al. [Maj-2016; Maj-2017; Maj-2018], die eine sprachbasierte Eingabe zur Steuerung der Auslegerspitze vorschlagen. Zur Auswertung der Spracheingaben kommen unter anderem neuronale Netze zum Einsatz. Im industriellen Kontext ist der Einsatz von sprachbasierten Eingaben jedoch stark abhängig vom Anwendungsfall: Bei großen Entfernungen und lauten Störgeräuschen kommen selbst moderne Verarbeitungsalgorithmen an ihre Grenzen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass von unterschiedlichen Forschern bereits sehr unterschiedliche Interaktionsparadigmen vorgeschlagen wurden. Es existiert derzeit jedoch kein Konzept, das einerseits die Vorteile einer Auslegerspitzensteuerung und die Lösung des Kompatibilitätsproblems zwischen Funksteuerung (Nutzerkoordinatensystem) und Maschinenkoordinatensystem für den Einsatz an einem Hebemittel vereint, und andererseits außerhalb von Laborumgebungen praxistauglich funktioniert. Insbesondere das Problem der robusten Ortung der Bedienerausrichtung bei der Verwendung einer Funksteuerung ist

nicht zufriedenstellend gelöst, ohne auf umfassende räumliche Infrastruktur angewiesen zu sein.

Bisherige Entwicklungen beruhen zudem auf der Verwendung einer innovativen HMI-Idee und/oder dem erstmaligen Einsatz von bestimmten Sensortechnologien in diesem Zusammenhang. Obwohl einige Lösungen vielversprechende Verbesserungen in Bezug auf die Bedienerleistung und die Bedienerzufriedenheit zeigen, existiert bisher keine systematische Betrachtung der Gründe, warum bestimmte HMIs aus Sicht des menschlichen Bedieners anderen überlegen sein sollen. Ferner sind bisher keine Kransteuerungen bekannt, die das Ergebnis eines nutzerzentrierten Gestaltungsprozesses sind. Somit sind neue Konzepte das Ergebnis unterschiedlicher Gestaltungsansätze, da sie sich nicht auf einen etablierten methodischen Rahmen für die Gestaltung von Kransteuerungen stützen. Die Variation der Eingabemöglichkeit des Bedienerwunschs ist in diesem Zusammenhang lediglich als ein weiterer Baustein für die Ableitung nutzerzentrierter Steuerungskonzepte zu betrachten.

3.5 Mensch-Maschine-Schnittstellen in ähnlichen Systemen

Neben Lasthebemitteln existieren eine Reihe anderer Prozesse und Geräte, bei deren Bedienung ähnliche Schwierigkeiten auftreten wie bei der herkömmlichen Steuerung von Kranen (vgl. Tabelle 3-1), deren Zweck aber nicht primär die Förderung von Stückgut mit bzw. durch eine Vertikalbewegung ist. Generell zeigt sich, dass kooperative Mensch-Maschine-Systeme in den letzten Jahren verstärkte Aufmerksamkeit erfahren ([Ben-2012]). Auch in diesen Fällen ist die ergonomische Gestaltung der HMIs Gegenstand aktueller Entwicklungs- und Forschungstätigkeiten. Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über innovative HMIs von Maschinen mit erhöhtem Regelungsaufwand, deren Funktionsweise auf die Steuerung von Maschinen zur Lastmanipulation übertragbar ist, und/oder die bereits heute einen nutzerzentrierten Gestaltungsansatz erkennen lassen. Einige Inhalte dieses Abschnitts wurden vom Autor bereits in [Fot-2020] vorveröffentlicht.

3.5.1 Mobile Arbeitsmaschinen

Es existieren einige Bedienkonzepte für mobile Arbeitsmaschinen, die entwickelt wurden, um die Manipulation eines Endeffektors mit einer Vielzahl von DOFs zu vereinfachen.

Hayn [Hay-2012] stellt in seiner Dissertation ein haptisch unterstütztes Bedienkonzept für Hydraulikbagger vor. Statt der Ansteuerung einzelner DOFs des Baggerarms kommen verschiedene ergonomisch optimierte Eingabegeräte zum Einsatz, die es ermöglichen, durch ein Master-Slave-System direkt mit der Bewegung eines schaufelähnlichen Eingabegeräts

(Master) die Bewegung der Baggerschaufel (Slave) zu steuern. Die Umkodierung der gewünschten Schaufelbewegung auf die Bewegungen der einzelnen DOFs entfällt somit. In einer Probandenstudie zeigt Hayn anschließend auf, dass die verbesserte Bedienung zu geringeren Zykluszeiten und Fehlerzahlen führt. Kim et al. [Kim-2009] verfolgen einen ähnlichen Ansatz, nutzen aber direkt den Arm des Bedieners als Master.

Okishiba et al. [Oki-2019] präsentieren eine Lösung zur Teleoperation eines Baggers mit Hilfe einer Tablet-App. In Probandenstudien weisen sie nach, dass die beiden vorgeschlagenen HMIs der herkömmlichen Steuerung in Bezug auf die zur Aufgabenerfüllung benötigte Zeit, die Genauigkeit und die subjektive Bewertung der Gebrauchstauglichkeit überlegen sind.

Die Firma Vemcon verfolgt mit der Steuerung uniGRIP [Vem-2019] für Bagger, Radlader, Straßenhobel und Planierdrauen ein ähnliches Konzept: Durch Joysticks mit Kipp- und Dreh-DOFs werden die Maschinenbewegungen durch eine zur Maschinenbewegung parallele Bewegung bzw. Drehung am Joystick ausgelöst. Im Vergleich zu herkömmlichen Steuerungen muss der Bediener somit nicht mehr umdenken oder zwischen verschiedenen Bedienelementen umgreifen. Somit entsteht beim Bediener das Gefühl, er habe das Werkzeug direkt in der Hand.

Yoon et al. [Yoo-2010] zeigen, dass die Nutzung einer inversen Kinematik zur Ansteuerung eines Baggerlöffels in erheblichen Zeit- und Präzisionsvorteilen resultiert und deshalb insbesondere für ungeübte Bediener großes Potenzial bietet.

Einen weiteren Anwendungsbereich für intuitive Steuerungskonzepte bei mobilen Arbeitsmaschinen erschließt Henikl [Hen-2016] mit seiner Dissertation, welche die regelungstechnische Grundlage für die Auslegerspitzensteuerung einer Autobetonpumpe in Polarkoordinaten legt. Aufgrund ihrer hohen Anzahl DOFs (i. d. R. sechs), des großen Arbeitsraums sowie der erheblichen Systemelastizität stehen Bediener von Autobetonpumpen bei der Auslegersteuerung vor ähnlichen Problemen wie Kranfahrer, da die gewünschte Bewegung des Endschlauchs als Überlagerung aller Freiheitsgrad-Bewegungen entsteht und häufig ebenfalls mit Funksteuerungen gearbeitet wird.

Ferner existieren weitere mobile Arbeitsmaschinen, bei denen der Bediener vor ähnlichen Herausforderungen steht wie bei der Kranbedienung und bei denen eine höhere Intuitivität wünschenswert wäre. Viele dieser Arbeitsmaschinen werden zudem häufig mit Hilfe von Funksteuerungen bedient. Hierzu gehören beispielsweise Arbeitsbühnen, Fassadenreinigungsgeräte oder andere Großmanipulatoren (z. B. in der Kernkraft). Insbesondere an der Schnittstelle zur Robotik im Bereich der Großmanipulatoren für die Luft- und Raumfahrt existieren unzählige Publikationen (vgl. Abschnitt 3.5.2).

Neben den präsentierten Einzellösungen existieren Sammelwerke zur ergonomischen Gestaltung mobiler Arbeitsmaschinen (z. B. [Sac-1994]) sowie erste systematische Ansätze

zur Automatisierung teleoperierter Arbeitsmaschinen. Lee et al. [Lee-2020] schlagen zur Automatisierung von teleoperierten Arbeitsmaschinen zwei grundlegende Schritte vor:

1. Nutzung standardisierter Bussysteme zur Kommunikation aller beteiligten Entitäten
2. Implementierung von Steuerungs- und Regelungskonzepten, die auf einer inversen Kinematik mit geschlossenem Regelkreis basieren

Die systematische und nutzerzentrierte Gestaltung der des HMI ist jedoch nicht Gegenstand des Vorgehens von Lee et al. oder der anderen genannten Arbeiten in diesem Kontext.

3.5.2 Robotik

Im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion mit Robotern existiert sehr viel Literatur. Eine vollständige Literaturübersicht ist in diesem Bereich unmöglich und würde den Umfang der vorliegenden Arbeit sprengen. Deshalb wird an dieser Stelle lediglich kurz auf die Auslegerspitzensteuerungen und bereits existierende Interaktionsparadigmen für die Robotersteuerung inkl. ausgewählter Beispiele eingegangen. Als hervorragende Übersicht zu HMIs in der Robotik wird [Goo-2007] empfohlen.

Insbesondere bei Industrierobotern ist die Auslegerspitzensteuerung mit Rückwärtskinematik als Steuerung des TCP (Tool Center Point) bekannt und bereits seit Jahrzehnten etabliert. Anstatt jeden Freiheitsgrad einzeln anzusteuern, gibt der Bediener bei der manuellen Bedienung lediglich die Bewegung des TCP vor, also der Werkzeugaufnahme an der Spitze des Roboters bzw. der Werkzeugmaschine. Die Maschinensteuerung errechnet hieraus die optimalen Bewegungen aller DOFs, die dann simultan angesteuert werden. Verschiedene Kinematikkonzepte für die Robotersteuerung finden sich beispielsweise bei Siciliano [Sic-1990; Sic-2016] oder in [Sci-2000; Bia-2008; Cha-1995; Fah-2009; Smi-1998]. Die direkte Steuerung des TCP mit Hilfe einer Rückwärtskinematik ist besonders beim Einlernen des Roboters (sog. *Teachen*) hilfreich. Beim Teachen werden der Reihe nach alle TCP-Positionen, die der Roboter für seine Aufgabe benötigt, abgefahren, so dass der Roboter seine Pfadplanung im Automatikbetrieb darauf abstimmen kann. Eine maschinenzentrierte Steuerung der Einzelachsen, wie sie bei Kranen derzeit noch üblich ist, ist bei Robotern schon viele Jahre überholt und wird nur noch in Sonderfällen verwendet.

Teleoperation wird bei Robotern häufig angewandt – sofern sich der Roboter nicht im automatischen Betrieb befindet. Untersuchungen zur Teleoperation von Robotern finden sich beispielsweise bei Aracil et al. [Ara-2007], Fong et al. [Fon-2001], Nitsch [Nit-2011], Rodriguez-Sedano et al. [Rod-2019] und Yu et al. [Yu-2019]. Die genannte Literatur bestätigt die Potenziale von Teleoperation und betont gleichzeitig, dass die aufgabenangepasste

Gestaltung des HMI sowie die Einbindung des Bedieners elementar wichtig sind für eine erfolgreiche Interaktion (vgl. auch [Hof-2004; Che-2007; Hir-2012; Bor-2014; Cra-2003]) und eine geringe mentale Beanspruchung (vgl. [Kab-2000]).

Zur Interaktion mit Robotern existieren im Allgemeinen folgende Ansätze (genannt mit beispielhaften Anwendungen):

- Tastensteuerung: [KUK-2021]
- Mehrdimensionale Eingabegeräte (3D-Maus, Joysticks etc.): [KUK-2021; 3D-2021; Her-2013; Son-2007]
- Gestensteuerung und Tracking durch Bildverarbeitung: [Wal-2000; Sti-2004; Rog-2002; Bai-2018; Du-2010; Du-2014; Fri-2003; Kem-2008; Kim-2006; Kof-2005; Pil-2013; Tan-2018]
- Touchbasierte Eingabegeräte: [KUK-2021; Fra-2016; Ton-2018; Wu-2020; Car-2013; Fin-2018]
- Nutzung erweiterter Realität (AR): [Mil-1995; Wol-2017; Her-2020; Cha-2019a; Le-2020; Hac-2019; Bla-2018; Kru-2018; Ost-2018; Ros-2019; Sol-2020; Cha-2020; Fan-2009; Ong-2020]
- Master-Slave-Systeme (z. B. Exoskelette oder Tracking durch nicht-optische Sensoren): [Boc-2012; Fal-2015; Wan-2020; Kig-2001; Mee-2018; Par-2018; Bil-2008; Kaz-2008; Rod-2019]
- Physische Mensch-Maschine-Interaktion (Industrie und Assistenzrobotik): Dissertationen von Gruber [Gru-1992], Groten [Gro-2011], Schmidler [Sch-2018], Nitsch [Nit-2011] sowie [Bau-2008; Bee-2014; Had-2016; Gos-2013; Col-2003; Krü-2009; Vu-2017; Abb-2012; Sal-2006].
- Gehirn-Computer-Schnittstellen (z. B. EEG-Messung): [Kar-2003; Par-2011]
- Spracherkennung: [Rog-2002; Sti-2004]

Grundsätzlich eignen sich alle genannten Ansätze für die Mensch-Maschine-Interaktion im vorliegenden Kontext, mit Ausnahme von Gehirn-Computer-Schnittstellen. Diese sind bisher nur im Labor erprobt und werden aus diesem Grund nicht weiter betrachtet. Nutzerzentrierte Ansätze spielen in der Robotik traditionell eine große Rolle. Im Hinblick auf die spezifischen Vor- und Nachteile jedes Ansatzes wird auf die angegebene Literatur verwiesen. Sie sind im Einzelfall im Hinblick auf die zu erfüllende Aufgabe sowie die Arbeitsumgebung abzuwägen (für passende Metriken vgl. [Ste-2006]). Die Robotik und der Teilbereich der teleoperierten Robotik bietet somit einen großen Ideenfundus für die Entwicklung von nutzerzentrierten Steuerungskonzepten für Krane.

3.5.3 Konsumgüter

Bei der Entwicklung von Konsumgütern für den Massenmarkt ist eine einfache, intuitive Bedienbarkeit ohne unnötige Komplexitäten von entscheidender Bedeutung. Aus diesem

Grund existieren verschiedene Steuerungsansätze für unterschiedliche Produkte, die verdeutlichen, wie für relativ komplexe Steuerungs- und Regelungsaufgaben mit Hilfe entsprechender Rechnerunterstützung sehr einfache und intuitive Bedienereingaben ausreichend sein können. An dieser Stelle seien beispielhaft genannt:

- Steuerung für Hobbydrohnen durch Joystick-Steuerungen (z. B. [Ber-2008]), durch Joystick-Imitationen auf Touch-Bildschirmen oder durch Kippbewegungen eines Smartphones [poc-2014; Par-2021]
- Sprach- und Gestensteuerung zur Menüführung in PKW
- Gamepads für Computer und Spielekonsolen: Je nach Aufgabe kann der Bediener ein für ihn intuitiv passendes Bedienelement auswählen und konfigurieren.
- Standardisierte Bedienkonzepte für die Interaktion mit touchbasierten mobilen Endgeräten (Smartphones), z. B. Universal Windows Plattform (Microsoft [Mic-2019]), Material Design (Google [Goo-2019]) oder Human Interface Guidelines (Apple [App-2019]).

Die genannten Beispiele zeigen auf, dass alternative Eingabekonzepte grundsätzlich funktionieren, solange sie zum Anwendungsfall passen. Die Hauptherausforderung bei der Übertragung von Interaktionskonzepten aus dem Konsumgüterbereich in den Industriebereich (z. B. zur Kranbedienung) liegt in den hohen Anforderungen an Industriesteuerungen im Hinblick auf Verfügbarkeit, Sicherheit, Robustheit und Kosten. Trotz dieser Hindernisse dient der Konsumgütermarkt als wertvoller Ideengeber.

4 Forschungsbedarf und Forschungsfragen

4.1 Defizite aktueller Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Kransteuerung

Aus den Grundlagen für die ergonomische Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion (Abschnitt 2.1) und dem Stand der Technik und Wissenschaft (Kapitel 3) ergeben sich vier Kerndefizite bei aktuell eingesetzten Kransteuerungen.

Defizit 1

Das derzeitige Standard-HMI für die Kransteuerung basiert auf einer maschinenzentrierten Designperspektive, die den Bediener mental stark beansprucht, weil laufend mentale Umkodierungen notwendig sind.

Dem Bediener kommt bei bisherigen Kransteuerungen eine entscheidende Bedeutung zu. Neben seinen Sicherheits- und Überwachungsaufgaben besteht seine Hauptaufgabe darin, die einzelnen Antriebe des Krans mit Hilfe des HMI korrekt zu steuern, um die gewünschte Lastbewegung als Überlagerung aller Antriebsbewegungen zu erreichen. Die Art und Weise, wie der Bediener mit dem System interagiert, wird durch das Funktionsprinzip der Maschine definiert: Vier Antriebe der Maschine bedeuten beispielsweise, dass die Maschine vier DOFs besitzt, die über vier verschiedene Bedienteilbewegungen angesteuert werden, um letztendlich den Haken wie gewünscht zu bewegen.

Die Ermittlung der erforderlichen Betätigungsrichtung der Bedienelemente erfordert vom Bediener eine gedankliche Umsetzung der gewünschten Lastbewegung auf die einzelnen DOFs des Krans, wobei sowohl die Eigenschaften des Freiheitsgrads, nämlich zulässige Bewegungen und Geschwindigkeiten, als auch die Bewegungsrichtung und die aktuelle Stellung richtig eingeschätzt werden müssen. Anschließend müssen die Bewegungen der DOFs über Symbole an den Stellteilen oder basierend auf der Erfahrung des Kranführers den richtigen Stellteilbewegungen zugeordnet werden, bevor diese schließlich in der erforderlichen Reihenfolge betätigt werden können. Um die Effizienz zu steigern, können mehrere Stellteile simultan bewegt werden. Folglich muss der Bediener zwei interne Umkodierungen vornehmen, um eine korrekte Lastbewegung zu gewährleisten:

- a. die Umkodierung der gewünschten Lastbewegungen in die Bewegungen der einzelnen DOFs, und
- b. die Zuordnung der korrekten Stellteilbewegungen zu den gewünschten Freiheitsgrad-Bewegungen.

Bei der Verwendung einer Funksteuerung muss der Bediener neben der aktuellen Position des Krans und der Gerätekinematik zusätzlich seine eigene Orientierung relativ zum Kran berücksichtigen, um die gewünschte Lastbewegung dem richtigen Steuereingang und der richtigen Bewegungsrichtung zuzuordnen. Dadurch wird die Inkompatibilität zwischen Lastbewegung und Bedienereingabe noch weiter erhöht.

Das so entstehende mehrdimensionale Kompatibilitätsproblem (vgl. [Bub-1993]) führt zu erhöhter mentaler Beanspruchung, was in Ermüdung des Bedieners, Zeitverlusten durch unnötige Kranbewegungen und einem erhöhten Fehlerpotenzial mit dem Risiko von Schäden und Frustration resultiert (multiple resource theory, vgl. [Bes-2006; Nav-1979; Wic-2008]). Dazu kommt, dass herkömmliche, achsbasierte Kransteuerungen das Systemmodell eines Krans repräsentieren. Dabei ist es möglich, dass sie dem mentalen Modell des Menschen widersprechen, wenn sich der Mensch auf die Bewegung der Last als zentrale Aufgabe der Interaktion (vgl. [Joh-1983]) und nicht auf die Bewegung der einzelnen Antriebe des Krans fokussiert.

Es kann gezeigt werden, dass eine Vereinfachung der inneren Umrechnung und eine Anpassung der Kransteuerung an das mentale Modell des Menschen das Potenzial hat, die Qualität der Interaktion zu erhöhen. Die Berücksichtigung dieser Grundprinzipien der nutzerzentrierten Gestaltung könnte dazu beitragen, die mentale Beanspruchung zu senken und in der Folge Zeit zu sparen, die Einlernphase zu verkürzen, Fehler zu reduzieren und die Zufriedenheit zu steigern (vgl. [Su-2015]).

Defizit 2

Zur nutzerzentrierten Gestaltung von Kransteuerungen existiert bislang kein systematischer Gestaltungsrahmen. Ferner sind bisher keine Kransteuerungen bekannt, die das Ergebnis eines nutzerzentrierten Gestaltungsprozesses sind.

Die im Stand der Technik und Wissenschaft beleuchteten Konzepte verfolgen das Ziel, durch die Verwendung von Auslegerspitzensteuerungen und alternativen Eingabekonzepten für den Bedienerwunsch die Steuerung der Last möglichst direkt und einfach zu ermöglichen. Viele Vorschläge zeigen erhebliches Potenzial, die Qualität der Mensch-Maschine-Interaktion zu verbessern. Gleichzeitig haben die bekannten Vorschläge jedoch eine systematische konzeptionelle Schwäche: Alle Entwicklungen basieren lediglich auf der Verwendung einer alternativen HMI-Designidee und/oder der erstmaligen Verwendung von Sensortechnologien in diesem Kontext. Obwohl einige Lösungen vielversprechende Verbesserungen in Bezug auf die Bedienerleistung und die Bedienerzufriedenheit zeigen, konnte keine systematische Betrachtung der Gründe gefunden werden, warum bestimmte HMIs aus Sicht des menschlichen Bedieners anderen überlegen sein sollen. Insbesondere finden weder Betrachtungen zu den mentalen Modellen der Bediener noch eine Untersuchung der mentalen Beanspruchung statt. Somit sind neue Konzepte das Ergebnis willkür-

licher Gestaltungsansätze, da sie sich nicht auf einen etablierten methodischen Rahmen für die Konstruktion von Kran-HMIs stützen. Es wird kein nutzerzentrierter Gestaltungsprozess durchlaufen.

Die Anwendung des nutzerzentrierten Gestaltungsprozesses sowie ein daraus resultierender Gestaltungsrahmen würde die Entwicklung von nutzerzentrierten Kran-HMIs unterstützen, die einerseits für die Steuerung der Maschine geeignet sind, andererseits aber vor allem einfache und effiziente Interaktionen fördern und damit die mentalen Anforderungen an den Bediener reduzieren. Dieser nutzerzentrierte Designansatz (d. h. das Schaffen eines Systems, das den Bedürfnissen, Fähigkeiten und dem Verhalten des Menschen Rechnung trägt [Nor-2013]) speziell für Kransteuerungen hätte das Potenzial, die Produktivität und Sicherheit des Kranbetriebs systematisch zu verbessern, wird aber bisher nicht verwendet.

Defizit 3

Auslegerspitzensteuerungen sind bei in der Praxis etablierten Stellteilen nicht mit bewegten Bedienern und der Kransteuerung per Funk auf eine Weise vereinbar, dass grundlegende Kompatibilitätsprinzipien berücksichtigt werden.

Auslegerspitzensteuerungen leisten einen wertvollen Beitrag zur nutzerzentrierten Gestaltung, da die Aufgabe eines Krans in den Mittelpunkt der Interaktion gestellt wird: die Bewegung einer Last. Auslegerspitzensteuerungen lösen die Inkompatibilität zwischen Stellteil- und Hakenbewegung auf. Die Umkodierung der gewünschten Hakenbewegung auf die Bewegungen der Krangelenke entfällt, da direkt die gewünschte Hakenbewegung vorgegeben wird. Nach wie vor müssen jedoch die möglichen Bewegungsrichtungen des Hakens über Symbole oder durch Erfahrungseffekte den Stellteilbewegungen zugeordnet werden. Hierfür kommen meist die gleichen Bedienelemente wie für die maschinenzentrierte Steuerung zum Einsatz (Linearhebel, Joysticks, Taster). Alle Konzepte haben in diesem Fall gemeinsam, dass sich die Bedienelemente und damit die Steuerungseingaben stets auf das Krankoordinatensystem beziehen.

Bei der Bedienung von einem festen Fahrerplatz aus handelt es sich hierbei dennoch um eine wesentliche Verbesserung, da die Bezugssysteme des Bedieners und des Krans aufeinander abgestimmt und fest miteinander verbunden sind: Die Eingabe der gewünschten Bewegung sowie die Bewegung des Hakens sind miteinander kompatibel. Ändert der Bediener dagegen seine Position relativ zum Kran, wie es bei der Verwendung einer Funksteuerung der Fall ist, divergieren die Bezugssysteme von Bediener und Kran. Befindet sich der Bediener beispielsweise auf der gegenüberliegenden Seite der Last relativ zum Kran, so entspricht eine Bewegung der Last nach links nun dem Bewegen des Krans nach rechts. Der Bediener muss also eine mentale Drehung seines eigenen Bezugssystems durchführen, um es mit dem Bezugssystem des Krans neu auszurichten, was die kognitiven Anforderungen der Aufgabe erhöht [DeJ-2004].

Auch in diesem Fall ist folglich – trotz der Auslegerspitzensteuerung – eine gedankliche Umkodierung auf Seiten des Bedieners notwendig, nämlich zwischen dem „Vorne“ der Steuerung und dem „Vorne“ des Krans. Da diese Umkodierung für jeden Zeitpunkt und jede Bewegung neu durchgeführt werden muss, kommt es hier trotz der Verbesserungspotenziale durch die Auslegerspitzensteuerung zu unnötiger mentaler Belastung.

Defizit 4

Bisher vorgestellte Ideen für die kompatible Eingabe der gewünschten Lastbewegung mit Hilfe einer Funksteuerung und Auslegerspitzensteuerung sind bisher nur in kontrollierter (Labor-)Umgebung oder für ganz spezifische Krane und die korrespondierenden Freiheitsgrad-Zahlen erprobt und nicht praxistauglich und universell einsetzbar.

Betrachtet man darüber hinaus Kransteuerungskonzepte mit Auslegerspitzensteuerung, deren Stellteilgestaltung von der bekannten maschinenzentrierten Steuerung (Joysticks, Linearhebel, Taster) abweicht, ergeben sich viele neuartige, innovative Interaktionsparadigmen. Die im Stand der Forschung vorgestellten Auslegerspitzensteuerungen mit innovativen Eingabegeräten weisen vielversprechende Ansätze zur Verbesserung der aktuellen Steuerungssituation bei Kranen auf und belegen qualitativ und quantitativ das Verbesserungspotenzial. Die bisher vorgestellten Lösungen haben jedoch alle mindestens einen der folgenden Nachteile im Bezug auf die praxisnahe Implementierung und Nutzung im industriellen Umfeld:

- zusätzliche und aufwendige Infrastruktur im Arbeitsbereich: vollständige oder teilweise Ausleuchtung des Arbeitsbereichs mit Kameras [Pen-2009b; Fri-2003; Pen-2012b], RFID-Lesegeräten [Pen-2009c; Pen-2012a; Pen-2013] etc.
- physischer Lastzugriff [Cam-2016; Kaz-2004; Col-2003; Dem-2019; Dem-2020]
- die fehlende Erfüllung grundlegender Steuerungsstandards (z. B. Haptik [Kiv-2013b; Sor-2007; Sut-2007] sowie fehlende Robustheit gegenüber Umgebungsgeräuschen [Maj-2016; Maj-2017; Maj-2018] etc.)
- Begrenzung auf bestimmte Krane mit einer festen Anzahl DOFs

Eine praxistaugliche Teleoperation der entsprechenden Krane und damit eine Verbindung der direkten, zielorientierten Vorgabe der gewünschten Bewegungsrichtung aus dem Blickwinkel des Bedieners, verbunden mit den zahlreichen Vorteilen einer Funksteuerung, findet bisher bei keinem der Konzepte statt. Aus diesen Gründen eignen sich alle bisherigen Ansätze nicht für einen flächendeckenden Einsatz an allen Arten von funkgesteuerten Lasthebemitteln mit beliebig vielen DOFs.

Diese Defizite sind hinderlich. Aktuelle Steuerungskonzepte sind nicht so gut wie sie sein könnten und sind besonders für weniger erfahrene Bediener eine Herausforderung, da der

Bediener ständig gleichzeitig mit mehreren Aufgaben konfrontiert wird. Wenn man bedenkt, dass sowohl die Produktivität als auch die Sicherheit des Kranbetriebs von der Effektivität und Effizienz der Kran-Bediener-Interaktion abhängt (vgl. [Fan-2018]), werden die Verbesserungspotenziale offensichtlich.

4.2 Basisanforderungen und Forschungslücke

Die Behebung der Defizite bisheriger Kransteuerungen ist ein zentrales Ziel dieser Arbeit. Gemäß dem Vorgehen zur nutzerzentrierten Gestaltung gebrauchstauglicher Systeme (siehe Abbildung 1-2) werden zunächst Nutzungsanforderungen festgelegt, um diesen Defiziten zu begegnen. Die Anforderungen ergeben sich unmittelbar aus den Betrachtungen im Stand der Technik, den im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführten Expertenbefragungen und aus den im vorangegangenen Abschnitt hergeleiteten Defiziten aktuell vorhandener HMIs.

Es lassen sich folgende Basisanforderungen ableiten, die von nutzerzentrierten Interaktionskonzepten zur Laststeuerung an Kranen berücksichtigt werden müssen:

- Aufgabenorientierter Ansatz, d. h. Steuerung der Last anstatt der Kran-DOFs
- Systematisches, nutzerzentriertes Vorgehen bei der Gestaltung des HMI zur Reduktion der mentalen Beanspruchung des Bedieners bei der Laststeuerung
- Berücksichtigung von Kompatibilitätsprinzipien, auch bei Verwendung einer Funksteuerung
- Keine aufwendige Infrastruktur wie Kameras oder RFID-Reader zur Ausleuchtung des Arbeitsraums
- Überbrückung unzugänglicher Bereiche, d. h. keine Notwendigkeit eines permanenten Haken- oder Maschinenkontakts durch den Bediener, um für Krane mit großen Reichweiten und Hubhöhen einsetzbar zu sein
- Berücksichtigung der Praxisanforderungen des Umfelds, z. B. an die Genauigkeit, Funktionsfähigkeit im Innen- und Außenbereich, Witterungsunabhängigkeit, Abwesenheit von GPS-Signalen, Robustheit gegen Umgebungseinflüsse (wie Schmutz, Stoß, Lärm, Lichtverhältnisse, elektromagnetische Strahlung)
- Eignung für mobile und stationäre Krane mit beliebigen translatorischen und rotatorischen DOFs und beliebig großen Arbeitsräumen

In Tabelle 4-1 sind alle bekannten Steuerungskonzepte (vgl. Kapitel 3) zeilenweise aufgeführt. Spaltenweise wird dann für jedes Konzept auf Grundlage der Literatur bewertet, ob die Basisanforderungen, die sich aus den Defiziten ergeben, durch das entsprechende Konzept erfüllt wird. Es wird insbesondere darauf hingewiesen, dass keine Festlegung auf rein funkgesteuerte Geräte erfolgt, sondern nach Lösungen gesucht wird, die sich sowohl

für die Steuerung von einem festen Bedienplatz als auch für Funksteuerungen eignen. Darüber hinaus erfolgt ebenso wenig eine Eingrenzung auf Standardgeräte oder bestimmte Kranbauweisen, so dass die Darstellung für alle Maschinen gilt, bei deren Bedienung zur Steuerung eines Endeffektors mehrere DOFs berücksichtigt werden müssen (vgl. Betrachtungsgegenstand auf Seite 31).

Im Überblick wird deutlich, dass keines der bisher vorliegenden Konzepte alle Anforderungen erfüllt, da sie entweder das Ergebnis eines maschinenzentrierten (d. h. achsbasierten) Gestaltungsansatzes sind, oder – sofern ein nutzerzentrierter (d. h. laststeuernder) Ansatz zu erkennen ist – mindestens eine weitere Anforderung verletzen. Es existiert keine Lösung, die alle Basisanforderungen erfüllt und folglich alle Defizite behebt. Diese Lücke soll durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden.

Tabelle 4-1: Überblick und Bewertung existierender Steuerungskonzepte

Gestaltungsgrundsatz	maschinenzentriert		aufgabenorientiert				
	DOF (Degree of Freedom)-Steuerung		Auslegerspitzensteuerung/Laststeuerung				
	Aufgabenorientierte Gestaltung: direkte Steuerung der Lastbewegung	Entwicklung und/oder Nutzung von systematischen Gestaltungsregeln	Erfüllung von Kompatibilitätsprinzipien	Erfüllung von wichtigen Praxisanforderungen			
Basisanforderung		Kompatible Zuordnung: Eingabe → Lastbewegung	autom. Berücksichtigung von Bewegung des Bedieners bei Funksteuerung	keine aufwendige Infrastruktur (Kameras, Reader etc.)	keine Berührung des Hakens/der Last	Einsatz im praxisnahen Umfeld (d. h. außerhalb des Labors)	Einsatz bei beliebigen DOFs
Konventionelle DOF-Steuerung (fest oder bewegt) [DIN-13557]	x	x	x	x	✓	✓	✓
HBC-pilot [HBC-2019a]	x	x	o	x	✓	✓	x
Boom Tip Control (Produkte): [Loh-2013; Eps-2018; HIA-2018; Pali-2019; Leh-2019; Tec-2019a; Dem-2019; Dem-2020]	✓	x	✓	x	✓	✓	✓
Boom Tip Control (Forschung) [Bak-2011; Hen-2016; Löf-2009; Mor-2014; Pro-2003; Wes-2014; Man-2017; Man-2019]	✓	x	✓	x	✓	✓	✓
Marker-Tracking [Pen-2009b; Pen-2012b; Pen-2009c; Pen-2012a]	✓	x	✓	✓	x	x	✓
Physische Manipulation (Kran) [Cam-2016; Kaz-2004; Col-2003; Sch-2019] & Robotik	✓	x	✓	x	✓	x	✓
Funktsteuerung + mitdrehendes Koordinatensystem [Kiv-2014]	✓	x	✓	✓	x	x	✓
Touch-Eingaben (Imitation konventioneller DOF-Steuerung) [Kiv-2013a; Kiv-2013b; Sut-2007; Cha-2016; KJK-2021]	x	x	x	x	✓	✓	✓
Touch-Eingaben (Auslegerspitzensteuerung + angepasste Bedienelemente) (Kran) [Kiv-2013a; Kiv-2013b; Sor-2008] & Robotik [Fra-2016; Ton-2018; Wu-2020; Car-2013]	✓	x	✓	x	✓	✓	✓
Touch-Eingabe (Auslegerspitzensteuerung + mitdrehendes Koordinatensystem) [Kiv-2013a; Kiv-2013b; Kiv-2014]	✓	x	✓	✓	x	x	✓
Zielvorgabe durch Augmented Reality [Tu-2020]	✓	x	✓	✓	✓	o	✓
Kippen eines Smartphones (Kran) [Kiv-2013a]	✓	x	✓	x	✓	✓	✓
Gestensteuerung [Fri-2003; Pie-2020; Ama-1999]	✓	x	✓	x	x	x	✓
Sprachsteuerung (Kran) [Maj-2016; Maj-2017; Maj-2018] & Robotik	✓	x	✓	x	x	x	✓
Andere mobile Arbeitsmaschinen: DOF-Steuerung (Führerhaus & Funksteuerung) [Hay-2012; Kim-2009; Vern-2019; Yoo-2010; Oki-2019; Hen-2016]	✓	x	✓	x	✓	✓	✓
Robotik: Mehrdimensionale Eingabegeräte	✓	o	✓	x	✓	✓	✓
Robotik: Gestensteuerung und Tracking durch Bildverarbeitung	✓	o	✓	o	x	o	✓
Robotik: Nutzung erweiterter Realität	✓	x	✓	✓	✓	o	✓
Robotik: Master-Slave-Systeme	✓	o	✓	x	✓	o	o
Drohnensteuerung [Ber-2008; poc-2014]	✓	x	✓	o	✓	x	x

Legende: Erfüllung der Anforderung ✓ : erfüllt x : nicht erfüllt o : in Sonderfällen erfüllt (abhängig von Maschinenart und Implementierung)

4.3 Forschungsfragen

Es werden die folgenden Forschungsfragen formuliert, deren Beantwortung dazu beiträgt, die Forschungslücke zu schließen:

1. Wie sieht ein systematischer Gestaltungsrahmen zur Entwicklung von nutzerzentrierten Mensch-Maschine-Schnittstellen für Krane aus und welche Gestaltungsrichtlinien bzw. Werkzeuge sollten hierfür berücksichtigt werden?
2. Welche Auswirkungen haben nutzerzentrierte Mensch-Maschine-Schnittstellen? Wie verändert sich die Mensch-Maschine-Interaktion (insb. mentale Beanspruchung und Gebrauchstauglichkeit) von Kranen, wenn statt der herkömmlichen, maschinenzentrierten Steuerung nutzerzentrierte Mensch-Maschine-Schnittstellen eingesetzt werden?
3. Wie können nutzerzentrierte Steuerungskonzepte für Krane mit bewegtem Bediener im realistischen Nutzungskontext aussehen und wie lassen sie sich umsetzen (Proof of Concept)?
 - a. Eingabemodalität: Welche Bedien-/Stellteile und Interaktionsparadigmen eignen sich für die nutzerzentrierte Steuerung?
 - b. Bedienerposition und -ausrichtung: Wie kann man aus der Eingabe eines bewegten Bedieners unter Berücksichtigung der aktuellen Bedienerorientierung bzw. -position die gewünschte Bewegung der Last ermitteln?
 - c. Steuerung/Regelung: Welche Steuerungs- (Rückwärtskinematik) und Regelungsansätze eignen sich für die Umsetzung eines nutzerzentrierten Steuerungskonzepts an einem realen Kran?
4. Welche Effekte und Verbesserungen ergeben sich durch den Einsatz von nutzerzentrierten Mensch-Maschine-Schnittstellen im Vergleich zu herkömmlichen Kransteuerungen bei einem Einsatz an einem realen Kran?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 wird in Kapitel 5 ein systematischer Gestaltungsansatz für nutzerzentrierte HMIs zur Laststeuerung an Kranen abgeleitet, um einen allgemeinen Rahmen zu schaffen, der die Entwicklung verbesserter Kran-HMIs unterstützt. Hierfür wird analysiert, welche psychologischen Zusammenhänge berücksichtigt werden können, um die negativen Auswirkungen von Kran-HMIs auf die mentale Beanspruchung des Bedieners zu reduzieren. Der Fokus liegt auf Steuerungen, die sowohl für feste als auch für bewegliche Bediener funktionieren. Mit Hilfe dieses Methodenbaukastens werden anschließend zwei konkrete Interaktionsparadigmen abgeleitet.

In Kapitel 6 erfolgt die Evaluation der beiden Interaktionsparadigmen mit Hilfe einer Laborstudie (48 Probanden) im Hinblick auf die mentale Beanspruchung und die Gebrauchstauglichkeit. Die Laborstudie dient einerseits zur Evaluation der abgeleiteten Methode und andererseits auch zum direkten Vergleich der beiden neuen Interaktionsparadigmen untereinander sowie zum maschinenzentrierten HMI und damit zur Beantwortung der Forschungs-

frage 2. Forschungsfrage 2 widmet sich der Untersuchung der Effekte von nutzerzentrierten HMIs auf Basis einer Laborstudie und untersucht somit grundlegende Effekte.

Kapitel 7 beschreibt anschließend den Nutzungskontext für die Realisierung und Praxisevaluierung der HMIs. Zudem wird ein Steuerungs- und Regelungskonzept mit Auslegerspitzensteuerung vorgestellt, das für die reale Umsetzung der nutzerzentrierten HMIs an einem echten Kran notwendig ist. Das Kapitel 7 bildet somit die Grundlage für die praktische Umsetzung der Interaktionsparadigmen.

Die Kapitel 8 und 9 beschäftigen sich mit Forschungsfrage 3 und zeigen konkrete Möglichkeiten auf, die Interaktionsparadigmen praktisch umzusetzen und dabei die Anforderungen an die Praxistauglichkeit zu erfüllen. Zudem werden die derzeit noch vorhandenen Grenzen der Paradigmen für den Praxiseinsatz und damit verbundene Umsetzungshindernisse diskutiert.

In Kapitel 10 wird zur Beantwortung von Forschungsfrage 4 die Gebrauchstauglichkeit der implementierten Steuerungskonzepte im realen Nutzungskontext durch eine Probandenstudie mit 56 Teilnehmern in zwei Nutzergruppen (Experten und Novizen) untersucht. Im Gegensatz zur Laborstudie erfolgt diese Evaluation im realen, praxisnahen Nutzungskontext an einem realen Kran. In diesem Zusammenhang wird gleichzeitig untersucht, ob sich die im Labor gemessenen Effekte auf die reale Anwendung übertragen lassen und ob sich die Ergebnisse der Laborstudie in der Praxis bestätigen.

5 Lösungsansatz: Systematische Generierung und Ausgestaltung nutzerzentrierter Steuerungskonzepte zur Kransteuerung

Ziel dieses Kapitels ist die Beantwortung von Forschungsfrage 1, indem systematisch Gestaltungslösungen für nutzerzentrierte Steuerungskonzepte zur Kransteuerung erarbeitet werden. Hierfür gilt es zunächst zusammenzuführen, welche psychologischen Konstrukte dabei helfen, die Auswirkungen von Kran-HMIs auf die mentale Beanspruchung des Bedieners sowie auf die Gebrauchstauglichkeit des HMI zu beurteilen und hieraus einen systematischen Gestaltungsansatz bezüglich der nutzerzentrierten Gestaltung abzuleiten. Im folgenden Abschnitt wird daher zunächst literaturbasiert die konzeptionelle Grundlage gelegt für die systematische, nutzerzentrierte Gestaltung der Steuerungen im Hinblick auf Intuitivität, mentale Modelle, Kompatibilität und die Auswirkungen der Automatisierung auf die mentale Beanspruchung. Hieraus werden Gestaltungsrichtlinien abgeleitet.

Zusammengeführt ergibt sich aus allen Gestaltungsrichtlinien ein Methoden-Baukasten (Gestaltungsrahmen), der sich für die Entwicklung verschiedener Steuerungen sowie den Vergleich in Bezug auf die Interaktionsqualität eignet. Die konsequente Berücksichtigung der Gestaltungsrichtlinien kann nicht nur dabei helfen, systematisch nutzerzentrierte Kran-HMIs zu entwickeln, sondern auch dabei, diese bereits während des Entwicklungsprozesses zu bewerten. Anschließend werden die Umsetzungsschritte für die praktische Anwendung des Gestaltungsrahmens erläutert und zwei Interaktionsparadigmen abgeleitet.

Inhalte dieses Kapitels wurden vom Autor bereits in [Fot-2020; Top-2021b] vorveröffentlicht.

5.1 Gestaltungsrichtlinien für nutzerzentrierte Kransteuerungen

Basierend auf den Definitionen und den Grundbegriffen aus Abschnitt 2.1 lassen sich literaturbasiert einige Schlussfolgerungen hinsichtlich der nutzerzentrierten HMI-Gestaltung ziehen: Um die Gebrauchstauglichkeit und Intuitivität im Vergleich zum derzeitigen maschinenzentrierten HMI zu erhöhen, sollte (1) ein nutzerzentriertes HMI die Bildung geeigneter mentaler Modelle unterstützen, (2) Kompatibilität sicherstellen und (3) Potenziale der Systemautomatisierung nutzen, ohne den Bediener aus dem Regelkreis zu nehmen. Im Folgenden werden diese drei Kernwerkzeuge erläutert und in Gestaltungsrichtlinien überführt.

Werkzeug 1: Unterstützung bei der Bildung eines angemessenen mentalen Modells

Das mentale Modell des Bedieners wird im Wesentlichen durch das System und die zu erledigende Aufgabe gebildet. Die Hauptaufgabe bei der Bedienung eines Krans ist das Bewegen einer Last von einem Startpunkt zu ihrem Ziel. Daher sollte jedes nutzerzentrierte HMI eine direkte Überlagerung mit dem Ziel des Menschen bieten.

Der Vorteil eines detaillierten mentalen Modells, das es dem Bediener ermöglicht, die Reaktionen der Systemelemente mental zu simulieren, liegt in der Anwendung von wissensbasiertem Verhalten. Krane werden jedoch für die standardisierte Aufgabe eingesetzt, eine Last von einer Position zu einer anderen zu bewegen. Wissensbasiertes Verhalten zur Problemlösung scheint hierfür eine recht strenge Voraussetzung zu sein, was dafür spricht, dass zur Bewegung einer Last kein detailliertes mentales Modell notwendig ist.

Gleichzeitig ist es so, dass die konkreten mechanischen und elektrischen Funktionsprinzipien, die es dem Kran ermöglichen, die Last zu bewegen, auch beim maschinenzentrierten HMI nicht für den Bediener sichtbar sind. Das maschinenzentrierte HMI ist folglich gar nicht dazu in der Lage, ein sehr detailreiches mentales Modell (Glass-Box, Metaphern, Netzwerk) zu unterstützen. Stattdessen erleichtert es lediglich die Bildung von Surrogate-Modellen zur Verbindung von Eingabe und Ausgabe. Da die Bewegungen der Kran-DOFs unabhängig vom HMI deutlich sichtbar sind, sind Systemfehler, wie z. B. die Fehlfunktion eines Kranaktuators, unabhängig vom verwendeten HMI leicht zu erkennen. Es ist daher zweifelhaft, dass ein explizites Surrogate-Modell als mentales Modell notwendig ist, weil es für den Bediener ohnehin offensichtlich ist, wenn Eingabe und Ausgabe nicht in gewünschter Weise korrespondieren.

Betrachtet man den Beitrag des maschinenzentrierten HMI zum mentalen Modell des Bedieners zeigt sich, dass es zwar die Bildung von Surrogate-Modellen erleichtert, dessen Nutzen im Hinblick auf die Aufgabe jedoch begrenzt ist. Die Bildung eines detailreichen mentalen Modells (Surrogate-Modell, Metapher, Glas-Box-Modell, Netzwerkmodell) sollte daher nicht im Fokus stehen.

Es lässt sich folgern, dass es erstens in den allermeisten Fällen gar nicht erforderlich ist (und auch nicht sein sollte), dass der Bediener die Bewegungen der einzelnen Kransegmente berücksichtigt und steuert, um sein primäres Ziel (d. h. das Bewegen der Last) zu erreichen. Daher besteht kein Bedarf an einer genauen mentalen Repräsentation der Systemzustände. Zweitens spielen Problemlösung und folglich wissensbasiertes Verhalten keine entscheidende Rolle bei der Kransteuerung. Aus diesen beiden Gründen liegt der Schluss nahe, dass für die überwiegende Mehrheit der Kranbediener und -anwendungen kein aufwendiges, detailreiches mentales Modell erforderlich ist, das explizit Problemlösungskompetenzen beinhaltet. Da Krane nur für eine bestimmte Aufgabe verwendet werden, ist es sinnvoll, ein Konzept zu wählen, das die Aufgabe in Beziehung setzt zur dafür

notwendigen Aktion. Dies trifft für Task-Action-Mappings zu. Außerdem tragen Task-Action-Mappings nachweislich dazu bei, regelbasiertes und fertigkeitbasiertes Verhalten zu fördern.

Folglich sollte ein nutzerzentriertes HMI dem Bediener die Möglichkeit geben, die Bewegung der Last direkt zu steuern. Dies ist bei der Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung üblicherweise erfüllt. Die beginnende Verbreitung von Auslegerspitzensteuerungen in Industrie und Forschung unterstreicht, dass die Unterstützung bei der Bildung eines angemessenen mentalen Modells in Form von Task-Action-Mappings nahe liegt und hervorragend zur Aufgabenstellung des Kranführers passt.

Gestaltungsrichtlinie 1
Aufgabenorientierte (d. h. lastorientierte) Steuerung: Direkte Vorgabe der gewünschten Lastbewegung durch den Bediener, um Task-Action-Mappings als mentales Modell zu unterstützen.

Werkzeug 2: Konsequente Berücksichtigung von Kompatibilitätsprinzipien

Beim maschinenzentrierten HMI entspricht die Zuordnung der Bedienereingaben zu den Bewegungen der Last keiner Response-Effect-Beziehung im Sinne der RE-Kompatibilität, die üblicherweise von vielen Bedienern außerhalb der Kransteuerung erlernt wird. Daher kann in diesem Fall das Wissen, das zum Ableiten der Task-Action-Mappings erforderlich ist, als Expertenwissen im Kontinuum des Wissens eingestuft werden. Im Gegensatz dazu sollten die Task-Action-Mappings für ein nutzerzentriertes HMI den grundsätzlichen Prinzipien der Kompatibilität folgen, die auf der sensomotorischen Ebene – und damit auf einem niedrigeren Wissensniveau – angesiedelt sind. Das bedeutet, dass eine bestimmte Steuereingabe in eine Richtung immer zu einer Lastbewegung in einer festgelegten, vorhersagbaren räumlichen Dimension führt, um Set-Level-Kompatibilität der Eingabe und der Bewegung der Last zu erreichen.

Beim maschinenzentrierten HMI ist Set-Level-Kompatibilität nicht gegeben. Nicht nur der Umstand, dass keine der gängigen Eingabemöglichkeiten wie Taster, Linearhebel oder Joysticks eine dimensionale Kompatibilität zu den Bewegungsachsen der Kransegmente aufweist, sondern auch die Tatsache, dass sich die Orientierung dieser Achsen in Abhängigkeit von der Orientierung der anderen Kransegmente ändert (kinematische Kette), machen Set-Level-Kompatibilität bei maschinenzentrierten Kransteuerungen unmöglich. Bei Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung hingegen ist Set-Level-Kompatibilität auch mit den herkömmlichen Eingabemöglichkeiten leicht möglich.

Nur wenn Set-Level-Kompatibilität vorhanden ist, besteht außerdem überhaupt die Möglichkeit, zusätzlich Element-Level-Kompatibilität zu erreichen, was sich für maschinenzen-

trierte HMIs folglich ebenfalls ausschließt. Mit Element-Level-Kompatibilität lassen sich die Vorteile in der Bearbeitungsgeschwindigkeit nach dem Dual Process Model erschließen, wenn der automatische (unbewusste) und der bewusste Bearbeitungsweg zum gleichen Ergebnis führen. Element-Level-Kompatibilität bei der Steuerung einer Last ist gegeben, wenn eine Steuereingabe immer zu einer Lastbewegung parallel zur Eingaberichtung führt, unabhängig von der Orientierung des Bedieners (automatische Anpassung auf die Bedienerposition/-orientierung). Kombiniert man Set-Level- und Element-Level-Kompatibilität im Kontext der Kransteuerung, resultiert daraus automatisch Stimulus-Response und Response-Effect-Kompatibilität für die Lastbewegung. Dies sollte in jedem Fall bei der Entwicklung von nutzerzentrierten HMIs berücksichtigt werden.

Es gibt einige zusätzliche Faktoren, die bei der Analyse der Kompatibilität einer Schnittstelle berücksichtigt werden sollten. Erstens ist Response-Effect-Kompatibilität nur dann gegeben, wenn die Lastbewegung tatsächlich die beabsichtigte Auswirkung der Aktion des Bedieners ist [Shi-2010]. Hiervon wird bei der Kransteuerung ausgegangen. Zweitens hängen die Kompatibilitätseffekte von der Visual-Field-Kompatibilität ab (nicht aber von der Control-Display-Kompatibilität). Nur wenn das Sichtfeld des Bedieners mit dem Referenzsystem des Eingabegeräts übereinstimmt, kann er das volle Potenzial der Kompatibilitätseffekte nutzen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein nutzerzentriertes System dem Bediener ermöglichen sollte, kompatible Task-Action-Mappings auf der Grundlage kompatibler Bedienereingaben und Systemausgaben zu bilden. Die Kompatibilität sollte sich auf Set-Level-, Element-Level- (und im Ergebnis Stimulus-Response- und Response-Effect-Kompatibilität) und Visual-Field-Kompatibilität erstrecken.

Da einfache räumliche Kompatibilitätsbeziehungen unabhängig vom kulturellen Hintergrund erlernt werden, ist das erforderliche Wissen auf der sensomotorischen Ebene im Kontinuum des Wissens angesiedelt. Darüber hinaus wird dieses Wissen unbewusst angewendet, wie das duale Prozessmodell der Reaktionsauswahl zeigt, das Kompatibilitätseffekte über den parallelen automatischen Verarbeitungsweg erklärt. Somit werden die Anforderungen zur Ermöglichung intuitiver Interaktionen (unbewusste Anwendung von bereits vorhandenem Wissen) für eine große und heterogene Gruppe von Bedienern unabhängig von deren Vorerfahrungen mit der Steuerung von Kranen erfüllt, wenn die genannten Kompatibilitätsprinzipien konsequent berücksichtigt werden. Zu betonen ist, dass nicht nur für Novizen, sondern auch für erfahrene Bediener kompatible Task-Action-Mappings zu erwarten sind, was auch Experten bei der Aufgabenerfüllung in anspruchsvollen Situationen zugute kommen würde.

Im Ergebnis könnte der Bediener durch die Anwendung kompatibler, bereits verinnerlichter Task-Action-Mappings bereits bei der Erstbenutzung des Krans auf einer regelbasierten

Ebene interagieren, anstatt auf vorher erlerntes Wissen (wissensbasierte Ebene) angewiesen zu sein. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass kompatible Zuordnungen besonders stabil sind, da sie auch außerhalb des Kontexts von Kransteuerung häufig kodiert und abgerufen werden. Infolgedessen ist es wahrscheinlich, dass sie die Leistung des Bedieners bei regel- und fertigkeitbasiertem Verhalten verbessert. Im Gegensatz dazu müssen die Task-Action-Mappings für das maschinenzentrierte HMI von jedem Bediener ohne wesentliche Erfahrung mit dem jeweiligen Kransystem bewusst erlernt werden, was sie im Kontinuum des Wissens auf der Expertenebene verortet. Ein nutzerzentriertes HMI, das auf kompatiblen Task-Action-Mappings basiert, ermöglicht, dass sich der Bediener auf die Erfüllung der Aufgabe konzentrieren kann anstatt darauf, die Schnittstelle zu verstehen.

Gestaltungsrichtlinie 2

Kompatibilität zwischen Bedienereingabe (gewünschter Lastbewegung) und Systemausgabe (tatsächlicher Lastbewegung), um die Bildung *kompatibler* Task-Action-Mappings zu fördern. Berücksichtigung von:

- Set-Level-Kompatibilität
- Element-Level-Kompatibilität
- Stimulus-Response-Kompatibilität
- Response-Effect-Kompatibilität
- Visual-Field-Kompatibilität

Werkzeug 3: Gezielte Nutzung von Automatisierungsansätzen

Die Interaktion zwischen dem Bediener und dem Kran kann auch dadurch verbessert werden, dass der Kran ganz oder teilweise automatisiert wird. Hierdurch sinken die Anforderungen an die Informationsverarbeitung auf Seiten des Bedieners, da er nicht mehr alle Kodierungs- und Steuerungsaufgaben selbst übernehmen muss. Wenn der Bediener beispielsweise sein Aufgabenziel (d. h. den Zielort der Last) vorgibt, könnte die Steuerung des Krans alle notwendigen Operationen übernehmen, um die Last an den gewünschten Punkt zu bewegen. In diesem Fall müsste der Bediener überhaupt keine Kranbewegungen mehr vorgeben. Es handelt sich folglich um ein stärker automatisiertes Interaktionskonzept, das der Maschine mehr Verantwortung zuweist.

Es ist zu erwarten, dass ein solches Konzept eine zusätzliche Reduzierung der mentalen Beanspruchung des Bedieners mit sich bringt, da der Bediener weniger mentale Operationen durchführen muss. Die Literaturübersicht (vgl. Abschnitt 2.2) zeigt jedoch auch, dass die Auswirkung der Automatisierung auf die mentale Beanspruchung komplexer ist. Wenn die Automatisierung die Verantwortlichkeiten des Bedieners von der aktiven Steuerung zur passiven Überwachung und Fehlererkennung verlagert, kann sich die Systemleistung nachweislich verschlechtern, da der Mensch vorrangig mit Aufgaben konfrontiert ist, die er nicht

besonders gut beherrscht. Dies kann entweder in mentaler Unterforderung im Normalbetrieb oder mentaler Überforderung bei unerwartetem Systemverhalten resultieren. Bei sorgfältiger Anwendung kann die Automatisierung jedoch ein weiteres Werkzeug sein, das den Bediener beim Erreichen seines primären Ziels unterstützt, und gleichzeitig seine mentale Beanspruchung verringert. Ob die Verringerung der mentalen Beanspruchung jedoch auch in einer erhöhten Gebrauchstauglichkeit und im Ergebnis in erhöhter Intuitivität resultiert, muss am konkreten Interaktionsparadigma einzeln untersucht werden.

Gestaltungsrichtlinie 3
Gezielte Automatisierung mit Hilfe von rechnergestützten Assistenzfunktionen.

5.2 Resultierender Gestaltungsrahmen

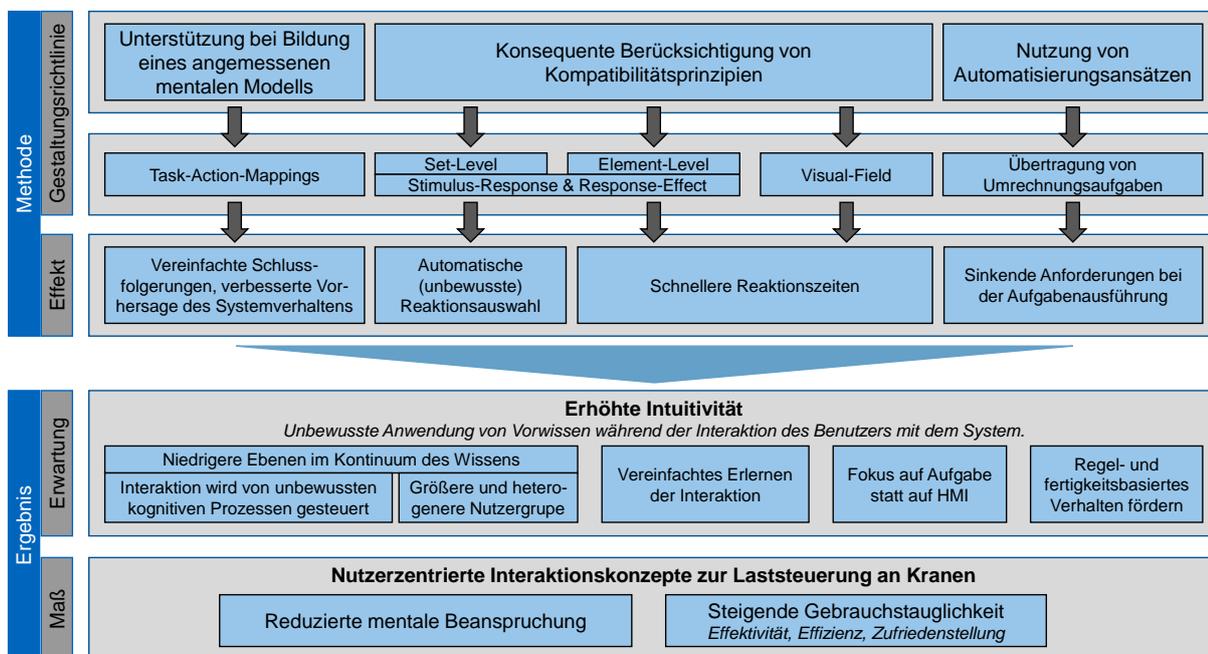


Abbildung 5-1: Methodischer Rahmen für die systematische Ableitung von nutzerzentrierten Kran-HMIs: Gestaltungsrichtlinien und bekannte Effekte (oben) und Schlussfolgerungen zur Intuitivität bzw. den ergonomischen Messgrößen (unten)

Zusammenfassend zeigen die Gestaltungsrichtlinien die drei Hauptstellgrößen für die Entwicklung nutzerzentrierter Kran-HMIs mit dem Ziel einer verbesserten Intuitivität und Gebrauchstauglichkeit. Sie bilden den methodischen Werkzeugkasten für die Entwicklung nutzerzentrierter Kran-HMIs und gelten gleichermaßen für teleoperierte Krane und für Krane mit festem Bedienplatz. Abbildung 5-1 zeigt eine Zusammenfassung der Werkzeuge und illustriert auch die zu erwartenden Effekte, wenn die Werkzeuge richtig eingesetzt werden. Zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Werkzeugen und den zu erwartenden Effekten wird auf die ergonomischen Grundprinzipien in Abschnitt 2.1 verwiesen.

Zu den erwarteten Effekten, die sich aus der Berücksichtigung der Gestaltungsrichtlinien ergeben, gehören:

- Vereinfachte Schlussfolgerungen und verbesserte Vorhersage des Systemverhaltens durch ein mentales Modell, das direkt die Aufgabe der Lastbewegung und die hierfür notwendigen Aktionen des Bediener abbildet.
- Automatische (unbewusste) Reaktionsauswahl.
- Schnellere Reaktionszeiten durch Aktivierung des automatischen Pfades im Dual Process Model.
- Sinkende Anforderungen bei der Aufgabenausführung durch Verlagerung von Umkodierungsaufgaben vom Bediener in die Steuerungslogik des Krans.

Im Ergebnis wird eine erhöhte Intuitivität erwartet. Die in der Grafik angegebenen erwarteten Folgen im Hinblick auf das Kontinuum des Wissens, das Regulationsebenenmodell von Rasmussen, die Einlernzeit und den Bedienerfokus sind allesamt Einzelaspekte unter dem Überbegriff Intuitivität (vgl. Abschnitt 2.1). Da Intuitivität nicht direkt messbar ist, werden im Gestaltungsrahmen die zwei üblichsten Messgrößen zur Bewertung von Intuitivität herangezogen: die mentale Beanspruchung sowie die Gebrauchstauglichkeit. Diese beiden Maße dienen im Folgenden dazu, den Gestaltungsrahmen sowie die daraus abgeleiteten Interaktionskonzepte zu evaluieren. Zeigt sich hier, dass die neuen Steuerungskonzepte dem bisherigen maschinenzentrierten Konzept messbar überlegen sind, kann von einer höheren Intuitivität ausgegangen werden.

Der entwickelte Rahmen bildet die methodische Grundlage für die Ableitung innovativer Kran-HMIs und ermöglicht gleichzeitig die Bewertung verschiedener Interaktionskonzepte bereits vor ihrer Implementierung hinsichtlich des Beitrags zu einer intuitiven Mensch-Maschine-Interaktion. Daher wird der vorgestellte Rahmen als wichtiger Leitfaden für zukünftige Entwicklungen von Kran-HMIs betrachtet.

5.3 Hinweise zur Ausgestaltung von Steuerungskonzepten

Die Umsetzung und damit die praktische Realisierung neuer nutzerzentrierter Steuerungskonzepte auf Basis des Gestaltungsrahmens erfolgt – analog zu den drei Gestaltungsregeln – in drei Schritten:

1. Ableitung von Varianten zur aufgabenorientierten (d. h. lastorientierten) Vorgabe der gewünschten Lastbewegung mit dem Ziel, die Bildung von Task-Action-Mappings zu unterstützen
2. Kompatible Gestaltung der Bedieneringabe, des verwendeten Steuerungsgeräts und der Systemausgabe

3. Integration von rechnergestützten Assistenzfunktionen und Umrechnungen in der Steuerungslogik des Krans

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die entwickelten Steuerungskonzepte an einem Ladekran am Campus Garching der Technischen Universität München appliziert (zum Nutzungskontext siehe Kapitel 7). Aus diesem Grund erfolgt die beispielhafte Darstellung der Umsetzungsschritte sowie die anschließende Evaluation der Steuerungskonzepte ebenfalls an einem Ladekran. Die Konzepte sind jedoch nicht an die Gestaltung des Krans gebunden, sondern beliebig auf andere Krane und andere Krananwendungen übertragbar.

Varianten der aufgabenorientierten lastorientierten Bewegungsvorgabe

Die zentrale Aufgabe, die jeder Kranbediener lösen möchte, ist die Bewegung einer Last von einem Startpunkt zum Zielort. Der Unterschied zwischen Start- und Zielpunkt wird vom Menschen visuell erfasst, um aus dem Ist-Zustand einen Soll-Zustand und mögliche Trajektorien der Lastbewegung abzuleiten. Der Mensch fungiert in diesem Zusammenhang als Regler (vgl. [Bub-2015, Kap. 2]). Die Differenz zwischen Führungsgröße (Aufgabe: Wunschposition und Wunschtrajektorie der Last) und der Nachführgröße (Effekt: tatsächliche Position und Trajektorie) wird dabei vom Menschen mental gebildet. Es handelt sich um eine *Folgeaufgabe* [Bub-1993, S. 407]: „Welchem genauen Pfad will ich folgen, durch den jede Kollision mit bewegten und stehenden Objekten vermieden wird?“ [Bub-2015, S. 28]).

Um eine Last im Raum von einem Startpunkt A mit den Koordinaten (x_A, y_A, z_A) zu einem Zielpunkt $B(x_B, y_B, z_B)$ zu bewegen, können dem System verschiedene Vorgaben gemacht werden:

- **Lagesteuerung:** Die Koordinaten des Zielpunkts B (Punktvorgabe) und/oder beliebig vieler Zwischenpunkte zwischen A und B (Trajektorienvorgabe)
- **Geschwindigkeitssteuerung:** Vorgabe eines Geschwindigkeitsvektors $\dot{B}(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$, der zu einer Bewegung in Richtung von B führt
- **Beschleunigungssteuerung:** Vorgabe eines Beschleunigungsvektors $\ddot{B}(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})$, der zu einer Beschleunigung der Last in Richtung von B führt
- **Rucksteuerung:** Vorgabe eines Ruckvektors $\overset{\cdot\cdot}{B}(\overset{\cdot\cdot}{x}, \overset{\cdot\cdot}{y}, \overset{\cdot\cdot}{z})$, der zu einer zeitlichen Änderung der Beschleunigung der Last in Richtung von B führt

Abbildung 5-2 illustriert mit Hilfe eines Flussdiagramms den idealisierten Steuerungsablauf für die ersten beiden Varianten. Beschleunigungs- und Rucksteuerungen sind für die Steuerung durch einen Bediener unabhängig von der Aufgabenart (Folge- oder Kompensationsaufgabe) nur äußerst schlecht geeignet und werden daher nicht weiter betrachtet

(vgl. [Bub-1993, S. 370] und [Bub-1993, Abbildung 5.2-30 auf S. 370]). Stattdessen werden nur Lage- und Geschwindigkeitssteuerungen im Folgenden berücksichtigt. Der Zielpunkt B kann somit in einem oder mehreren Iterationsschritten durch die Vorgabe eines (Zwischen-)Zielpunkts oder einer Geschwindigkeit erreicht werden.

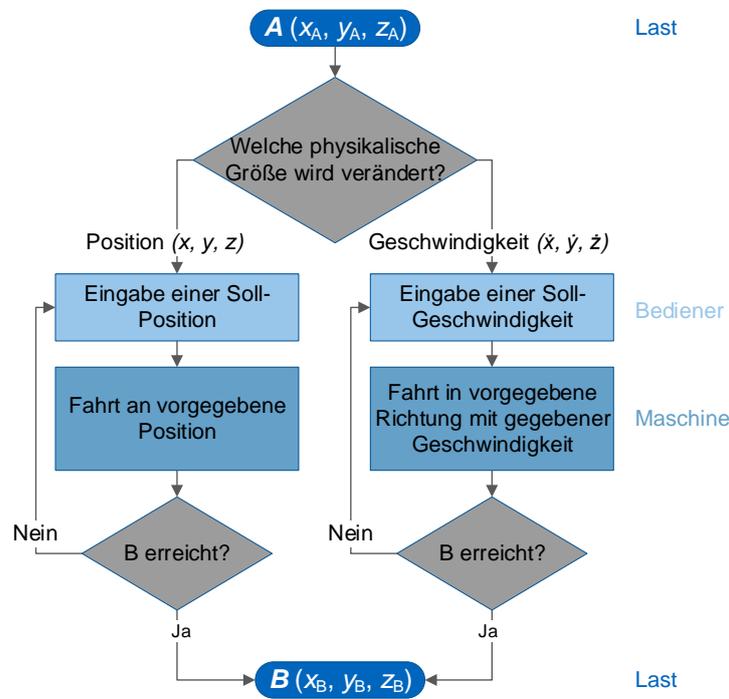


Abbildung 5-2: Abstrahierter Steuerungsablauf für eine lastorientierte Steuerung

Im Rahmen dieser Arbeit werden folglich zwei Varianten für die lastorientierte Bewegungsvorgabe untersucht: die zielorientierte Laststeuerung (Vorgabe der gewünschten Lastposition: $h(x, y, z)$) und die richtungsorientierte Laststeuerung (Vorgabe der gewünschten Lastgeschwindigkeit: $\dot{h}(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$). In beiden Fällen kommt eine Auslegerspitzensteuerung mit inverser Kinematik zum Einsatz, um aus der gewünschten Lastbewegung die notwendigen Freiheitsgrad-Bewegungen zu berechnen. Die technische Realisierung der Auslegerspitzensteuerung im Kontext dieser Arbeit ist Gegenstand von Abschnitt 7.3.

Kompatible Gestaltung der Bedieneringabe

Zur Aufnahme des Bedienerwunschs können beliebige Interaktionselemente (vgl. Abschnitt 3.3) zum Einsatz kommen. Entscheidend ist, dass die gewählten Interaktionselemente dazu beitragen, die Bildung von kompatiblen Task-Action-Mappings beim Bediener zu unterstützen. Dies wird realisiert durch die Berücksichtigung der in der zweiten Gestaltungsrichtlinie genannten Kompatibilitätsprinzipien. Set-Level-Kompatibilität und Element-Level-Kompatibilität werden erreicht, wenn der Bewegungswunsch des Bedieners im Hinblick auf die Last und die hierfür notwendige Bewegung des Stellteils (bzw. allgemein die Eingabe

des Bedieners) – unabhängig von der Bedienerposition und -orientierung – in Dimension, Vorzeichen und Intensität miteinander korrespondieren. Dies lässt sich sicherstellen, indem die Position und Orientierung des Bedieners bzw. der Steuerung automatisch erfasst wird, um die Bedieneringabe, die im Koordinatensystem der Steuerung erfolgt, automatisch auf das Koordinatensystem des Krans (und damit das Koordinatensystem der Lastbewegung) umrechnen zu können. Wenn Set-Level-Kompatibilität und Element-Level-Kompatibilität auf diese Weise erfüllt sind, ist per Definition automatisch auch Stimulus-Response-Kompatibilität erfüllt. Entspricht die Ausgabe des Systems (d. h. der Effekt, der aus der Eingabe resultiert) zusätzlich noch der Eingabe am Stellteil in Dimension, Vorzeichen und Intensität, ist auch Response-Effect-Kompatibilität erfüllt. Letzteres lässt sich erreichen, wenn die motorische Handlung des Bedieners durch eine entsprechende Signalverarbeitung (Logik) korrekt interpretiert wird.

Visual-Field-Kompatibilität kann erreicht werden, indem die Steuerung so gestaltet wird, dass die Bewegung des Systems zu jedem Zeitpunkt parallel zur Eingabe in dem Bezugssystem ist, das durch das Blickfeld des Bedieners definiert ist. Die Steuerung zur Eingabe des Bedienerwunschs sollte daher so gestaltet sein, dass die Referenzachse der Steuerung immer mit der Referenzachse des Blickfelds zusammenfällt oder vom Bediener leicht zusammengeführt werden kann.

Integration von Assistenzfunktionen

Gemäß Gestaltungsrichtlinie 3 kann es sinnvoll sein, bestimmte Vorgänge der Informationsverarbeitung komplett einem Rechner zu überlassen. Im Fall des zielorientierten Steuerungskonzepts wäre das beispielsweise die Berechnung der Bewegungsvektoren zwischen Start- und Zielpunkt, die das Steuergerät des Krans braucht, um den gewünschten Zielpunkt anfahren zu können. Darauf aufbauend kann für das zielorientierte Steuerungskonzept auch die Ausführung der Bewegung durch eine Assistenzfunktion übernommen werden. Sowohl beim ziel- als auch beim richtungsorientierten Steuerungskonzept könnte es zudem sinnvoll sein, günstige Beschleunigungs- und Bremsrampen für die Kranbewegungen automatisch am Beginn bzw. Ende jeder Kranbewegung vorzusehen. Weitere Assistenzfunktionen könnten beispielsweise Sicherheitsaufgaben (Antikollision, Lastpendel-dämpfung) oder Komfortfunktionen übernehmen. Wird wie vorgeschlagen eine Ausleger-spitzensteuerung verwendet, ist die dafür benötigte inverse Kinematik auch als Assistenzfunktion zu klassifizieren.

5.4 Ausgestaltung der Interaktionsparadigmen

Berücksichtigt man die Gestaltungsrichtlinien sowie die drei genannten Umsetzungsschritte, lassen sich – basierend auf dem entwickelten Gestaltungsrahmen – zwei neuartige

Interaktionsvarianten ableiten, von denen erwartet wird, dass sie die Mensch-Maschine-Interaktion bei der Kransteuerung im Hinblick auf Intuitivität und Gebrauchstauglichkeit deutlich verbessern: die richtungsorientierte Laststeuerung und die zielorientierte Laststeuerung.

5.4.1 Richtungsorientiertes Steuerungskonzept

Funktionsprinzip

Beim richtungsorientierten Steuerungskonzept gibt der Bediener durch die Betätigung eines Bedienelements die gewünschte Bewegungsrichtung der Last aus seiner Perspektive (Geschwindigkeitsvektor) vor. Es erfolgt eine Bedieneringabe von der aktuellen Lastposition in Richtung der Zielposition (blauer Pfeil „Eingabe“ in Abbildung 5-3) durch ein Stellteil. Das System ermittelt durch integrierte Sensorik die Ausrichtung des Bedieners relativ zur Last (Winkel Δ_{Nutzer} und $\varphi_{Ausleger}$) sowie die aktuelle Stellung des Krans ($\varphi_{Ausleger}$, r_{Haken} , z_{Haken}) und steuert dessen Antriebe durch Verwendung einer inversen Kinematik so an, dass die Bewegungsrichtung der Last (blauer Pfeil „Ausgabe“) parallel zur tatsächlich vom Bediener vorgegebenen Richtung des Bedienelements erfolgt. Die Eingabe in Richtung der gewünschten Zielposition führt somit zu einer Lastbewegung in die vorgegebene Richtung bei gleichzeitiger Wirkung mehrerer Antriebe (graue Pfeile/Achsen: DOFs des Krans).

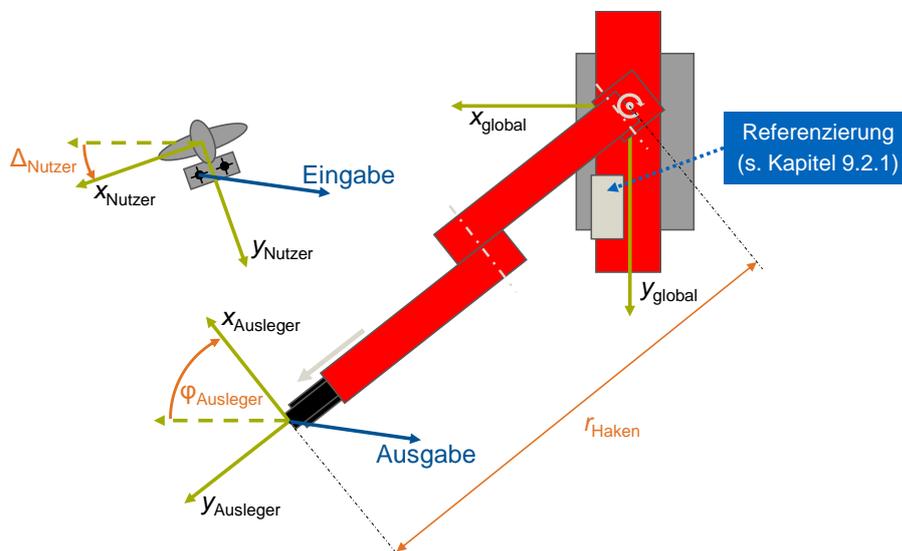


Abbildung 5-3: Richtungsorientiertes Steuerungskonzept (Draufsicht, schematisch)

Das richtungsorientierte Steuerungskonzept kombiniert eine Auslegerspitzensteuerung mit einer direkten Eingabe der gewünschten Lastgeschwindigkeit über Stellteile, die entweder an einem festen Fahrerplatz oder auch tragbar auf einer Funksteuerung platziert sind. Das ermöglicht es dem Bediener, die Bewegung der Last direkt aus seiner Perspektive zu steuern, ohne die DOFs des Krans zu berücksichtigen.

Die Orientierung des Bedieners (d. h. die relative Verdrehung zum Kran-Koordinatensystem) wird durch geeignete Sensorik erfasst. Hierfür kann beispielsweise Inertialsensorik mit mikro-elektromechanischen Systemen (MEMS) im Eingabegerät zum Einsatz kommen, die relativ zum Krankoordinatensystem referenziert wird. Dadurch ist die Steuerung des Krans in der Lage, die Lastbewegungen entsprechend der Orientierung des Bedieners anzupassen. Abbildung 5-4 zeigt das richtungsorientierte Konzept am Beispiel eines Ladekrans: Die Bewegung der Last (gestrichelte schwarze Linie am Haken) ist immer parallel zur Eingabe des Bedieners (gestrichelte schwarze Linie an der Position des Bedieners). Die Geschwindigkeit der Last entspricht der Eingabeintensität (z. B. Auslenkungswinkel eines Hebels).

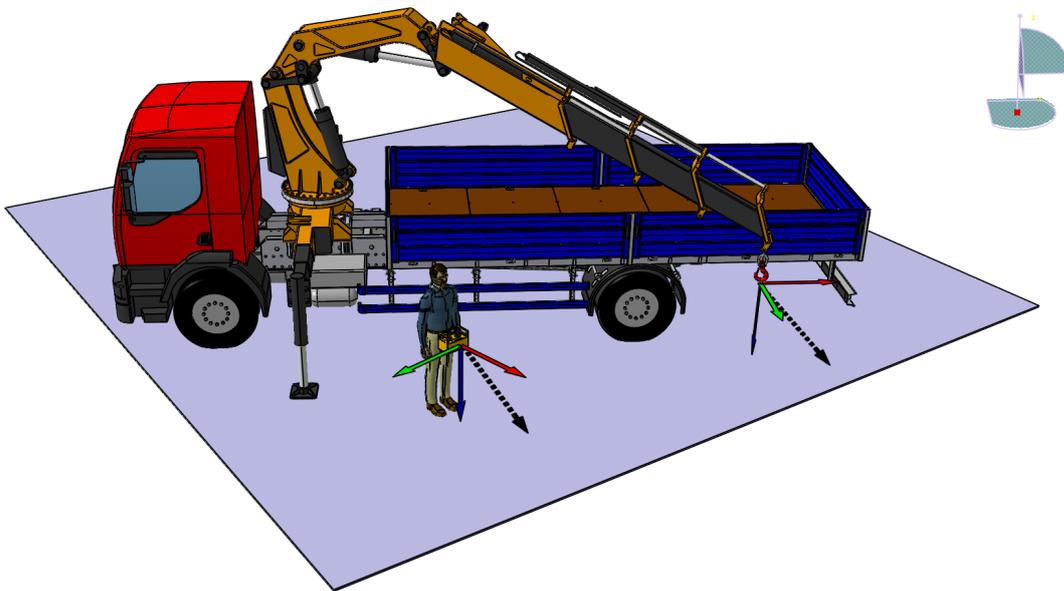


Abbildung 5-4: Konzept zur richtungsorientierten Laststeuerung, dargestellt am Beispiel eines Ladekrans

Folglich kann der Bediener die Last auf der Grundlage seines eigenen Bezugssystems steuern, ohne kranbezogene Faktoren zu berücksichtigen. Insbesondere in Situationen, wenn das Koordinatensystem des Bedieners und das Koordinatensystem des Krans aufgrund der Orientierung des Bedieners mit Funksteuerung nicht aufeinander abgestimmt sind, wie es in den Abbildungen 5-3 und 5-4 zu sehen ist, sind die Vorteile offensichtlich.

Abgleich mit den Gestaltungsrichtlinien

Angesichts der Tatsache, dass die Aufgabe bei der Kransteuerung darin besteht, die Last zu bewegen, korrespondiert das richtungsorientierte HMI direkt mit der Aufgabe des Bedieners: Der Bewegungswunsch steht in direkter Verbindung mit der auszuführenden Aktion. Es unterstützt somit die Bildung von Task-Action-Mappings, die auf kompatiblen Bedienereingaben und Systemausgaben basieren.

Da die Bedieneringabe die Bewegungsrichtung der Last direkt vorgibt, herrscht Set-Level-Kompatibilität der Eingaben mit der Lastbewegung (Dimensionsüberlappung). Element-Level-Kompatibilität für die vertikale Lastbewegung lässt sich leicht erreichen, indem das Anheben der Last gemäß etablierter bestehender Populationsstereotypen [Lov-1962] auf eine Eingabe vom Bediener weg und das Absenken der Last auf eine Eingabe zum Bediener hin abgebildet wird.

Zur Absicherung dieses Stereotyps wird eine Kurzstudie durchgeführt (N = 51 Probanden, davon 41 Männer und 10 Frauen). 11 Teilnehmer hatten viel Vorerfahrung mit Joystick-Steuerungen (unabhängig vom bedienten Gerätetyp), und je 20 wenig bzw. keine Vorerfahrung. Die Probanden sollten angeben, welche Joystick-Bewegungsrichtung sie für das Bewegen einer auf dem Boden stehenden Kiste nach oben auswählen würden. Im Gesamtbild entschieden sich 76,5% der Probanden für die Joystickbewegung vom Körper weg, was die gewählte Belegung rechtfertigt.

Element-Level-Kompatibilität für die horizontale Lastbewegung wird erreicht, indem die Verdrehung von Bedienerkoordinatensystem und Krankoordinatensystem automatisch messtechnisch erfasst wird, um sicherzustellen, dass die Eingaberichtung und die Hakenbewegung parallel sind. Element-Level-Kompatibilität ist sowohl im Hinblick auf Stimulus-Response als auch auf Response-Effect-Kompatibilität gegeben: Wenn sich die Zielposition als aufgabendefinierender Stimulus auf der linken Seite der Last befindet, muss der Bediener eine Eingabe nach links ausführen, wodurch die Schnittstelle SR-kompatibel wird. In ähnlicher Weise führt die Eingabe nach links dazu, dass sich im Effekt die Last nach links bewegt, wodurch die Schnittstelle RE-kompatibel wird.

Hinsichtlich der Visual-Field-Kompatibilität können sich Einschränkungen ergeben, da die Lastbewegung auf der Grundlage der Ausrichtung des Eingabegeräts und nicht des Blickfelds (und damit der Kopforientierung) des Bedieners eingestellt wird. Da der Bediener jedoch in den meisten Fällen in der Lage ist, sich selbst und die Steuerung in Richtung der Last zu drehen und sein Gesichtsfeld auf das Referenzsystem des Eingabegeräts auszurichten, sollte Visual-Field-Kompatibilität grundsätzlich gegeben sein.

Als Assistenzsysteme kommen einerseits eine automatische Umrechnung der Bedieneringabe (im Koordinatensystem des Bedieners) auf das Koordinatensystem des Krans und damit die gewünschte Bewegungsrichtung des Hakens und andererseits eine Auslegerspitzensteuerung zum Einsatz.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das richtungsorientierte HMI im Einklang mit den ausgearbeiteten Gestaltungsrichtlinien steht. Daher wird erwartet, dass es zu einer verringerten mentalen Beanspruchung und einer erhöhten Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zum traditionellen maschinenzentrierten HMI kommt. Dies sind beides Sekundäreffekte einer erhöhten Intuitivität.

5.4.2 Zielorientiertes Steuerungskonzept

Funktionsprinzip

Als zweites Interaktionskonzept resultiert das zielorientierte Steuerungskonzept. Es erlaubt dem Bediener, direkt die gewünschte Zielposition (und/oder beliebig viele Zwischenpositionen) der Last mit einem Zeigegerät anzugeben. Der Haken bewegt sich dann automatisch zum vorgegebenen Zielpunkt oder entlang der eingegebenen Zwischenpunkte (Trajektorie). Abbildung 5-5 zeigt das zielorientierte Steuerungskonzept am Beispiel eines Ladekrans.

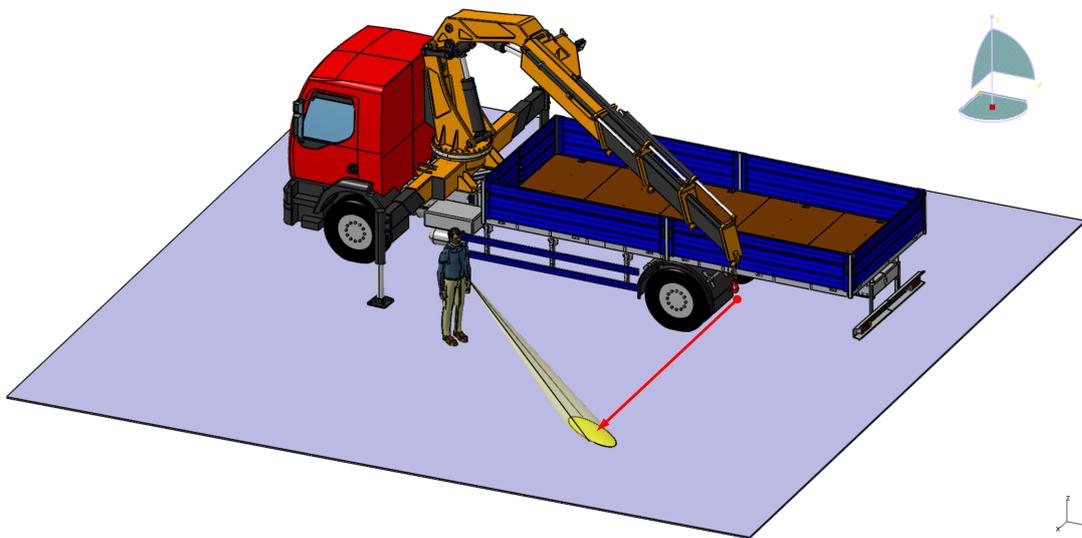


Abbildung 5-5: Konzept zur zielorientierten Laststeuerung, dargestellt am Beispiel eines Ladekrans

Wie das richtungsorientierte HMI ermöglicht das zielorientierte HMI dem Bediener, die Last direkt zu steuern, ohne die Bewegung der einzelnen Kransegmente zu berücksichtigen. Die Umsetzung der vertikalen Steuerung entspricht aus Sicherheitsgründen dem richtungsorientierten HMI mit einem Stellteil, so dass dessen Eingangsachse das Heben und Senken der Last steuert. Der Unterschied zwischen den beiden Konzepten liegt in der Lastbewegung in der horizontalen Ebene. Beim zielorientierten HMI gibt der Bediener die gewünschte Zielposition der Last vor, indem er mit Zeigegerät (siehe Abbildung 5-5) auf die entsprechende Stelle am Boden zeigt und die Eingabe bestätigt. Durch Betätigung eines Vorschubstellteils bewegt der Kran die Last automatisch horizontal in Richtung des vorgegebenen Ziels, bis die Last genau darüber positioniert ist. Dort kann er die Last punktgenau absenken. Der Bediener muss also nicht ständig die Bewegungsrichtung der Last vorgeben, sondern kann sich darauf verlassen, dass das Kransystem die Last direkt zum Zielort bewegt. Dabei muss er die horizontale Lastbewegung überwachen und die vertikale Position der Last steuern.

Abgleich mit den Gestaltungsrichtlinien

Das zielorientierte HMI spiegelt das richtungsorientierte HMI insofern wider, dass das Kernprinzip die Steuerung der Last und nicht die Steuerung des Krans ist. Es hat also das gleiche aufgabenzentrierte und damit nutzerzentrierte Systembild. Darüber hinaus sind die Task-Action-Mappings für die vertikale Steuerung äquivalent und basieren auf einer kompatiblen Abbildung zwischen Bedienereingabe und Lastbewegung. Folglich sind Set-Level- und Element-Level-Kompatibilität für die vertikale Bewegung der Last erfüllt.

Im Gegensatz dazu basiert die horizontale Steuerung nicht auf einem streng kompatiblen Mapping zwischen Bedienereingabe und Last. Zunächst gliedert sie sich in die beiden Phasen der Zielvorgabe (ZV-Phase) und der eigentlichen Lastbewegung (LB-Phase). Die Schnittstelle in Form eines körpergeführten Zeigergeräts in der ZV-Phase ist inhärent kompatibel, da der angepeilte Zielpunkt direkt den Bewegungen des Zeigergeräts folgt. Die Verwendung eines Zeigergeräts (wie z. B. eines Laserpointers) kann daher als sensomotorisches Wissen im Kontinuum des Wissens eingestuft werden. In den meisten Fällen macht die LB-Phase den größten Teil der für eine Aufgabe aufgewendeten Zeit aus. Da der Bediener in dieser Phase die horizontale Lastbewegung nicht explizit vorgibt, herrscht auch keine Kompatibilität zwischen Bedienereingabe und Systemausgabe vor. Zu beachten ist jedoch, dass die Mensch-Maschine-Interaktion in dieser Phase hauptsächlich durch den Grad der Systemautomatisierung und nicht durch die Schnittstellenkompatibilität bestimmt wird. Wendet man die Terminologie der Automatisierungsgrade für Echtzeit-Steuerungssysteme von Endsley und Kaber [End-1999] an, so ist das maschinenzentrierte HMI ein Standardbeispiel für eine manuelle Steuerung. Das richtungsorientierte HMI kann als Action Support eingestuft werden, da das Kransystem dem Bediener hilft, die Lastbewegungen durch die Steuerung der einzelnen Kransegmente umzusetzen. Folglich ist auch die vertikale Steuerung des zielorientierten HMI auf der Ebene des Action Support angesiedelt. Im Gegensatz dazu ist die horizontale Steuerung des zielorientierten HMI eine Automatisierung der Stufe Batch Processing. Die Aufgabe des Bedieners ist es, den gewünschten Ort zu generieren und auszuwählen, aber die Maschine ist allein für die Durchführung der Bewegung zu diesem Ort verantwortlich. Somit hat das zielorientierte HMI einen höheren Automatisierungsgrad als das richtungsorientierte HMI. Dies verdeutlicht, dass die horizontale Steuerung des zielorientierten HMI die Mensch-Maschine-Interaktion nicht in erster Linie durch die Anpassung der Interaktionen verändert, sondern durch die Verlagerung zusätzlicher Verarbeitungsanforderungen vom Bediener auf das Kransystem.

Wie in Abschnitt 2.2 ausgeführt, ist eines der Hauptziele der zunehmenden Systemautomatisierung die Verringerung der mentalen Beanspruchung des Bedieners. Folgt man dieser Argumentation, könnte man erwarten, dass das zielorientierte HMI eine zusätzliche Reduzierung der mentalen Beanspruchung des Bedieners im Vergleich zum richtungsorientierten HMI ermöglicht. Wenn jedoch die Automatisierung die Verantwortlichkeiten des Bedieners von der aktiven Steuerung auf die passive Überwachung und Fehlererkennung

verlagert, sind weitere Faktoren zu berücksichtigen um zu vermeiden, dass sich durch mentale Unterforderung im Normalbetrieb oder durch mentale Überforderung bei unerwartetem Systemverhalten die Systemleistung trotzdem verschlechtert. Überträgt man diese Erkenntnisse auf die Anwendung des zielorientierten HMI, so ist es schwierig zu antizipieren, ob die Bediener aufgrund der zusätzlichen Automatisierung und der reduzierten Verarbeitungsanforderungen entlastet werden oder ob sie sich damit unwohl fühlen, weil sie in diesen Phasen nicht mehr Teil des Regelkreises der Maschinenbedienung sind.

Aufgrund seines nutzerzentrierten Systembilds (Laststeuerung) sowie der kompatiblen vertikalen Steuerung und der Erhöhung der Systemautomatisierung für die horizontale Steuerung ist gemäß der entwickelten Gestaltungsrichtlinien zu erwarten, dass das zielorientierte HMI eine Reduzierung der mentalen Beanspruchung des Bedieners sowie eine erhöhte Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI bewirkt. Dies sind beides Sekundäreffekte einer erhöhten Intuitivität.

5.5 Vergleich der Interaktionsparadigmen mit dem Gestaltungsrahmen

Bei einem Vergleich des maschinenzentrierten HMI mit den beiden neuen Interaktionskonzepten im Hinblick auf die Gestaltungsrichtlinien ergeben sich die in Tabelle 5-1 dargestellten Zusammenhänge. Dies verdeutlicht die Überlegenheit der nutzerzentrierten HMIs gegenüber dem traditionellen HMI in allen Gestaltungsbereichen.

Tabelle 5-1: Vergleich des richtungs- und zielorientierten HMI mit dem maschinenzentrierten HMI

HMI	Mentales Modell	Kompatibilitätsprinzipien (SR & RE)			Automatisierung	erwartete Veränderung	
	Task-Action-Mappings	Set-Level	Element-Level	Visual-Field	Autom.-Grad	Mentale Beanspr.	Gebrauchstaugl.
richtungsorientiert	✓	✓	✓	✓	↑ (s. ¹)	↓	↑
zielorientiert*	✓	✓ (ZV, z)	✓ (ZV, z)	✓ (ZV, z)	↑ ↑ (s. ²)	↓	↑
maschinenzentriert	×	×	×	×	× (Referenz ³)	Referenz	Referenz

* ZV: Phase der Zielvorgabe; LB: Phase der Lastbewegung; x/y/z: Bewegung in entsprechende Raumrichtung während LB
¹ Action Support ² Batch Processing (x, y) & Action Support (z) ³ Manual Control

Der erwartete kausale Zusammenhang zwischen den entwickelten Gestaltungsrichtlinien und der mentalen Beanspruchung bzw. der Gebrauchstauglichkeit lässt erwarten, dass beide nutzerzentrierten HMIs zu einer erheblichen Reduzierung der mentalen Beanspruchung des Bedieners führen und die Gebrauchstauglichkeit gleichzeitig steigt. Da das richtungsorientierte und das zielorientierte HMI insbesondere die mentale Beanspruchung des Bedieners auf unterschiedliche Weise beeinflussen, sind weitere Erkenntnisse erforderlich, um die Frage zuverlässig zu beantworten, welches der beiden eine größere Reduzierung

der mentalen Beanspruchung des Bedieners bewirkt und wie sich das auf die Gebrauchstauglichkeit auswirkt. Hierzu wird im nächsten Kapitel eine empirische Laborstudie durchgeführt.

5.6 Beantwortung der Forschungsfrage 1

Die in diesem Kapitel entwickelten Werkzeuge, Gestaltungsrichtlinien sowie die weiterführende Ableitung der Steuerungskonzepte mit Hilfe konkreter Umsetzungshinweise können als systematischer Gestaltungsrahmen zur Entwicklung von nutzerzentrierten HMIs zur Laststeuerung an Kranen betrachtet werden. Beide vorgestellten Steuerungskonzepte erfüllen die Gestaltungsrichtlinien. Zudem sind alle Schritte der Mensch-Maschine-Interaktion (vgl. Abbildung 3-1) in beiden Interaktionsparadigmen berücksichtigt. Die beiden Interaktionsparadigmen sind damit vollständig beschrieben. Mit dem Abschluss dieses Kapitels gilt Forschungsfrage 1 als beantwortet. Die technische Umsetzung der Konzepte (u. a. Auswahl geeigneter Eingabegeräte, Implementierung der Verarbeitungslogik und Sensorik) ist Gegenstand späterer Kapitel dieser Arbeit.

6 Potenziale nutzerzentrierter Interaktionskonzepte (Studie 1)

Dieses Kapitel dient der Evaluierung der beiden Steuerungskonzepte im Laborumfeld gegenüber dem maschinenzentrierten HMI sowie dem Vergleich miteinander. Im iterativen Prozess nutzerzentrierter Gestaltung [DIN-9241-210] entspricht dies dem Schritt „Evaluierung von Gestaltungslösungen anhand der Anforderungen“. Die Untersuchung erfolgt durch eine empirische Laborstudie, in deren Rahmen die drei HMIs miteinander anhand unabhängiger Hypothesen verglichen werden. Der Hauptgrund, warum zunächst eine Laborstudie durchgeführt wird, liegt in der Messung der mentalen Beanspruchung, die nicht nur durch subjektive, sondern auch durch objektive (z. B. psychophysiologische) Messgrößen erfasst werden soll. Dabei setzen die gängigen psychophysiologischen Maße mentaler Beanspruchung eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Umgebungseinflüsse voraus, die im Umfeld eines realen Krans nicht gewährleistet werden kann. Um diesem Umstand zu begegnen, wird zunächst eine Laborstudie vorgezogen.

Der Argumentation aus dem vorhergehenden Kapitel folgend ist zu erwarten, dass die nutzerzentrierten HMIs dem bestehenden maschinenzentrierten HMI überlegen sind, insbesondere im Hinblick auf die mentale Beanspruchung des Bedieners und die Gebrauchstauglichkeit. Dies wäre ein starkes Indiz für eine intuitivere Interaktion des Bedieners mit dem Kran. Ziel dieses Kapitels ist die Beantwortung von Forschungsfrage 2: Welche Auswirkungen haben nutzerzentrierte Mensch-Maschine-Schnittstellen? Wie verändert sich die Mensch-Maschine-Interaktion (insb. mentale Beanspruchung und Gebrauchstauglichkeit) von Kranen, wenn statt der herkömmlichen maschinenzentrierten Steuerung verschiedene nutzerzentrierte Mensch-Maschine-Schnittstellen eingesetzt werden?

Versuchsaufbau und -durchführung erfolgten im Rahmen von [Püt-2020]. Inhalte dieses Kapitels wurden vom Autor bereits in [Top-2021a] veröffentlicht.

6.1 Methoden

6.1.1 Messung von mentaler Beanspruchung und Gebrauchstauglichkeit

Die erwartete Verringerung der mentalen Beanspruchung des Bedieners kann so verstanden werden, dass die Mensch-Maschine-Interaktion kognitiv effizienter wird. Nachdem Effizienz eines der drei Kernkriterien der Gebrauchstauglichkeit ist, kann davon ausgegangen werden, dass eine Erhöhung der mentalen Effizienz beim Bediener wiederum zu einer

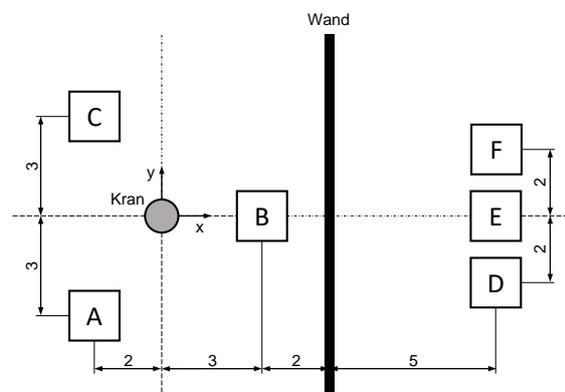
Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit des Systems führt. Als Leistungsmaße für die Gebrauchstauglichkeit kommen verschiedene Kriterien für die Bewertung der primären Aufgabenleistung auf der Verhaltensebene zum Einsatz, wie z. B. die investierte Zeit (Effizienz) und die auftretenden Fehler (Effektivität). Zusätzlich werden die Probanden gebeten, jedes HMI anhand des SUS zu bewerten. Der SUS von Brooke [Bro-1996] wird als subjektives Maß der Zufriedenstellung gewählt, da er breit angewendet wird und als validierte Methode gilt. Als psychophysisches Maß der mentalen Beanspruchung kommt die Messung des Pupillendurchmessers zum Einsatz. Zur subjektiven Messung wird der Raw Task Load Index (RTLX) verwendet. Bezüglich der Gründe für die getroffene Auswahl wird auf Abschnitt 2.1 verwiesen.

6.1.2 Simulationsumgebung

Um die drei HMI-Konzepte (maschinenzentriert, richtungsorientiert, zielorientiert) zu untersuchen, wird eine 3D-Simulation in Unity verwendet (s. Abbildung 6-1a). Die Verwendung einer Simulation ermöglicht, alle Experimente in einer Laborumgebung unter gut reproduzierbaren äußeren Bedingungen durchzuführen, was insbesondere für die zuverlässige Messung der Pupillenerweiterung notwendig ist.



(a) 3D-Simulation mit Ladekran in Unity und Versuchsaufbau, aufgenommen von [Püt-2020]. Beschriftungen ergänzt durch den Autor



(b) Mögliche Standorte für den Start und die Zielplattform mit der Position des Krans und der Wand, Abstände in m (Draufsicht, nicht maßstäblich)

Abbildung 6-1: Versuchsaufbau für die Laborstudie

Es wird ein Kranmodell verwendet, das auf den Abmessungen des Ladekrans basiert, der später auch für die Realstudien zum Einsatz kommt. Der Kran steht auf einer stationären Basis mit einer Höhe von 0,1 m. Die Kransäule (1) und der Hubarm (2) haben jeweils eine Länge von 2,5 m, der Knickarm (3) eine Länge von 2 m. Die Länge des Teleskopauslegers (4) kann zwischen 0,3 m und 6,6 m variiert werden. Das Kranmodell erhält für das maschinenzentrierte HMI realitätsnahe Winkelschränkungen, um eine realistische Nachbildung des Bewegungsraums eines realen Krans zu ermöglichen: Die Kransäule (1) kann um volle 360° gedreht werden, während sowohl der Hubarm (2) als auch der Knickarm

(3) in ihrem Drehwinkel zwischen $0,1^\circ$ und 160° (relativ zum vorhergehenden Auslegerstück) beschränkt sind. Dies entspricht den Gelenkbegrenzungen des realen Ladekrans im Arbeitsmodus. Ebenso werden Gelenkgeschwindigkeiten ähnlich wie bei realen Kran Gelenken eingestellt: Die maximale Winkelgeschwindigkeit⁹ für die drei Drehgelenke wird auf $10\text{ }^\circ/\text{s}$ und die maximale Aus- und Einfahrgeschwindigkeit des Teleskopauslegers auf $0,75\text{ m/s}$ gesetzt.

Die Bewegung des Kranmodells während der Verwendung der beiden nutzerzentrierten HMIs wird durch die Zielposition für die Auslegerspitze des Krans (Tool Center Point (TCP)) gesteuert. Die Segmentbewegungen werden durch eine inverse Kinematik auf Basis der Zielposition des TCP errechnet. Die Kransäule wird immer in Richtung der Zielposition geschwenkt. Die entsprechenden Winkel für das Hub- und das Knickgelenk werden mit einem Skript aus dem Fast-IK-Paket aus dem Unity Asset Store berechnet. Durch diese Vorgehensweise kann das Kranmodell jede gültige Position des TCP erreichen. Um Kollisionen der schwingenden Last mit der Kransäule zu vermeiden, kann der TCP dabei nicht näher als 1 m an die Kransäule bewegt werden. Außerdem ist es nicht möglich, den TCP über die maximale Reichweite des Kranmodells hinaus zu bewegen, da andernfalls unzulässige Gelenkpositionen, d. h. Positionen außerhalb der Gelenkbegrenzungen, angefahren werden müssten. Die maximale Geschwindigkeit des TCP wird für alle drei Raumachsen jeweils auf $0,5\text{ m/s}$ festgelegt. Dadurch liegt die resultierende TCP-Geschwindigkeit des Kranmodells mit nutzerzentrierten HMIs im gleichen Bereich wie die Hakengeschwindigkeit des Krans mit maschinenzentriertem HMI. Die Last wird als Würfel mit einer Kantenlänge von etwa $0,7\text{ m}$ und einer Halterung an der Oberseite als Lastaufnahmemittel modelliert. Das Lastaufnahmemittel ist über Scharniergelenke am Kran fixiert. Alle angegebenen Einstellungen sind so gewählt, dass sie das Verhalten des Krans in der realen Welt so gut wie möglich nachahmen.

Weitere erstellte Objekte sind eine Start- und eine Zielplattform für die Last, eine Barriere in Form einer Wand, ein Begrenzungsrahmen und ein Lichtpunkt für das zielorientierte HMI. Die Abmaße der Objekte werden so gewählt, dass sie einem realitätsnahen Szenario entsprechen. Beide Plattformen haben eine quadratische Form mit einer Kantenlänge von $1,5\text{ m}$. Die Startplattform hat eine Höhe von $0,2\text{ m}$ und die Zielplattform von $0,1\text{ m}$. Die Zielplattform wird mit einem Zielkreis auf ihrer Oberfläche markiert. Die Wand hat eine Länge von 11 m , eine Höhe von $2,5\text{ m}$ und eine Tiefe von $0,25\text{ m}$. Der Begrenzungsrahmen markiert einen Bereich von $26\text{ m} \times 26\text{ m}$ und stellt eine visuelle Referenz für die Teilnehmer dar. Der Lichtpunkt wird als roter Kreis mit einem Durchmesser von $1,5\text{ cm}$ erzeugt. Für die Visualisierung des Hintergrunds wird Material aus dem Wispy-Skybox-Paket aus dem Unity Asset Store verwendet.

⁹ Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt definiert das Gradzeichen und abgeleitete Einheiten, z.B. $^\circ/\text{s}$, als gesetzlich zulässige Einheiten, auch wenn es sich dabei streng genommen nicht um SI-Einheiten handelt. Sie sind explizit zum Gebrauch mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) zugelassen (vgl. [PTB-2020, S. 20]).

Abbildung 6-1b zeigt die Platzierung der Barriere sowie die möglichen Standorte für die Start- und die Zielplattform. Insgesamt werden während des Experiments fünf verschiedene Start-Ziel-Positions-Paarungen verwendet (AF, FA, CD, DC, BE). Zusätzlich werden zwei mögliche Bedienerpositionen durch Umschalten der Kameraposition definiert, wodurch sich zehn verschiedene Versuchskonfigurationen ergeben. Die Bedienerpositionen sind 4 m in x-Richtung und ± 11 m in y-Richtung vom Kran entfernt. Für beide Positionen wird die Kamera 1,63 m über dem Boden platziert, was dem 50 %-Perzentil der männlichen Augenhöhe entspricht [Sei-2009]. Die Ausrichtung der Kamera ist sowohl zum Boden als auch zur x-Achse parallel, um einen ausreichenden Überblick über die Aufgabenumgebung zu erhalten. Zusammen mit der Kameraposition und -ausrichtung wird auch die Ausrichtung des gerichteten Lichts, das die Szene beleuchtet, verändert, so dass das Licht immer im gleichen Winkel von hinten kommt. Dadurch sind die Lichtverhältnisse für die beiden möglichen Kamerapositionen gleichwertig.

Zu Beginn jedes Versuchs wird die Last auf die jeweilige Startplattform gestellt. Die Aufgabe des Teilnehmers ist es, den Kran zu steuern, um die Last auf der Zielplattform zu positionieren. Die Last wird dort erkannt, wenn ihre Unterseite die Zielplattform berührt. Jede Kollision zwischen Last, Kran, Boden und Barriere verursacht ein Kollisionsgeräusch.

6.1.3 Versuchsaufbau

Das Experiment wird mit einem hochauflösenden Fernseher (55 Zoll) durchgeführt (vgl. Abbildung 6-1a). Zur Messung der Pupillendurchmesser der Teilnehmer wird das System faceLab 5 von Seeing Machines mit einer Abtastrate von 60 Hz eingesetzt (Abbildung 6-1a, direkt unter dem Bildschirm). Die Bediensoftware berücksichtigt bei der Messung der Pupillengröße die Kopfbewegungen. Der Proband sitzt so, dass der Abstand zwischen den Augen des Teilnehmers und dem Fernseher etwa 1,05 m beträgt. Dabei nimmt der Bildschirm 60° des horizontalen Sichtfeldes des Teilnehmers ein, was als Kompromiss zwischen der Erhöhung der Immersion des Teilnehmers und dem maximalen Messwinkel des faceLab 5-Systems gewählt wird.

Als Eingabegeräte für den Probanden werden zwei Oculus-Controller verwendet, die durch eine Halterung zusammengehalten werden. Somit ergibt sich ein einziges Bedienpult, auf dessen Oberseite sich zwei Joysticks und mehrere Knöpfe befinden. Für das maschinenzentrierte HMI wird das Mapping der Joysticks mit den DOFs des Krans auf Basis einer konventionellen, achsbasierten Ladekransteuerung mit zwei Joysticks realisiert (Abbildung 6-2a): Die Links-Rechts-Achsen des linken Joysticks schwenken die Kransäule, während die Vorwärts-Rückwärts-Achse den Knickarm steuert. Die Links-Rechts-Achse des rechten Joysticks steuert das Ausfahren des Teleskopauslegers und die Vorwärts-Rückwärts-Achse den Hubarm.

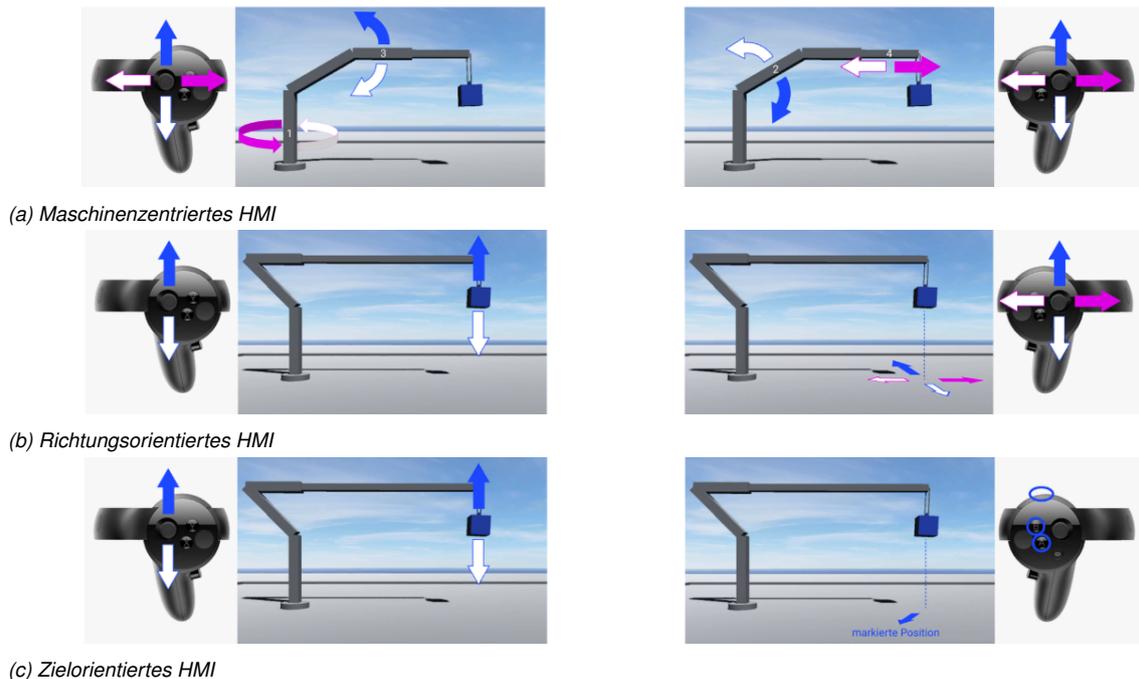


Abbildung 6-2: Zuordnung der Eingabeelemente an den Oculus-Controllern zu den Bewegungen des Krans in der VR-Simulation für die drei untersuchten HMIs. Grafiken übernommen aus [Püt-2020]

Sowohl beim richtungsorientierten als auch beim zielorientierten HMI wird die vertikale Laststeuerung auf die Vorwärts-Rückwärts-Achse des linken Joysticks abgebildet (Abbildungen 6-2b und 6-2c). Der rechte Joystick wird für die horizontale Laststeuerung verwendet, wenn das richtungsorientierte HMI zum Einsatz kommt: die horizontale Bewegungsrichtung des TCP ist immer parallel zur Auslenkungsrichtung des rechten Joysticks (Abbildung 6-2b). Bei Verwendung des zielorientierten HMI verfolgten die seitlich am TV-Bildschirm positionierten Oculus-Sensoren die räumliche Ausrichtung der Controller. Durch Drücken des rechten Auslösers (oberster Knopf am rechten Oculus-Controller, s. Abbildung 6-2c) wird der Lichtpunkt aktiviert, der durch Bewegen und Drehen der Controller in der simulierten Szene bewegt werden kann, ähnlich einem Laserpointer. Durch Drücken der Taste *A* fixieren die Teilnehmer die aktuelle Position des Lichtpunktes als Zielort. Anschließend wird die Last durch Halten der Taste *B* horizontal in Richtung des Zielorts bewegt (Vorschub).

Während des Experiments sind die Rolläden des Labors geschlossen und die Raumbeleuchtung ist eingeschaltet, um gleiche Lichtverhältnisse bei allen Teilnehmern zu gewährleisten.

6.1.4 Versuchsablauf

Die Teilnehmer werden angewiesen, vier Stunden vor dem Experiment keine koffeinhaltigen Nahrungsmittel oder Getränke zu konsumieren, um eine Beeinflussung der Pupillenerweiterung durch Koffein zu vermeiden. Nach einer Einführung haben die Teilnehmer die Möglichkeit, sich mit dem simulierten Lichtpunkt vertraut zu machen. Danach wird der Eye Tracker kalibriert und eine Testmessung (30 s) durchgeführt. Im Anschluss daran lesen die Teilnehmer die allgemeinen Anweisungen für das Experiment. Danach folgen drei Versuchsblöcke für die verschiedenen Steuerungskonzepte. Jeder Block beginnt mit einem Instruktionsschirm, der den Teilnehmern das HMI und die jeweilige Stellteil-Zuordnung erklärt. Dann werden die zehn Versuche, die sich aus den fünf Start-Zielort-Paarungen und den zwei möglichen Bedienerpositionen ergeben, von den Teilnehmern ausgeführt.

Die Reihenfolge der drei HMIs wird permutiert und jede der sechs möglichen Block-Permutationen wird acht Teilnehmern zugewiesen. Um Sequenzeffekte der Start-Zielort-Paarungen zu verhindern, werden acht Permutationen zufällig ausgewählt. Diese sind für alle drei Blöcke gleich, um die Vergleichbarkeit zwischen den Blöcken zu gewährleisten. Jeder der acht Teilnehmer, der die gleiche Block-Permutation erhält, absolviert eine andere der acht Permutationen der Start-Zielort-Paarungen. Um einen Einblick in die Konsistenz der im Bediener entstehenden Task-Action-Mappings zu ermöglichen, existieren zwei verschiedene Bedingungen zwischen den Probanden für die Reihenfolge der Bedienerpositionen innerhalb der zehn Versuche je HMI. In der alternierenden Gruppe wechselt die Bedienerposition nach jedem Versuch, während in der konstanten Gruppe die Bedienerposition für die ersten fünf Versuche des Blocks gleich ist und danach wechselt (vgl. Hypothese H₅ im nächsten Abschnitt).

Nachdem die Teilnehmer die zehn Versuche in einem Block absolviert haben, beantworten sie die Fragebögen zum RTLX und zum SUS. Nach dem Abschluss aller drei Blöcke füllen sie den abschließenden demographischen Fragebogen aus. Die Gesamtdauer des Experiments variiert zwischen 45 und 60 Minuten je Proband.

6.2 Hypothesen

Es soll untersucht werden, ob die beiden nutzerzentrierten HMIs eine Reduzierung der mentalen Beanspruchung des Bedieners sowie eine erhöhte Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI bewirken. Hierfür werden die drei HMIs anhand unabhängiger Hypothesen miteinander verglichen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und zum besseren Verständnis der untersuchten Kontraste werden die Alternativhypothesen angegeben. Die korrespondierenden Nullhypothesen lassen sich trivial aus den Alternativhypothesen ableiten.

Zunächst wird die mentale Beanspruchung der Probanden anhand ihrer primären Aufgabenleistung untersucht. Da diese nicht durch eine einzige Messgröße quantifiziert werden kann, kommen Operationalisierungen zur Leistungsmessung zum Einsatz: Gesamtzeit für die Aufgabe, Gesamtstrecke der Bewegung der Kranspitze (TCP), Gesamtbewegungszeit in falscher Richtung (d. h. in einer Richtung, welche die Entfernung des TCP zum Ziel erhöht) und die Anzahl der verursachten Kollisionen. Hieraus ergeben sich folgende Alternativhypothesen:

- H_{1-1a}: Die nutzerzentrierten HMIs reduzieren die Zeit zur Aufgabenerfüllung im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI.
- H_{1-1b}: Das richtungsorientierte und das zielorientierte HMI unterscheiden sich in der Zeit zur Aufgabenerfüllung.
- H_{1-2a}: Die nutzerzentrierten HMIs reduzieren die Gesamtstrecke der Bewegung des TCP im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI.
- H_{1-2b}: Das richtungsorientierte und das zielorientierte HMI unterscheiden sich in der Gesamtstrecke der Bewegung des TCP.
- H_{1-3a}: Die nutzerzentrierten HMIs reduzieren die Zeit, in der der TCP in die falsche Richtung bewegt wird im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI.
- H_{1-3b}: Das richtungsorientierte und das zielorientierte HMI unterscheiden sich in der Zeit, in der der TCP in die falsche Richtung bewegt wird.
- H_{1-4a}: Die nutzerzentrierten HMIs reduzieren die Anzahl der verursachten Kollisionen im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI.
- H_{1-4b}: Das richtungsorientierte und das zielorientierte HMI unterscheiden sich in der Anzahl der verursachten Kollisionen.

Die ersten drei Metriken quantifizieren die Effizienz der Aufgabenerfüllung, da sie die Investition von Zeit und Energie durch den Bediener bewerten. Die vierte Metrik, die Anzahl der Kollisionen, bezieht sich auf die Effektivität des Vorgangs, da eine Beschädigung der Last das Aufgabenziel verletzt.

Über die Messung der primären Aufgabenleistung hinaus wird die mentale Beanspruchung durch eine objektive Methode erfasst. Hieraus ergeben sich die folgenden Alternativhypothesen:

- H_{2a}: Die nutzerzentrierten HMIs reduzieren den durchschnittlichen Pupillendurchmesser des Bedieners im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI.
- H_{2b}: Das richtungsorientierte und das zielorientierte HMI unterscheiden sich im durchschnittlichen Pupillendurchmesser des Bedieners.

Zusätzlich zur psychophysiologischen Messung der Beanspruchung wird die mentale Beanspruchung subjektiv erfasst. Es ergeben sich die folgenden Alternativhypothesen:

H_{3a}: Die nutzerzentrierten HMIs reduzieren den durchschnittlichen RTLX-Wert im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI.

H_{3b}: Das richtungsorientierte und das zielorientierte HMI unterscheiden sich in der durchschnittlichen RTLX-Punktzahl.

Da die Bedienerleistungsmaße für die mentale Beanspruchung und die Gebrauchstauglichkeit ähnlich sind, wird die Gebrauchstauglichkeit bereits auf der Verhaltensebene durch die Bewertung der primären Aufgabenleistung im Hinblick auf Effizienz und Effektivität beurteilt. Um zusätzliche Erkenntnisse zur Zufriedenstellung zu gewinnen, wird die Bedienbarkeit der HMIs mit Hilfe des SUS als zusätzlichem Maß bewertet.

H_{4a}: Die nutzerzentrierten HMIs erhöhen den durchschnittlichen SUS-Wert im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI.

H_{4b}: Das richtungsorientierte und das zielorientierte HMI unterscheiden sich im durchschnittlichen SUS-Score.

Die Fragebögen zur Ermittlung des RTLX und des SUS werden schriftlich und in deutscher Sprache durchgeführt.

Die letzte Hypothese basiert auf einem detaillierteren Vergleich der drei HMIs. Da der Kran bei den beiden nutzerzentrierten HMIs die Lastbewegungen an die Position des Bedieners anpasst, sind die Task-Action-Mappings für jede Bedienerposition konsistent. Dies ist beim maschinenzentrierten HMI anders: Bei diesem Konzept ändert sich die Beziehung zwischen Bedienereingabe und wahrgenommener Lastbewegung, wenn der Bediener die Position wechselt. Es wird erwartet, dass diese Inkonsistenz in der Eingabe-Ausgabe-Beziehung die Fähigkeit des Bedieners diese Beziehung zu erlernen beeinträchtigt. Daher wird die folgende Alternativhypothese aufgestellt:

H₅: Im Gegensatz zu den nutzerzentrierten HMIs verringert sich beim maschinenzentrierten HMI die durchschnittliche Leistung des Bedieners, wenn er seine Position in Bezug auf den Kran in aufeinanderfolgenden Arbeitsgängen ändert.

Für H₅ wird als Leistungsmaß die Zeit zur Aufgabenerfüllung gewählt, weil es die abhängige Variable mit der höchsten praktischen Relevanz der drei Effizienzmetriken ist.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Probandenkollektiv

Für das Experiment wird eine Stichprobe von N = 48 Teilnehmern rekrutiert. Alle Teilnehmer sind entweder Mitarbeiter des Lehrstuhls fml oder Studenten. Das Alter der Teilnehmer liegt zwischen 22 und 33 Jahren mit einem arithmetischen Mittelwert von 27,08 Jahren und einer Standardabweichung von 2,99 Jahren. 15 Teilnehmer (31,25 %) sind weiblich, 32 männlich

(66,67 %) und 1 divers (2,08 %). 29 der Teilnehmer (60,42 %) haben keine Erfahrung mit der Steuerung von Kranen, 16 (33,33 %) haben sehr wenig Erfahrung (alle paar Jahre) und 3 (6,25 %) haben wenig Erfahrung (alle paar Monate). Die Rekrutierung von Teilnehmern mit begrenzter Erfahrung im Kranbetrieb ist notwendig, um die Intuitivität der entstehenden Task-Action-Mappings beurteilen zu können, da die Task-Action-Mappings für das maschinenzentrierte HMI von erfahrenen Kranführern bereits verinnerlicht sind. Dies könnte sonst die Ergebnisse im Hinblick auf die Task-Action-Mappings verfälschen. Weil im Experiment ein Videospiel-Controller als Eingabegerät verwendet wird, werden die Teilnehmer auch gebeten, ihre Vorerfahrungen mit Controllern anzugeben. Nur 2 (4,17 %) Teilnehmer haben keine Vorerfahrung mit Videospiel-Controllern. 15 (31,25 %) Teilnehmer haben sehr wenig Erfahrung mit Controllern, 8 (16,67 %) wenig, 10 (20,83 %) mittelmäßig, 12 (25 %) viel und 1 (2,08 %) sehr viel.

6.3.2 Auswertungsverfahren

Die Daten werden sowohl deskriptiv als auch mit Methoden der Inferenzstatistik ausgewertet. Die Auswertung folgt den Vorschlägen von [Püt-2020].

Teil a und b von H_1 – H_4 werden mit orthogonalen Kontrasten getestet. Der erste Kontrast vergleicht das maschinenzentrierte HMI mit den beiden nutzerzentrierten HMIs (MZ vs. NZ). Der zweite Kontrast vergleicht das richtungsorientierte HMI mit dem zielorientierten HMI (RO vs. ZO). Für alle durch die Hypothesen vorgegebenen Untersuchungen und jeden der beiden untersuchten orthogonalen Kontraste werden zur deskriptiven Analyse eigene Boxplots für die Teilnehmermittelwerte (gemittelt über alle 10 Versuche je HMI) ausgegeben – mit Ausnahme der Untersuchung bezüglich der Kollisionen. Bei der letztgenannten Auswertung werden statt Boxplots Histogramme verwendet. Diese Abweichung resultiert daraus, dass in fünf der 480 Versuche (48 Probanden mit je 10 Versuchen), die mit dem maschinenzentrierten HMI durchgeführt wurden, die Simulation mehr als 50 Kollisionen erkennt. Diese wurden entweder dadurch verursacht, dass die Auslegerspitze des Krans mit dem Boden kollidiert, was als eine Kollision pro Frame, in dem sich die Auslegerspitze des Krans im Kontakt mit der Oberfläche befindet, aufgezeichnet wird, oder dadurch dass die Last auf dem Kran landet und dabei mehrfach vom Kran abprallt. Da diese Zahlen stark von den Funktionsprinzipien der Simulation beeinflusst sind, werden die Versuche mit mehr als 50 Kollisionen aus der weiteren Analyse entfernt. Daher basieren die im Folgenden berichteten deskriptiven Werte für die Zahl der Kollisionen auf den Gesamtstudien- und nicht – wie die anderen Kenngrößen – auf Teilnehmermittelwerten für jedes einzelne HMI, da die aufgenommenen Daten über die verschiedenen HMIs hinweg durch den Ausschluss von Werten nicht mehr ausbalanciert sind.

Die Vorverarbeitung der Rohdaten des Pupillendurchmessers wird mit dem Pupil Diameter Analyzer der PhysioDataToolbox durchgeführt. Das von der Open-Source-Software des

Messsystems bereitgestellte Vorgehen zur Daten-Vorverarbeitung basiert auf der Arbeit von [Kre-2019]. Für die Auswerteparameter werden die Standardempfehlungen der Vorverarbeitungssoftware verwendet. Die Verarbeitung der Messdaten wird in Anhang B erläutert. Unter Verwendung des über beide Augen gemittelten Pupillendurchmessers und des zeitlichen Verlaufs werden abschließend die durchschnittlichen Pupillendurchmesser je Versuch und Teilnehmer berechnet.

Die Daten zum Pupillendurchmesser werden für 45 der 48 Teilnehmer ausgewertet. Die 30 s-Kalibrierungsmessung für drei Teilnehmer zeigt, dass der Eye-Tracker nicht in der Lage ist, ihre Pupillen zu erkennen. Drei weitere Teilnehmer müssen im weiteren Verlauf entfernt werden, weil die Zeitstempel der Versuche fehlerhaft sind. Daher ist es nicht möglich, die Werte korrekt den jeweiligen Versuchen zuzuordnen. Alle Versuche, bei denen mehr als 30 % der Messwerte ungültig sind, werden ebenfalls verworfen (vgl. Empfehlung von [Win-2018]). Darüber hinaus werden alle Teilnehmer, für die der Pupillendurchmesser bei mehr als drei der zehn Versuche für ein beliebiges HMI ungültig ist, komplett aus der Analyse entfernt. Basierend auf diesen Kriterien werden die Daten von $n = 17$ Teilnehmern für die Analyse des Pupillendurchmessers berücksichtigt. Die Daten der verbleibenden 17 Teilnehmer werden visuell auf Plausibilität geprüft. Es ergeben sich keine weiteren Auffälligkeiten, so dass keine weiteren Probandendaten ausgeschlossen werden müssen.

Der RTLX wird als ungewichteter Mittelwert der sechs Subskalen berechnet.

Für die Analyse der Bedienerleistung abhängig vom Positionswechsel (H_5) werden die ersten fünf Versuche für jedes HMI analysiert. Die Teilnehmer in der konstanten Gruppe führen alle einbezogenen Versuche von der gleichen Bedienerposition aus durch, während die Bedienerposition bei den Teilnehmern in der alternierenden Gruppe in jedem aufeinanderfolgenden Versuch wechselt. Da die zufällige Reihenfolge der fünf Start-Ziel-Paarungen innerhalb der zehn Versuche je HMI wiederholt wird, umfassten die fünf einbezogenen Versuche je HMI und pro Teilnehmer jede Start-Ziel-Paarung einmal.

Für die inferenzstatistischen Untersuchungen (und damit für die Hypothesentests) kommen LMM (Linear Mixed Models) zum Einsatz. LMM bieten gegenüber Varianzanalysen mit Messwiederholung (z. B. Mixed ANOVA) den Vorteil, dass sie als Regressionsmethode nicht nur den Vergleich zweier Einflüsse miteinander ermöglichen, sondern bei der Überlagerung von mehreren Einflüssen erlauben, die unterschiedlichen Einflussgrößen direkt zu vergleichen.

Für alle Hypothesen werden Baseline-Modelle erstellt, die erstens je ein zufälliges Abso-lutglied (engl.: random intercept, d. h. y-Achsenabschnitt der Regressionsgerade als Prä-diktor) für das verwendete HMI enthalten, um die Messwiederholungen im Modell zu be-rücksichtigen, und zweitens je einen Fixed Effekt für die Vorerfahrung der Teilnehmer mit

Computerspiel-Controllern. Die Vorerfahrung mit Controllern wird auf Empfehlung der Statistikberatung der TUM als kategorialer Prädiktor einbezogen, um ihren Effekt auf die abhängigen Variablen zu kontrollieren und um die Modellqualität zu erhöhen¹⁰. Die Koeffizienten werden mit der Ausprägung *keine/null* als Basiswert dummykodiert.

Um den Effekt der drei HMI-Konzepte zu untersuchen, wird im nächsten Schritt der Faktor HMI zum jeweiligen Baseline-Modell als Fixed Effect hinzugefügt. Zur Beurteilung, ob der Faktor HMI zur Modellverbesserung beiträgt, wird das erweiterte Modell mit dem Basismodell unter Verwendung des Akaike-Informationskriteriums (AIC) verglichen. Das AIC berücksichtigt die Anzahl der Prädiktoren und bewertet die Modellanpassung, wobei niedrigere Werte auf eine bessere Anpassung hindeuten. Über das AIC hinaus werden die beiden Modelle über einen Vergleich der Log-Likelihood-Dichten (engl. log-likelihood densities; Abkürzung: LogLike) im Bezug auf alle Beobachtungen verglichen, wobei hier ein steigender Wert mit einer besseren Modellqualität korreliert. Über einen Likelihood-Quotienten-Test wird geprüft, ob das erweiterte Modell dem Baseline-Modell signifikant überlegen ist (Ausgabe von χ^2 und p). Wenn beim erweiterten Modell das AIC kleiner wird, die LogLike steigt und p kleiner ist als das gewählte Signifikanzniveau, dann bedeutet das, dass der Faktor HMI einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable hat.

Als Effektgröße für alle Vergleiche wird der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient r berechnet. Für eine Einordnung der Effektgröße wird die Klassifikation von kleinen Effekten ($r \approx 0.1$), mittleren Effekten ($r \approx 0.3$) und starken Effekten ($r \approx 0.5$) nach Cohen verwendet [Coh-2013]. Das Signifikanzniveau wird auf $\alpha = 0,05$ gesetzt. Die p -Werte für die MZ vs. NZ-Kontraste werden für einseitige Tests berichtet, da sie direktionale Hypothesen evaluieren. Alle anderen Tests werden als zweiseitige Tests durchgeführt. Die mit den LMM untersuchten Daten sind – mit sieben Ausnahmen (davon höchstens 4 im Bezug zu einer abhängigen Variablen) – frei von extremen Ausreißern, d. h. Ausreißern, die außerhalb des dreifachen Interquartilsabstands liegen. Durch die geringe Ausreißerzahl im Vergleich zur Zahl der Gesamtbeobachtungen kann davon ausgegangen werden, dass sie keinen Einfluss auf die Qualität der LMM haben.

Die Prüfungen auf die Erfüllung der Voraussetzungen für die verwendeten statistischen Modelle werden im Zusammenhang mit den berichteten Ergebnissen präsentiert. Alle statistischen Analysen werden in der Statistikumgebung R durchgeführt.

¹⁰Die Gestaltung der Basismodelle folgt der Empfehlung von Dr. Stephan Haug von der Statistikberatung der TUM im Rahmen von [Püt-2020].

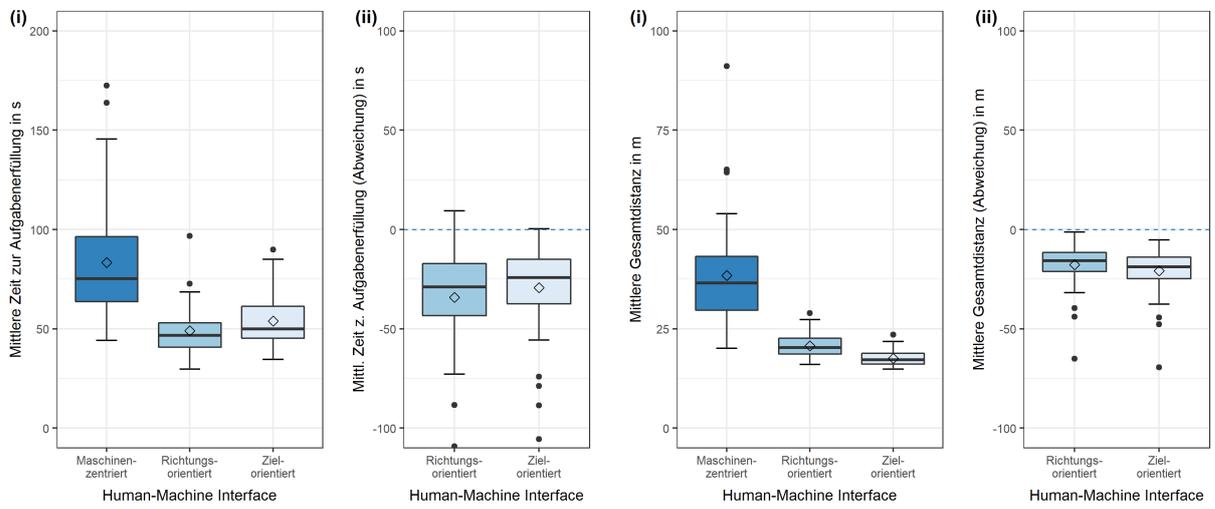
6.3.3 Auswertung: Deskriptive Statistik

Die deskriptive Darstellung erfolgt über die Angabe von Median, Mittelwert, Standardabweichung und Wertebereich. Boxplots mit Median (dicke schwarze Linie innerhalb der Box), arithmetischem Mittelwert (Raute) sowie dem 25 %- bzw. 75 %-Quantil (obere und untere Begrenzung der Box) illustrieren die Verteilungen. Die Whisker der Boxplots erstrecken sich wie allgemein üblich über maximal den 1,5-fachen Interquartilsabstand.

Aufgrund eines Fehlers in der Simulation war ein Teilnehmer nicht in der Lage, die letzten drei Versuche mit dem zielorientierten HMI durchzuführen. Die fehlenden Werte für die Zeit zur Aufgabenerfüllung, die Gesamtdistanz der TCP-Bewegung, die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung und die Kollisionen werden deshalb durch die jeweiligen Mittelwerte der sieben gültigen Versuche ersetzt. Der Teilnehmer hat in den vorangegangenen Versuchen keine Kollisionen verursacht, weshalb dies auch bei den Kollisionen nicht zu einer wesentlichen Verschlechterung der Ergebnisqualität führt.

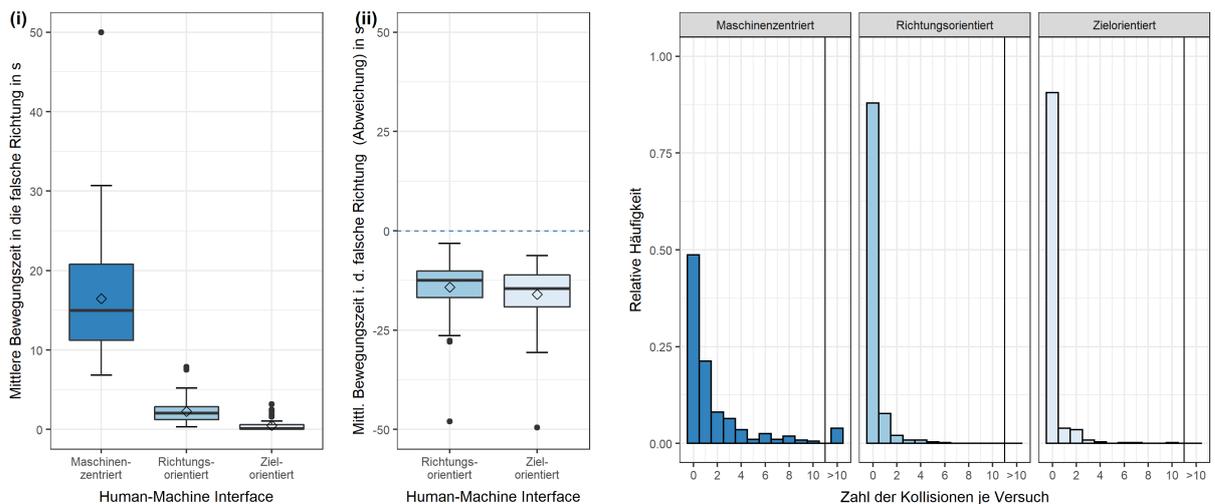
Die Abbildungen 6-3 und 6-4 zeigen Boxplots bzw. Histogramme für die Verteilung der ausgewerteten Kenngrößen. Die Unterabbildung 6-4e zeigt explorativ – über die Hypothesen hinaus – den Verlauf der Zeit zur Aufgabenerfüllung über die 10 Versuche je HMI. Dieser Verlauf wird im Folgenden dazu genutzt, die Lernförderlichkeit der HMI (vgl. Abschnitt 2.1.2) explorativ zu untersuchen.

Alle deskriptiven Kennwerte sind zusätzlich in Tabelle 6-1 aufgeführt.



(a) Verteilung der mittleren Zeit zur Aufgabenerfüllung für die betrachteten HMIs (i) und Differenz zwischen der mittleren Bearbeitungszeit für die beiden nutzerzentrierten HMIs relativ zum maschinenzentrierten HMI (ii)

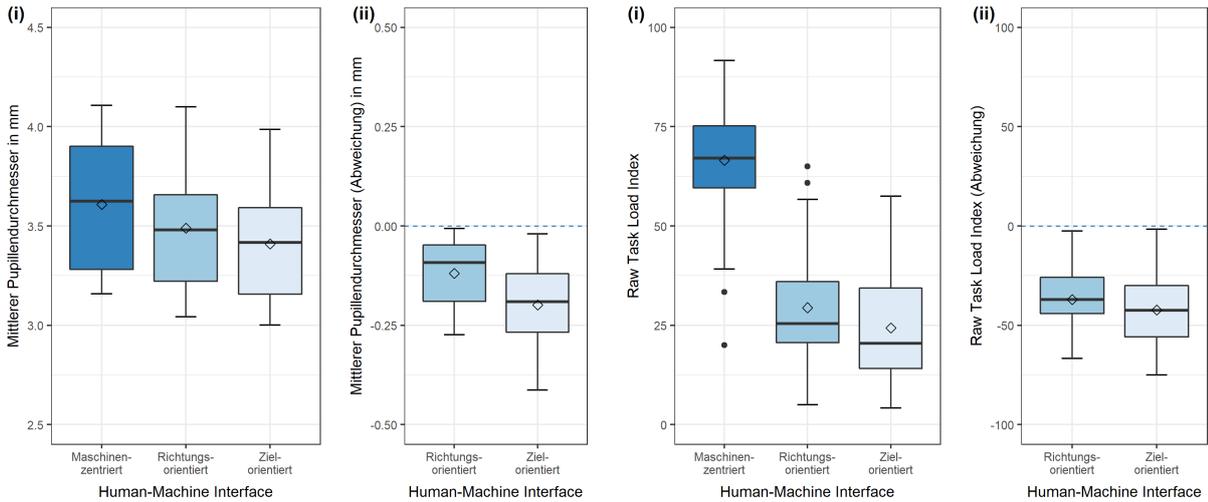
(b) Verteilung der mittleren Gesamtdistanz der TCP-Bewegung für die betrachteten HMIs (i) und Differenz zwischen der mittleren Gesamtdistanz der TCP-Bewegung für die beiden nutzerzentrierten HMIs relativ zum maschinenzentrierten HMI (ii)



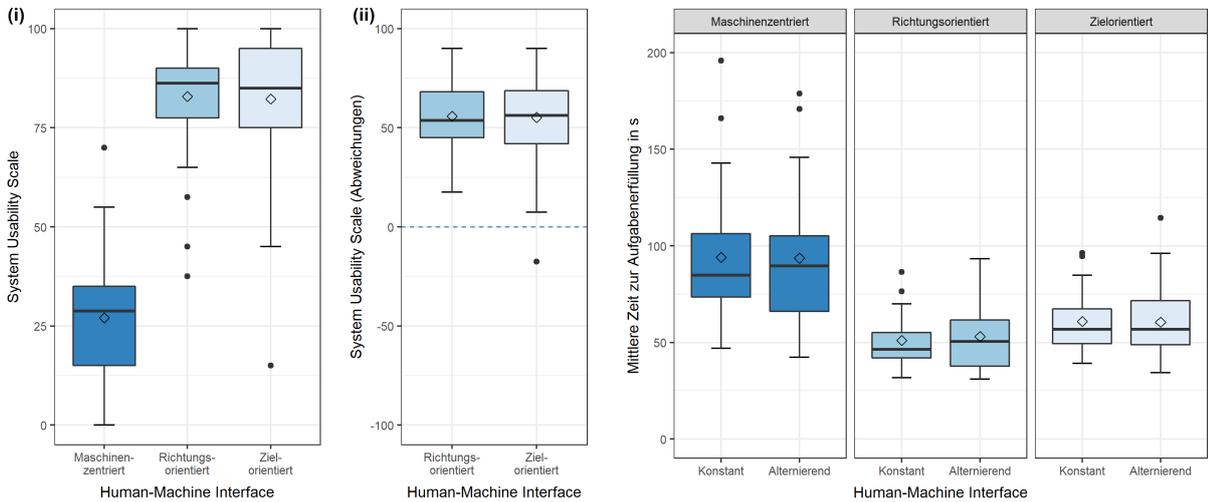
(c) Verteilung der mittleren Zeit, in der der TCP in die falsche Richtung bewegt wird für die betrachteten HMIs (i) und Differenz zwischen der mittleren Zeit, in der der TCP in die falsche Richtung bewegt wird für die beiden nutzerzentrierten HMIs relativ zum maschinenzentrierten HMI (ii)

(d) Verteilung der relativen Häufigkeit der auftretenden Kollisionen je Versuch für die drei untersuchten HMIs

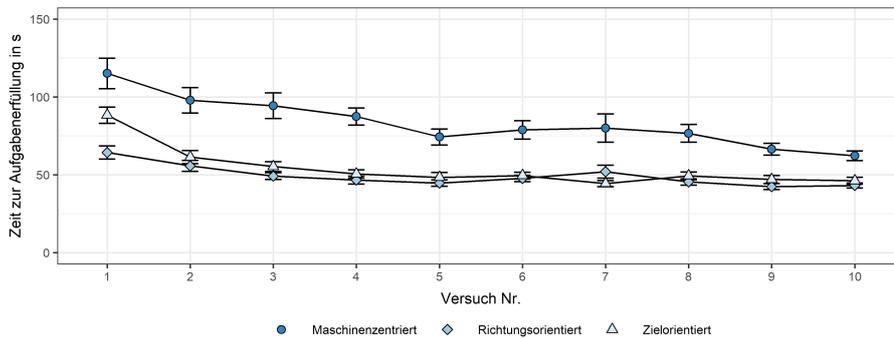
Abbildung 6-3: Boxplots (Mittelwerte über alle Versuche je Proband mit dem gleichen HMI) und Histogramm (Absolutwerte) zur deskriptiven Auswertung der empirischen Laborstudie (Teil 1). (i) zeigt die Unterschiede zwischen den drei untersuchten HMIs, und (ii) die Abweichungen der nutzerzentrierten HMIs relativ zum Mittelwert des maschinenzentrierten HMI (Ausnahme: Kollisionen)



(a) Verteilung des mittleren Pupillendurchmessers für die betrachteten HMIs (i) und Differenz im mittleren Pupillendurchmesser für die beiden nutzerzentrierten HMIs relativ zum maschinenzentrierten HMI (ii) (b) Verteilung der RTLX-Werte für die betrachteten HMIs (i) und Differenz zwischen den RTLX-Werten für die beiden nutzerzentrierten HMIs relativ zum maschinenzentrierten HMI (ii)



(c) Verteilung der SUS-Werte für die betrachteten HMIs (i) und Differenz zwischen den SUS-Werten für die beiden nutzerzentrierten HMIs relativ zum maschinenzentrierten HMI (ii) (d) Verteilung der mittleren Zeit zur Aufgabenerfüllung aller betrachteten HMIs für die beiden Bedienerpositionsgruppen konstant und alternierend



(e) Verlaufseffekt: Entwicklung der Zeit zur Aufgabenerfüllung über den Verlauf der 10 Versuche je HMI (Mittelwert und statistischer Standardfehler)

Abbildung 6-4: Boxplots (Mittelwerte über alle Versuche je Proband mit dem gleichen HMI) zur deskriptiven Auswertung der empirischen Laborstudie (Teil 2). (i) zeigt die Unterschiede zwischen den drei untersuchten HMIs, und (ii) die Abweichungen der nutzerzentrierten HMIs relativ zum Mittelwert des maschinenzentrierten HMI (Ausnahme: Bedienerpositionsgruppen). Unterabbildung (e) zeigt den Verlauf der Zeit zur Aufgabenerfüllung über die 10 Versuche je HMI (Verlaufseffekt)

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der deskriptiven Kenngrößen

	HMI	arithm. Mittel	Std.-abw.	Median	Minimum	Maximum
Zeit zur Aufgabenerfüllung (Teilnehmermittelwerte über alle Versuche je HMI)	maschinenzentriert	83,31 s	29,84 s	75,27 s	44,24 s	172,43 s
	richtungsorientiert	49,09 s	12,81 s	46,66 s	29,63 s	96,83 s
	zielorientiert	53,99 s	13,37 s	50,00 s	34,52 s	89,86 s
Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (Teilnehmermittelwerte über alle Versuche je HMI)	maschinenzentriert	38,43 m	12,35 m	36,56 m	20,07 m	91,12 m
	richtungsorientiert	20,74 m	3,07 m	20,24 m	16,05 m	28,91 m
	zielorientiert	17,57 m	1,98 m	17,17 m	14,88 m	23,49 m
TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (Teilnehmermittelwerte über alle Versuche je HMI)	maschinenzentriert	16,48 s	7,97 s	14,97 s	6,85 s	50,00 s
	richtungsorientiert	2,29 s	1,60 s	2,03 s	0,32 s	7,87 s
	zielorientiert	0,49 s	0,72 s	0,13 s	0 s	3,19 s
Kollisionen je Versuch (absolut)	maschinenzentriert	1,74	3,30	1,00	0	30
	richtungsorientiert	0,21	0,71	0	0	6
	zielorientiert	0,20	0,82	0	0	10
Pupillendurchmesser (Teilnehmermittelwerte über alle Versuche je HMI)	maschinenzentriert	3,61 mm	0,33 mm	3,63 mm	3,16 mm	4,11 mm
	richtungsorientiert	3,49 mm	0,31 mm	3,48 mm	3,04 mm	4,10 mm
	zielorientiert	3,41 mm	0,30 mm	3,42 mm	3,00 mm	3,99 mm
RTLX (ermittelt je HMI)	maschinenzentriert	66,55	14,22	67,08	20,00	91,67
	richtungsorientiert	29,44	14,28	25,42	5,00	65,00
	zielorientiert	24,31	13,68	20,42	4,17	57,50
SUS (ermittelt je HMI)	maschinenzentriert	27,03	15,15	28,75	0	70,00
	richtungsorientiert	82,92	12,78	86,25	37,50	100,00
	zielorientiert	82,24	17,00	85,00	15,00	100
mittlere Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung zwischen Versuchen (Teilnehmermittelwerte über alle Versuche je HMI)	maschinenzentriert (konst.)	94,01 s	36,95 s	84,85 s	47,03 s	195,86 s
	maschinenzentriert (altern.)	93,61 s	35,74 s	89,60 s	42,36 s	178,87 s
	richtungsorientiert (konst.)	51,01 s	13,01 s	46,35 s	31,86 s	86,40 s
	richtungsorientiert (altern.)	53,15 s	17,36 s	50,43 s	30,96 s	93,26 s
	zielorientiert (konst.)	60,90 s	16,04 s	56,72 s	39,22 s	96,38 s
	zielorientiert (altern.)	60,59 s	20,15 s	56,83 s	34,37 s	114,42 s

Die Ergebnisse zeichnen folgendes Bild:

- Die Zeit zur Aufgabenerfüllung ist beim maschinenzentrierten HMI am höchsten, gefolgt vom zielorientierten HMI. Mit dem richtungsorientierten HMI werden die Aufgaben im Mittel am schnellsten gelöst.
- Die Gesamtdistanz der TCP-Bewegung ist beim maschinenzentrierten HMI am höchsten, gefolgt vom richtungsorientierten HMI. Mit dem zielorientierten HMI werden die Aufgaben im Mittel auf dem kürzesten Weg gelöst. Alle Werte für beide nutzerzentrierten HMIs liegen unterhalb des Mittelwerts des maschinenzentrierten HMI.
- Wie zu erwarten spiegeln die Daten für die mittlere Zeit, in der der TCP in die falsche Richtung bewegt wird, die Gesamtdistanz des TCP wider: Die mittlere Zeit, in der der TCP in die falsche Richtung bewegt wird, ist beim maschinenzentrierten HMI am höchsten, gefolgt vom richtungsorientierten und anschließend vom zielorientierten HMI. Ein Teilnehmer zeigt beim maschinenzentrierten HMI eine wesentlich höhere mittlere Zeit im Vergleich zum Rest der Stichprobe. Da der Teilnehmer jedoch die Versuche nach bestem Wissen und Gewissen ausgeführt hat, ist es nicht gerechtfertigt, ihn als Ausreißer auszuschließen. Mit dem zielorientierten HMI erreichen 40 der 48 Probanden mittlere Zeiten von weniger als 1 s. Alle Werte für beide nutzerzentrierten HMIs liegen unterhalb des Mittelwerts des maschinenzentrierten HMI.
- Basierend auf den Kollisionen je Versuch zeigt sich, dass die meisten Kollisionen beim maschinenzentrierten HMI auftreten. Beim richtungs- und zielorientierten HMI treten deutlich weniger Kollisionen auf. Gleichzeitig ergeben sich kaum Unterschiede zwischen den beiden nutzerzentrierten HMIs. Besonders hervorzuheben ist, dass beim maschinenzentrierten HMI lediglich 234 der 475 (49,26 %) Versuche ohne Kollisionen absolviert werden. Dem gegenüber stehen 422 von 480 Versuchen (87,92 %) ohne Kollision beim richtungsorientierten bzw. 435 von 480 Versuchen (90,62 %) beim zielorientierten HMI. Beim maschinenzentrierten HMI finden sich 14 Versuche mit mehr als 10 Kollisionen, während die nutzerzentrierten HMIs in allen Versuchen unterhalb von 10 Kollisionen bleiben. Ferner ist hervorzuheben, dass bei den beiden nutzerzentrierten HMIs keine Versuche mit mehr als 50 Kollisionen auftreten, verglichen mit 5 Kollisionen beim maschinenzentrierten HMI.
- Der mittlere Pupillendurchmesser ist beim maschinenzentrierten HMI am höchsten, gefolgt vom richtungsorientierten und vom zielorientierten HMI. Für alle 17 Probanden, deren Pupillendurchmesser ausgewertet werden, liegt der mittlere Pupillendurchmesser für die nutzerzentrierten HMIs unterhalb des Mittelwerts des maschinenzentrierten HMI.
- Die Probanden weisen dem maschinenzentrierten HMI den höchsten RTLX zu: Alle 48 Teilnehmer geben dem maschinenzentrierten HMI einen höheren RTLX als den nutzerzentrierten HMIs. Das zielorientierte HMI wird mit den niedrigsten RTLX-Werten bewertet und schneidet somit am besten ab.
- Das maschinenzentrierte HMI erhält den niedrigsten SUS-Wert. Die beiden nutzerzentrierten HMIs schneiden besser ab und unterscheiden sich nur geringfügig. Basierend

auf der Einstufung nach Bangor, Kortum und Miller [Ban-2008] auf einer Absolutskala entsprechen die mittleren SUS-Werte der Note *nicht akzeptabel: schlechtestmögliche Erfahrung* für das maschinenzentrierte HMI und der Note *akzeptabel: exzellente Erfahrung* für die beiden nutzerzentrierten HMIs.

- Hinsichtlich der Bedienerleistung bei konstanter bzw. alternierender Bedienerposition ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede in den mittleren Zeiten zur Aufgabenerfüllung. Die Streubreite unterscheidet sich zwischen den beiden Gruppen geringfügig bei allen Steuerungsvarianten, mit der Tendenz zu geringeren Streuungen bei konstanter Bedienerposition.
- Der Verlaufseffekt (sinkende Zeit zur Aufgabenerfüllung über die 10 Versuche je HMI) ist beim maschinenzentrierten HMI am deutlichsten zu erkennen. Bei den nutzerzentrierten HMIs sind vor allem bei den ersten drei Versuchen nennenswerte Zeitreduktionen zu erkennen. Anschließend ist der Verlauf annähernd konstant.

6.3.4 Auswertung: Inferenzstatistik

Tabelle 6-2 zeigt für alle Hypothesen den Vergleich zwischen dem Baseline-Modell (LMM ohne Faktor HMI) sowie dem erweiterten Modell (LMM mit Fixed Effect HMI). Zur Überprüfung, ob die Voraussetzung für LMM erfüllt sind (Linearität, Homoskedastizität, normalverteilte Residuen, Auswahl der zufälligen Effekte, Abwesenheit von Ausreißern), werden Diagnoseplots angefertigt. Diese sind im Anhang C.1.1 zu finden.

Die deskriptive Analyse der Kollisionen je Versuch zeigt, dass offensichtlich keine Normalverteilung der abhängigen Variable für Hypothese H_{1-4} vorliegt. Aus diesem Grund wird Hypothese H_{1-4} – abweichend von den anderen Untersuchungen – mit GLMM (Generalized Linear Mixed Models), denen eine Poisson-Verteilung zugrunde liegt, untersucht. Da die Daten für die Kollisionen je Versuch viele Nullwerte enthalten, wird das resultierende GLMM für Baseline + HMI auf Nullenüberschuss (zero-inflation) geprüft. Das Modell zeigt zero-inflation ($p < 0.0001$), und wird daher durch einen konditionalen Teil zu einem ZIPM (Zero-inflated Poisson-Modell) erweitert¹¹. Das ZIPM zeigt keinen Effekt durch zero-inflation ($p = 0,952$). Zur Evaluation der Hypothese H_{1-4} wird daher das ZIPM ausgewertet.

Insgesamt zeigt sich für alle Hypothesen, dass der Faktor HMI die Modellqualität verbessert (AIC sinkt, LogLike steigt). Bei $H_1 - H_4$ hat er außerdem, einen signifikanten Einfluss auf die jeweilige abhängige Variable. Erweitert man zur Evaluation von H_5 das Modell zusätzlich um die Unterscheidung *mit bzw. ohne Positionsänderung zwischen zwei Versuchen* für die Untersuchung von H_5 , ergibt sich keine Modellverbesserung. Auch die Ergänzung eines Interaktionsterms zwischen HMI und Reihenfolge führt nicht zu einer Modellverbesserung.

¹¹ Die Verwendung eines ZIPM wurde von Dr. Stephan Haug von der TUM-Statistikberatung im Rahmen von [Püt-2020] empfohlen.

Um H_5 überhaupt untersuchen zu können, wird das Modell Baseline + HMI + Reihung verwendet, auch wenn der Effekt der Reihung nicht signifikant zur Modellverbesserung beiträgt. Für die explorative Analyse des Verlaufseffekts wird das Basismodell für die Zeit zur Aufgabenerfüllung um das verwendete HMI sowie die Versuchsnummer erweitert, was zu einer signifikant besseren Modellanpassung führt.

Tabelle 6-2: Zusammenfassung der Modellparameter für alle Hypothesen (Modellart: LMM, außer Kollisionen je Versuch: GLMM bzw. ZIPM)

Hypothese bzw. abhängige Variable	Modell	AIC	LogLike	χ^2	p
H_{1-1} Zeit zur Aufgabenerfüllung	Baseline	1270,36	-626,18	133,41	<0,0001
	Baseline + HMI	1140,95	-559,47		
H_{1-2} Gesamtdistanz der TCP-Bewegung	Baseline	791,21	-386,60	235,59	<0,001
	Baseline + HMI	559,62	-268,81		
H_{1-3} TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung	Baseline	2910,78	-1446,40	370,01	<0,0001
	Baseline + HMI	2544,76	-1261,38		
H_{1-4} Kollisionen je Versuch	Baseline (GLMM)	3218,3	-1601,1	103,69	<0,0001
	Baseline + HMI (GLMM)	3118,7	-1549,3		
	Baseline + HMI (ZIPM)	2766,8	-1370,4		
H_2 Pupillendurchmesser	Baseline	-507,13	261,56	31,78	<0,0001
	Baseline + HMI	-534,91	277,45		
H_3 RTLX	Baseline	1331,14	-656,57	167,00	<0,0001
	Baseline + HMI	1168,14	-573,07		
H_4 SUS	Baseline	1406,83	-694,42	206,53	<0,0001
	Baseline + HMI	1204,30	-591,15		
H_5 Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung	Baseline	788,05	-385,02	117,09	<0,0001
	Baseline + HMI	674,95	-326,48		
	Baseline + HMI + Reihung	676,95	-326,48		
expl. Verlaufseffekt, bezogen auf die Zeit zur Aufgabenerfüllung über 10 Versuche je HMI	Baseline	1270,36	-626,18	344,12	<0,0001
	Baseline + HMI + Versuch	932,23	-454,12		

Einfluss auf die Leistung der Probanden (H_1)

Da H_{1a} und H_{1b} für vier verschiedene abhängige Variablen operationalisiert wurden, wird das Signifikanzniveau für diesen Teil der Analyse angepasst, um den Typ-I-Fehler zu kontrollieren. α wird hierfür unter Verwendung der Bonferroni-Korrektur auf $\alpha = 0.05/4 = 0.0125$ gesetzt.

Zeit zur Aufgabenerfüllung (H_{1-1})

Die beiden Modelle für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (Baseline sowie Baseline + HMI) basieren auf der log-transformierten Zeit zur Aufgabenerfüllung. Ohne Log-Transformation verletzt das LMM die Voraussetzungen der normalverteilten Residuen, der Homoskedastizität sowie der korrekten Auswahl der zufälligen Effekte. Das log-transformierte Modell erfüllt die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.1).

Tabelle 6-3 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die abhängige Variable „Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert)“. Die Spalte b gibt die Steigung der Regressionsgeraden für den jeweiligen Faktor an, und SE b steht für den korrespondierenden Standardfehler. Der p -Wert zeigt an, ob der Einfluss des entsprechenden Faktors signifikant ist. Mit Hilfe des t -Werts wird die Effektstärke r berechnet. Die rücktransformierten Werte der Spalte e^b erleichtern die Interpretation der Regressionsgeradensteigungen b im Fall einer Log-Transformation: ein Wert von $e^b = 0,87$ beim Kontrast MZ vs. NZ entspricht beispielsweise einer Reduktion der mittleren Zeit zur Aufgabenerfüllung (nicht log-transformiert) um 13 %, der sich durch die Verwendung eines nutzerzentrierten HMI gegenüber dem globalen Mittelwert aller HMIs ergibt.

Tabelle 6-3: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert)

	b	SE b	t	p	r	e^b
Intercept	4,28	0,13	32,97	<0,0001		71,99
Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern						
Sehr wenig	-0,11	0,14	-0,77	0,4471	0,12	0,90
Wenig	-0,30	0,15	-2,12	0,0399	0,31	0,74
Mittel	-0,38	0,14	-2,66	0,0110	0,38	0,69
Viel	-0,39	0,14	-2,77	0,0083	0,39	0,68
Sehr viel	-0,27	0,22	-1,18	0,2445	0,18	0,77
HMI (orthogonale Kontraste)						
MZ vs. NZ	-0,14	0,01	-16,73	<0,0001	0,87	0,87
RO vs. ZO	0,04	0,01	2,77	0,0067	0,27	1,04

Bei der Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern haben die Niveaus „mittel“ und „viel“ einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable, mit geringer bis mittlerer Effektstärke. Der orthogonale Kontrast MZ vs. NZ zeigt, dass die Reduktion der Zeit zur Aufgabenerfüllung durch die nutzerzentrierten HMIs signifikant ist und eine sehr hohe Effektstärke aufweist. Der Kontrast RO vs. ZO ist ebenfalls signifikant, mit mittlerer Effektstärke und zugunsten des richtungsorientierten HMI (vgl. Mittelwerte in Tabelle 6-2). Sowohl H_{1-1a} als auch H_{1-1b} werden somit akzeptiert.

Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (H_{1-2})

Die beiden Modelle für die Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (Baseline sowie Baseline + HMI) basieren auf der log-transformierten Gesamtdistanz zur TCP-Bewegung. Ohne Log-Transformation verletzt das LMM die Voraussetzungen der normalverteilten Residuen, der Homoskedastizität sowie der korrekten Auswahl der zufälligen Effekte. Das log-transformierte Modell erfüllt die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.1).

Tabelle 6-4 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die abhängige Variable „Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (log-transformiert)“.

Tabelle 6-4: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (log-transformiert)

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>e^b</i>
Intercept	3,31	0,09	37,52	<0,0001		27,36
Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern						
Sehr wenig	-0,10	0,09	-1,06	0,2965	0,16	0,91
Wenig	-0,18	0,10	-1,87	0,0684	0,28	0,83
Mittel	-0,24	0,10	-2,53	0,0153	0,36	0,78
Viel	-0,25	0,10	-2,65	0,0112	0,38	0,78
Sehr viel	-0,14	0,15	-0,93	0,3560	0,14	0,87
HMI (orthogonale Kontraste)						
MZ vs. NZ	-0,21	0,01	-27,77	<0,0001	0,94	0,81
RO vs. ZO	-0,07	0,01	-5,56	<0,0001	0,50	0,93

Bei der Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern hat das Niveau „viel“ einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable, aber mit im Vergleich zu den orthogonalen Kontrasten der HMI geringerer Effektstärke. Der orthogonale Kontrast MZ vs. NZ zeigt, dass die Reduktion der Zeit zur Aufgabenerfüllung durch die nutzerzentrierten HMIs signifikant ist und eine sehr hohe Effektstärke aufweist. Der Kontrast RO vs. ZO ist ebenfalls signifikant, mit hoher Effektstärke und zugunsten des zielorientierten HMI. Sowohl H_{1-2a} als auch H_{1-2b} werden somit akzeptiert.

TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (H₁₋₃)

Die beiden Modelle für die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (Baseline sowie Baseline + HMI) basieren auf der log-transformierten TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung. Ohne Log-Transformation verletzt das LMM die Voraussetzungen der normalverteilten Residuen, der Homoskedastizität sowie der korrekten Auswahl der zufälligen Effekte. Das log-transformierte Modell erfüllt die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.1).

Tabelle 6-5 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die abhängige Variable „TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (log-transformiert)“.

Tabelle 6-5: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (log-transformiert)

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>e^b</i>
Intercept	1,58	0,15	10,53	<0,0001		4,86
Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern						
Sehr wenig	-0,21	0,16	-1,31	0,1981	0,20	0,81
Wenig	-0,40	0,17	-2,35	0,0233	0,34	0,67
Mittel	-0,48	0,16	-2,90	0,0059	0,41	0,62
Viel	-0,38	0,16	-2,36	0,0231	0,34	0,68
Sehr viel	-0,26	0,26	-1,00	0,3250	0,15	0,77
HMI (orthogonale Kontraste)						
MZ vs. NZ	-0,71	0,016	-44,33	<0,0001	0,98	0,49
RO vs. ZO	-0,33	0,03	-12,00	<0,0001	0,78	0,72

Bei der Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern hat das Niveau „mittel“ einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable, mit mittlerer Effektstärke. Der orthogonale Kontrast MZ vs. NZ zeigt, dass die Reduktion der Zeit zur Aufgabenerfüllung durch die nutzerzentrierten HMIs signifikant ist und eine sehr hohe Effektstärke aufweist. Der Kontrast RO vs. ZO ist ebenfalls signifikant, mit sehr hoher Effektstärke und zugunsten des zielorientierten HMI. Sowohl H_{1-3a} als auch H_{1-3b} werden somit akzeptiert.

Kollisionen je Versuch (H₁₋₄)

Tabelle 6-6 zeigt die Koeffizienten des GLMM-Teils mit zero-inflation (Baseline + HMI) für die abhängige Variable „Kollisionen je Versuch“. Tabelle 6-7 zeigt den korrespondierenden konditionalen Teil des GLMM zur Berücksichtigung der zero-inflation. Statt des t-Werts wird aufgrund der Verwendung eines ZIPM der z-Wert angegeben. Bedingt durch die Modellart wird keine Effektstärke berechnet.

Tabelle 6-6: Koeffizienten des GLMM-Teils mit zero-inflation (Baseline + HMI) für Kollisionen je Versuch

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>z</i>	<i>p</i>
Intercept	0,66	0,12	5,49	<0,0001
HMI (orthogonale Kontraste)				
MZ vs. NZ	0,67	0,07	9,76	<0,0001
RO vs. ZO	0,24	0,15	1,58	0,115

Der Modellteil mit zero-inflation zeigt einen signifikanten Effekt auf die Anzahl der Versuche ohne Kollisionen für den Kontrast MZ vs. NZ zum Vorteil der nutzerzentrierten HMIs. Es existiert kein signifikanter Kontrast zwischen dem richtungs- und dem zielorientierten HMI im Bezug auf die Versuche ohne Kollisionen.

Tabelle 6-7: Koeffizienten des konditionalen Teils des GLMM (Baseline + HMI) für Kollisionen je Versuch

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>z</i>	<i>p</i>
Intercept	0,57	0,56	1,03	0,3022
Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern				
Sehr wenig	-0,26	0,59	-0,44	0,6602
Wenig	-0,35	0,62	-0,57	0,5718
Mittel	1,02	0,61	-1,67	0,0942
Viel	-1,17	0,60	-1,94	0,0524
Sehr viel	0,07	1,00	0,07	0,9449
HMI (orthogonale Kontraste)				
MZ vs. NZ	-0,34	0,06	-5,72	<0,0001
RO vs. ZO	0,12	0,14	0,86	0,3917

Im konditionalen Teil des Modells zeigt sich kein signifikanter Effekt der Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern. Auch in diesem Modellteil ist für die Zahl der Kollisionen je Versuch der Kontrast MZ vs. NZ signifikant zum Vorteil der nutzerzentrierten HMIs, während der Kontrast RO vs. ZO nicht signifikant ist.

Beide Modellteile stützen folglich die Annahme von H_{1-4a} , während H_{1-4b} verworfen werden muss.

Einfluss auf den Pupillendurchmesser der Probanden (H₂)

Beide Modelle für den Pupillendurchmesser (Baseline sowie Baseline + HMI) erfüllen die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.1).

Tabelle 6-8 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die abhängige Variable „Pupillendurchmesser“. Durch den Ausschluss einiger Probanden (vgl. Abschnitt 6.3.2) befindet sich in der untersuchten Gruppe für Pupillendurchmesser kein Proband mehr mit sehr wenig Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern.

Tabelle 6-8: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für den Pupillendurchmesser

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Intercept	3,53	0,11	33,23	<0,0001	
Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern					
Wenig	-0,04	0,30	-0,15	0,8848	0,04
Mittel	0,04	0,18	0,25	0,8031	0,07
Viel	-0,19	0,18	-1,07	0,3038	0,30
Sehr viel	0,21	0,30	0,70	0,4959	0,20
HMI (orthogonale Kontraste)					
MZ vs. NZ	-0,05	0,01	-6,61	<0,0001	0,76
RO vs. ZO	-0,04	0,01	-2,87	0,0072	0,45

Es zeigt sich kein signifikanter Effekt der Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern. Der orthogonale Kontrast MZ vs. NZ zeigt, dass die Reduktion des Pupillendurchmessers durch die nutzerzentrierten HMIs signifikant ist und eine sehr hohe Effektstärke aufweist. Der Kontrast RO vs. ZO ist ebenfalls signifikant, mit hoher Effektstärke und zugunsten des zielorientierten HMI. Sowohl H_{2a} als auch H_{2b} werden somit akzeptiert.

Einfluss auf den RTLX (H₃)

Tabelle 6-9 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die abhängige Variable „RTLX“.

Es zeigt sich kein signifikanter Effekt der Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern. Der orthogonale Kontrast MZ vs. NZ zeigt, dass die Reduktion des RTLX durch die nutzerzentrierten HMIs signifikant ist und eine sehr hohe Effektstärke aufweist. Der Kontrast RO vs. ZO ist ebenfalls signifikant, mit mittlerer Effektstärke und zugunsten des zielorientierten HMI.

Tabelle 6-9: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für den RTLX

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Intercept	50,42	7,07	7,14	<0,0001	
Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern					
Sehr wenig	-7,01	7,52	-0,93	0,3567	0,14
Wenig	-10,24	7,90	-1,30	0,2018	0,20
Mittel	-13,03	7,74	-1,68	0,0998	0,25
Viel	-13,17	7,63	-1,73	0,0917	0,26
Sehr viel	-19,86	12,24	-1,62	0,1121	0,24
HMI (orthogonale Kontraste)					
MZ vs. NZ	-13,22	0,69	-19,20	<0,0001	0,89
RO vs. ZO	-2,57	1,19	-2,15	0,0338	0,22

Beide Modelle für den RTLX (Baseline sowie Baseline + HMI) erfüllen die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.1), mit Ausnahme der Homoskedastizität. Der Empfehlung von [Cai-2007, S. 8] folgend, wird in diesem Spezialfall keine Log-Transformation, sondern zusätzlich eine Friedman's ANOVA als nicht-parametrischer Test durchgeführt. Der signifikante Effekt des HMI auf den RTLX wird bestätigt ($\chi^2 = 75,40$, $p < 0,0001$). Anschließend wird je ein post-hoc Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Hypothesen H_{3a} und H_{3b} durchgeführt. Mit Hilfe der Bonferroni-Korrektur wird das Signifikanzniveau auf $\alpha = \frac{0,05}{2} = 0,025$ justiert, um eine Kumulierung des Typ-I-Fehlers zu vermeiden. Für den orthogonalen Kontrast MZ vs. NZ ergibt sich ein signifikanter Effekt ($p < 0,0001$) mit sehr großer Effektstärke ($r = 0,87$). Der Kontrast RO vs. ZO ist nicht signifikant ($p = 0,0313$, $r = 0,31$).

Sowohl das LMM als auch die ANOVA ergeben, dass H_{3a} akzeptiert werden kann. H_{3b} kann hingegen nur mit dem LMM akzeptiert werden, während sie auf Basis der ANOVA verworfen werden muss. In Summe kann H_{3b} folglich nicht akzeptiert werden und wird verworfen.

Einfluss auf den SUS (H_4)

Tabelle 6-10 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die abhängige Variable „SUS“.

Es zeigt sich kein signifikanter Effekt der Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern. Der orthogonale Kontrast MZ vs. NZ zeigt, dass die Erhöhung des SUS durch die nutzerzentrierten HMIs signifikant ist und eine sehr hohe Effektstärke aufweist. Der Kontrast RO vs. ZO ist nicht signifikant.

Tabelle 6-10: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für den SUS

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Intercept	64,58	6,90	9,36	<0,0001	
Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern					
Sehr wenig	-3,42	7,34	-0,47	0,6441	0,07
Wenig	1,25	7,71	0,16	0,8720	0,03
Mittel	0,42	7,56	0,06	0,9563	0,01
Viel	0,56	7,45	0,07	0,9409	0,01
Sehr viel	5,42	11,95	0,45	0,6526	0,07
HMI (orthogonale Kontraste)					
MZ vs. NZ	18,52	0,84	22,01	<0,0001	0,92
RO vs. ZO	-0,34	1,46	-0,23	0,8168	0,02

Auch in diesem Fall erfüllen die Modelle (Baseline sowie Baseline + HMI) die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.1), mit Ausnahme der Homoskedastizität. Analog zum RTLX wird wieder zusätzlich eine Friedman's ANOVA durchgeführt. Der signifikante Effekt des HMI auf den SUS wird bestätigt ($\chi^2 = 71,36$, $p < 0,0001$). Anschließend wird wieder je ein post-hoc Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Hypothesen H_{4a} und H_{4b} durchgeführt (Justierung: $\alpha = 0,025$). Für den orthogonalen Kontrast MZ vs. NZ ergibt sich ein signifikanter Effekt ($p < 0,0001$) mit sehr großer Effektstärke ($r = 0,87$). Der Kontrast RO vs. ZO ist nicht signifikant ($p = 0,5827$, $r = 0,08$).

Sowohl das LMM als auch die ANOVA ergeben, dass H_{4a} akzeptiert werden kann und H_{4b} verworfen werden muss.

Einfluss auf die Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung (H_5)

Analog zur Untersuchung von H_{1-1} basieren die Modelle für die Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionswechsel (Baseline sowie Baseline + HMI + Reihung) auf der log-transformierten Zeit zur Aufgabenerfüllung. Ohne Log-Transformation verletzt das LMM die Voraussetzungen der normalverteilten Residuen, der Homoskedastizität sowie der korrekten Auswahl der zufälligen Effekte. Das log-transformierte Modell erfüllt die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.1).

Tabelle 6-11 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Reihung) für die abhängige Variable „Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung (log-transformiert)“. Die Bedienergruppe ohne Positionswechsel wird als Baseline verwendet.

Tabelle 6-11: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Reihung) für die Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung (log-transformiert)

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>e^b</i>
Intercept	4,41	0,15	29,87	<0,0001		82,56
Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern						
Sehr wenig	-0,13	0,15	-0,85	0,3982	0,13	0,88
Wenig	-0,36	0,16	-2,25	0,0297	0,33	0,70
Mittel	-0,42	0,16	-2,63	0,0119	0,38	0,66
Viel	-0,47	0,16	-3,02	0,0044	0,43	0,62
Sehr viel	-0,30	0,25	-1,18	0,2453	0,18	0,74
HMI (orthogonale Kontraste)						
MZ vs. NZ	-0,16	0,01	-14,58	<0,0001	0,83	0,86
RO vs. ZO	0,07	0,02	3,69	0,0004	0,36	1,07
Einfluss der Reihung						
Alternierend	0,01	0,06	0,01	0,9958	0,01	1,00

Bei der Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern haben die Niveaus „wenig“, „mittel“ und „viel“ einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable, mit mittlerer bis großer Effektstärke. Der orthogonale Kontrast MZ vs. NZ zeigt (analog zu H_{1-1}), dass die Reduktion der Zeit zur Aufgabenerfüllung durch die nutzerzentrierten HMIs signifikant ist und eine sehr hohe Effektstärke aufweist. Der Kontrast RO vs. ZO ist ebenfalls signifikant, mit mittlerer Effektstärke und zugunsten des richtungsorientierten HMI. Die Reihung (mit bzw. ohne Positionsänderung zwischen zwei Versuchen) hat keinen signifikanten Einfluss auf die Zeit zur Aufgabenerfüllung. Ein möglicher Interaktionseinfluss zwischen der Reihung und dem HMI wird im Rahmen der Modellbildung ausgeschlossen. Damit muss H_5 verworfen werden.

Explorative Analyse: Verlaufseffekt

Die beiden Modelle für die Zeit zur Aufgabenerfüllung zur Untersuchung des Verlaufseffekts (Baseline sowie Baseline + HMI + Versuchsnummer) basieren auf der log-transformierten Zeit zur Aufgabenerfüllung. Ohne Log-Transformation verletzt das LMM die Voraussetzungen der normalverteilten Residuen, der Homoskedastizität sowie der korrekten Auswahl der zufälligen Effekte. Das log-transformierte Modell erfüllt die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.1).

Tabelle 6-12 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Versuchsnummer) für die abhängige Variable „Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert)“.

Tabelle 6-12: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Versuchsnummer) für den Verlaufseffekt bzw. den Verlauf der Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert)

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>e^b</i>
Intercept	4,51	0,13	34,53	<0,0001		91,27
Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern						
Sehr wenig	-0,11	0,14	-0,77	0,4473	0,12	0,90
Wenig	-0,31	0,15	-2,12	0,0399	0,31	0,74
Mittel	-0,38	0,14	-2,66	0,0110	0,38	0,69
Viel	-0,39	0,14	-2,77	0,0084	0,39	0,68
Sehr viel	-0,26	0,22	-1,18	0,2446	0,18	0,76
HMI (orthogonale Kontraste)						
MZ vs. NZ	-0,14	0,01	-16,73	<0,0001	0,87	0,86
RO vs. ZO	0,04	0,01	2,77	0,0067	0,27	1,04
Versuchsnr.						
	-0,04	0,01	-15,08	<0,0001	0,38	0,96

Bei der Vorerfahrung mit Computerspiel-Controllern haben die Niveaus „wenig“, „mittel“ und „viel“ einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable, mit mittlerer bis großer Effektstärke. Der orthogonale Kontrast MZ vs. NZ zeigt (analog zu H_{1-1}), dass die Reduktion der Zeit zur Aufgabenerfüllung durch die nutzerzentrierten HMIs signifikant ist und eine sehr hohe Effektstärke aufweist. Der Kontrast RO vs. ZO ist ebenfalls signifikant, mit mittlerer Effektstärke und zugunsten des richtungsorientierten HMI. Die Versuchsnummer als Indikator für den Verlauf der Zeit zur Aufgabenerfüllung hat auch einen signifikanten Einfluss, mit mittlerer bis großer Effektstärke: der explorativ beobachtete Verlaufseffekt ist signifikant.

6.4 Diskussion der Laborstudien-Ergebnisse

6.4.1 Maschinenzentriertes und nutzerzentrierte HMIs im Vergleich

Der Vergleich des maschinenzentrierten HMI mit den beiden nutzerzentrierten HMIs fällt eindeutig aus. Alle vier untersuchten Leistungsmetriken zeigen, dass sich die Leistung des Bedieners durch die nutzerzentrierten HMIs signifikant verbessert, sowohl im Bezug auf die Effektivität (Zeit) als auch auf die Effizienz (Fehler). Die Analyse des mittleren Pupillendurchmessers zeigt eine signifikante Reduktion der mentalen Beanspruchung des Bedieners bei Verwendung der nutzerzentrierten HMIs. Obwohl nur die Daten von $n = 17$ Teilnehmern in die Analyse dieser Hypothese einbezogen werden konnten, ist die Effektstärke des psychophysiologischen Effekts sehr hoch, so dass die beobachtete Signifikanz mit großer Wahrscheinlichkeit nicht durch die geringe Probandenzahl verzerrt ist. Die Teilnehmer geben dem maschinenzentrierten HMI auch signifikant höhere RTLX-Werte im Ver-

gleich zu den nutzerzentrierten HMIs. Die erwartete Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit durch den Einsatz der nutzerzentrierten HMIs wird auch durch die erhaltenen Daten unterstützt. Dies gilt sowohl für die Leistungsmetriken (Effizienz, Effektivität), als auch für die signifikant höheren SUS-Werte der nutzerzentrierten HMIs und damit für alle drei Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit.

Lediglich H_5 kann durch das Experiment nicht gestützt werden. Dies überrascht, weil sich beim maschinenzentrierten HMI die Zuordnungen zwischen den Steuerungseingaben und den Lastbewegungen im Referenzsystem des Bedieners mit jeder Position ändern. Bei den nutzerzentrierten HMIs ist dieser Effekt nicht vorhanden, da der Kran die Lastbewegungen basierend auf der Position des Bedieners anpasst, um kompatible Mappings zu gewährleisten. Die Datenanalyse zeigt jedoch keine Wechselwirkung zwischen dem angewandten HMI-Konzept und dem Wechsel der Bedienerposition in aufeinanderfolgenden Versuchen. Es gibt mehrere mögliche Erklärungen für das Ausbleiben des erwarteten Effekts. Vor allem ist zu beachten, dass sich die Startplattform und die Zielplattform in vier der fünf Start-Ziel-Positionspaarungen auf gegenüberliegenden Seiten des Krans befanden. Daher musste der Kran in den meisten Versuchen um fast 180° gedreht werden, was zu den gleichen Änderungen der Zuordnungen zwischen Steuereingaben und Lastbewegungen führte, wie sie durch die beiden unterschiedlichen Bedienerpositionen verursacht wurden. Es ist daher wahrscheinlich, dass die verwendeten Versuchskonfigurationen den Effekt der Beeinflussung dieser Mappings durch die Änderung der Bedienerposition über die Versuche verschleiern haben. In zukünftigen Studien sollte bei der Aufgabengestaltung darauf geachtet werden, kurze und lange Lastbewegungspfade abzubilden, um den Effekt weiter zu untersuchen.

Unter Berücksichtigung aller erhaltenen Ergebnisse liefert das Experiment starke Belege dafür, dass die nutzerzentrierten HMIs zu einer geringeren mentalen Beanspruchung sowie einer höheren Gebrauchstauglichkeit führen als das traditionelle maschinenzentrierte HMI. Da insbesondere die Verringerung der mentalen Beanspruchung mit signifikanten Verbesserungen der Bedienerleistung verbunden ist, kann gefolgert werden, dass sich die Teilnehmer bei der Verwendung des maschinenzentrierten HMI im Überlastbereich der mentalen Beanspruchung befinden. Die Reduktion der mentalen Beanspruchung im Bereich der Überforderung ist entscheidend, um die Effektivität, Effizienz und Sicherheit der Mensch-Maschine-Interaktion zu gewährleisten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es während des Experiments kaum zusätzliche externe Anforderungen gegeben hat, da es in einer ruhigen Umgebung durchgeführt wurde und kein Zeitdruck bestand. Da sich zusätzliche Anforderungen im Überlastbereich zunehmend nachteilig auf die Leistung des Bedieners auswirken, ist darüber hinaus zu erwarten, dass der Leistungsunterschied zwischen den nutzerzentrierten HMIs und dem maschinenzentrierten HMI in realen Anwendungen weiter wachsen wird. Somit liefern die Ergebnisse des Experiments eine starke empirische Grund-

lage für den Austausch des traditionellen maschinenzentrierten HMI als Standard-HMI für den Kranbetrieb durch ein nutzerzentriertes HMI.

Abschließend ist wichtig zu betonen, dass das Experiment die HMIs an Teilnehmern mit wenig oder keiner Vorerfahrung bei der Kranbedienung untersucht. Dieser Ansatz wird gewählt, da auf Basis des Gestaltungsrahmens abgeleitet wird, dass eine reduzierte mentale Beanspruchung auftritt, weil die Interaktion intuitiver ist. Wenn die nutzerzentrierten HMIs die Bildung von kompatiblen Task-Action-Mappings unterstützen, die auf sensomotorischem Wissen beruhen, können die Bediener diese Zuordnungen anwenden, ohne in der Vergangenheit einen Kran gesteuert zu haben. Im Gegensatz dazu müssen die Task-Action-Mappings für das maschinenzentrierte HMI, die auf Expertenwissen basieren, von unerfahrenen Kranführern eingeübt werden. Diese Annahme wird durch das Experiment unterstützt, da die Teilnehmer Probleme zeigen, die Mappings für das maschinenzentrierte HMI zu kodieren und sicher abzurufen, demgegenüber aber keine Probleme hatten, die Mappings für die beiden nutzerzentrierten HMIs anzuwenden. Das bedeutet aber auch, dass bei der Überprüfung der Hypothesen mit einer Stichprobe von erfahrenen Kranführern andere Ergebnisse zu erwarten sind. Insbesondere wäre interessant gewesen, ob sich die Ergebnisse bezüglich der Hypothese H_5 zwischen Novizen und Experten unterscheiden. Dies sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass auch geübte Bediener nach einer Anfangsphase, in der sie ihre etablierten Task-Action-Mappings für die Kranbedienung an die kompatiblen Task-Action-Mappings der nutzerzentrierten HMIs anpassen, von den nutzerzentrierten HMIs profitieren. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass, selbst wenn die Leistungsdefizite des maschinenzentrierten HMI durch ausreichende Übung kompensiert werden können, die nutzerzentrierten HMIs immer noch eine geringere mentale Beanspruchung verursachen, die den freien Aufmerksamkeitsressourcen und dem Situationsbewusstsein des Bedieners zugute kommen. Schließlich wird erwartet, dass der Bediener in Situationen mit hoher mentaler Beanspruchung auf Interaktionsprinzipien zurückgreift, die auf niedrigeren Ebenen im Kontinuum des Wissens angesiedelt sind, weil sie häufiger kodiert und abgerufen werden und somit leichter zugänglich sind [Bla-2007]. Daher kann vermutet werden, dass die Expertise des Bedieners zwar das Ausmaß des erwarteten Nutzens der nutzerzentrierten HMIs im Vergleich zur maschinenzentrierten HMI beeinflusst, nicht aber dessen schiere Existenz. Dies sollte ebenfalls in zukünftigen Studien untersucht werden.

Kernaussagen: MZ vs. NZ

1. Das maschinenzentrierte HMI führt zu einer mentalen Überbeanspruchung.
2. Die nutzerzentrierten HMIs reduzieren die mentale Beanspruchung.
3. Die Reduktion der mentalen Beanspruchung durch nutzerzentrierte HMIs zur Kransteuerung führt zu einer verbesserten Leistung, erhöhter Gebrauchstauglichkeit und ist das Ergebnis erhöhter Intuitivität.

6.4.2 Richtungs- und zielorientiertes HMI im Vergleich

Das Experiment liefert auch eindeutige Ergebnisse für den Vergleich des richtungsorientierten- und des zielorientierten HMI hinsichtlich der mentalen Beanspruchung. Die psychophysiologische Bewertung der Bedienerbelastung zeigt eine signifikante Reduktion der mittleren Pupillendurchmesser der Teilnehmer für das zielorientierte HMI und damit eine Reduktion der mentalen Beanspruchung. Die nicht-parametrische Analyse der RTLX-Scores ergibt jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden nutzerzentrierten HMIs. Allerdings wird die statistische Aussagekraft der Analyse durch die Anwendung eines nicht-parametrischen Tests und der konservativen Bonferroni-Korrektur zur Kontrolle der Typ-I-Fehlerrate reduziert. Kombiniert man die Evidenz sowohl der psychophysiologischen als auch der subjektiven Messung, besteht Grund zur Annahme, dass das zielorientierte HMI eine weitere Reduktion der mentalen Beanspruchung des Bedieners im Vergleich zum richtungsorientierten HMI bewirkt. Darüber hinaus ist der Effekt der beiden nutzerzentrierten HMIs auf die Leistung des Bedieners mehrdeutig. Einerseits zeigt das richtungsorientierte HMI eine höhere Zeiteffizienz durch eine signifikante Reduktion der durchschnittlichen Zeit zur Aufgabenerfüllung im Vergleich zum zielorientierten HMI. Andererseits sind die Gesamtstrecke der Bewegung des TCP und die Zeit, in der der TCP in die falsche Richtung bewegt wird, beim zielorientierten HMI geringer. Schließlich unterschieden sich die beiden HMIs nicht in ihrer Wirkung auf die Anzahl der Kollisionen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beide nutzerzentrierten HMIs Leistungsvorteile in Metriken aufweisen, die ihren jeweiligen Stärken entsprechen. Es kann nicht eindeutig ein nutzerzentriertes HMI favorisiert werden. Dies wird auch dadurch unterstrichen, dass die beiden HMIs nahezu identische SUS-Scores von etwa 82 (Mittelwert) erhalten. Aus den Beobachtungen lässt sich ableiten, dass beide HMIs zu mentalen Beanspruchungen im Bereich der Kapazitätsreserven führen. Während die kompatiblen Task-Action-Mappings des richtungsorientierten HMI ausreichen, um die mentale Beanspruchung des Bedieners aus dem Überlastbereich in den Bereich der Kapazitätsreserve zu reduzieren, wird die mentale Beanspruchung des Bedieners durch den höheren Automatisierungsgrad des zielorientierten HMI noch weiter reduziert (Pupillendurchmesser, RTLX). Gleichzeitig ist nicht erkennbar, dass dies zu einer signifikanten Verbesserung der Primäraufgabenleistung führt, was ein Indiz für eine mentale Unterbeanspruchung sein kann. Ob das zielorientierte HMI tatsächlich mentale Unterbeanspruchung verursacht, kann mit dem durchgeführten Experiment nicht abschließend beurteilt werden. Daher liefert das Experiment nur subjektive Hinweise, wie z. B. die Einschätzung eines Teilnehmers, der das zielorientierte HMI als zu monoton empfindet. Folglich ist eine Langzeitbeurteilung von Bedienern erforderlich, die das zielorientierte HMI verwenden, um die Gefahr der Unterbeanspruchung zu bewerten.

Kernaussagen: RO vs. ZO

1. Die nutzerzentrierten HMIs führen zu mentalen Beanspruchungen im Bereich der Kapazitätsreserve.
2. Das zielorientierte HMI bewirkt eine Reduktion der mentalen Beanspruchung des Bedieners im Vergleich zum richtungsorientierten HMI.
3. Diese Reduktion führt im Vergleich zum richtungsorientierten HMI nicht zu einer verbesserten Bedienleistung.
4. Bediener, welche das zielorientierte HMI verwenden, sind stärker der Gefahr der Unterbeanspruchung ausgesetzt.

6.4.3 Limitationen

Das Experiment untersucht, ob die mentale Beanspruchung der Teilnehmer reduziert wird, und nicht, ob dieser Effekt tatsächlich durch die Unterschiede in den Task-Action-Mappings verursacht wird. Die Schlussfolgerung, dass die unterschiedlichen Task-Action-Mappings für die beobachtete Reduktion der mentalen Beanspruchung verantwortlich ist, ist jedoch plausibel, da die HMIs mit identischen Eingabegeräten und Aufgabenbedingungen verglichen werden. Gegenstand der Studie ist der Vergleich von drei grundlegenden Interaktionskonzepten und nicht von unterschiedlichen Implementierungen, z. B. durch die Verwendung verschiedener Eingabegeräte. Solange jedoch die verwendeten Eingabegeräte den Prinzipien der Kompatibilität folgen, die als Grundlage für die Erleichterung intuitiver Interaktionen mit den HMIs eingeführt wurden, kann die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Implementierungen angenommen werden.

Die wichtigsten Einschränkungen des methodischen Ansatzes werden dadurch verursacht, dass das Experiment mit einer Computersimulation und nicht mit einem echten Kran durchgeführt wird. Den Kran auf einem 2D-Fernsehbildschirm zu sehen könnte das räumliche Sehen der Teilnehmer beeinträchtigt haben, das für die Positionierung der Last entscheidend ist. Außerdem ist die Simulation der Lastpendelung nur eine Annäherung an den realen Prozess. Zusätzlich beeinflusst die Art und Weise, wie die Last auf den Kontakt mit der Zielplattform reagiert, wie schnell die Teilnehmer in der Lage sind, die Last genau zu platzieren. In Bezug auf den Lichtpunkt war das Tracking des Oculus Touch Controllers mit Ungenauigkeiten behaftet und die Sichtbarkeit des Lichtpunkts musste einem realen Lichtpunkt nach Gefühl angenähert werden.

Merkmale der Kranbewegung, die die Leistungsmetriken beeinflussen, sind die definierte Maximalgeschwindigkeit für die beiden Kranmodelle und die Funktionsweise der inversen Kinematik. Da sich die Bewegungsachsen für das maschinenzentrierte HMI und die nutzerzentrierten HMIs grundlegend unterscheiden, war es nicht möglich, äquivalente Maximalgeschwindigkeiten für die beiden Kranmodelle zu definieren. Daher sind die Ergebnisse

für die Zeit zur Aufgabenerfüllung mit Vorsicht zu interpretieren. Allerdings sind die Unterschiede in der Zeit zur Aufgabenerfüllung zwischen dem maschinenzentrierten HMI und den nutzerzentrierten HMIs so groß, dass es unwahrscheinlich ist, dass diese nur durch vergleichsweise geringe Unterschiede in der Maximalgeschwindigkeit verursacht werden. Die meisten Kollisionen mit den nutzerzentrierten HMIs traten auf, wenn die Last nahe an der Kransäule und hoch über dem Boden positioniert war. Aufgrund der angewandten inversen Kinematik steht der Teleskopausleger in diesen Situationen aufrecht, wodurch die Last dagegenschlägt. Dies könnte durch den Einsatz einer anderen inversen Kinematik leicht verhindert werden.

Die Verwendung einer Computersimulation beeinflusst auch wie die Teilnehmer die Aufgabe wahrnehmen. Es ist anzunehmen, dass die Teilnehmer in der Simulation eher Kollisionen in Kauf nehmen als in einem realen Szenario. Dies könnte dazu beigetragen haben, dass die Teilnehmer ihr subjektives Leistungskriterium zur Vermeidung von Kollisionen bei der Verwendung des maschinenzentrierten HMI herabgesetzt haben. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die subjektiven Bewertungen der Teilnehmer für einzelne Systeme durch die präsentierten Referenzsysteme beeinflusst werden. Das bedeutet, dass die außergewöhnlich niedrigen SUS-Werte und die hohen RTLX-Werte für das maschinenzentrierte HMI durch die beiden nutzerzentrierten HMIs mit geringerer mentaler Beanspruchung beeinflusst worden sein könnten und umgekehrt. Dies negiert zwar nicht die beobachteten Unterschiede zwischen den evaluierten HMIs, beeinträchtigt aber die Vergleichbarkeit der subjektiven Bewertungen mit Bewertungen aus anderen Studien. Schließlich hängen die Ergebnisse des Experiments von den verwendeten Versuchskonfigurationen ab. In allen Konfigurationen des Experiments mussten die Teilnehmer die Last über oder um eine Barriere bewegen und auf einer Zielplattform positionieren. Die Präzision, die für die Platzierung der Last erforderlich ist, wurde willkürlich festgelegt. Die Teilnehmer hatten auch nicht die Möglichkeit, ihre Position zu verändern, wie es bei der Verwendung einer Funksteuerung normalerweise der Fall wäre.

Ein wichtiger Aspekt ist, dass in der Studie ein Ladekran mit vier DOFs verwendet wurde. Es wird vermutet, dass die Leistung der Bediener mit dem maschinenzentrierten HMI stark von der Anzahl der DOFs beeinflusst wird, wobei mehr DOFs die Leistung verschlechtern.

Das Experiment untersuchte auch nicht den Einfluss von externen Anforderungen wie Lärm, Zeitdruck und Nebenaufgaben. Diese Faktoren müssen, wenn sie in relevanten Anwendungsfällen vorhanden sind, berücksichtigt werden, da sie die mentale Beanspruchung des Bedieners beeinflussen.

Neben den Einschränkungen, die sich aus dem Versuchsaufbau ergeben, müssen auch Einschränkungen berücksichtigt werden, die sich aus den gewählten Maßen zur Bestimmung der mentalen Beanspruchung ergeben. Es besteht bei der Messung desselben Konstrukts mit unterschiedlichen Methoden eine erhebliche Wahrscheinlichkeit, dass verschie-

dene Maße der mentalen Beanspruchung unterschiedliche Ergebnisse liefern. Mit den psychophysiologischen Effekten der Pupillenerweiterung und der subjektiven Messung über den RTLX werden jedoch zwei gründlich untersuchte Verfahren verwendet, deren Validität in der Literatur schlüssig belegt ist. Es ist daher davon auszugehen, dass die Ergebnisse durch die verwendeten Verfahren gut fundiert sind.

6.5 Beantwortung der Forschungsfrage 2

Durch einen Vergleich der nutzerzentrierten HMIs mit den Prinzipien des Gestaltungsrahmens (vgl. Tabelle 5-1) wurde für beide nutzerzentrierten HMIs eine Verringerung der mentalen Beanspruchung sowie eine erhöhte Gebrauchstauglichkeit antizipiert. Diese Annahmen werden durch das Laborexperiment unterstützt, das eine verbesserte Bedienerleistung, eine verringerte mentale Beanspruchung des Bedieners (sowohl objektiv als auch subjektiv) und eine höhere Gebrauchstauglichkeit für die beiden nutzerzentrierten HMIs im Vergleich zum traditionellen maschinenzentrierten HMI zeigt. Daraus folgt unmittelbar, dass der Status Quo im Bereich Kransteuerungen durch die Entwicklung intuitiver Steuerungskonzepte für Lasthebemaschinen nach einem nutzerzentrierten Designansatz verbessert werden kann. Basierend auf der Analyse und den Ergebnissen des durchgeführten Experiments wird die Anwendung der beiden nutzerzentrierten HMIs anstelle des traditionellen maschinenzentrierten HMI als klar vorteilhaft beurteilt. Forschungsfrage 2 gilt somit als beantwortet.

Da insbesondere die Verringerung der mentalen Beanspruchung als direkte Konsequenz einer erhöhten Intuitivität betrachtet werden kann, wird geschlussfolgert, dass die nutzerzentrierten HMIs in ihrer Verwendung intuitiver sind. Die bei der Entwicklung des Gestaltungsrahmens dargestellten Sekundäreffekte durch eine erhöhte Intuitivität können folglich angenommen werden:

- Aktivierung niedrigerer Ebenen im Kontinuum des Wissens
- Vereinfachtes Erlernen der Interaktion
- Fokus auf Aufgabe statt auf HMI
- Förderung von regel- und fertigkeitbasiertem Verhalten

In weiterer Folge stützen die Ergebnisse der Studie die drei entwickelten Gestaltungsrichtlinien, welche die Grundlage für den Gestaltungsrahmen bilden:

1. Aufgabenorientierte (d. h. lastorientierte) Steuerung: Direkte Vorgabe der gewünschten Lastbewegung durch den Bediener zur Unterstützung von Task-Action-Mappings als mentalem Modell.
2. Kompatibilität zwischen Bedienereingabe (gewünschte Lastbewegung) und Systemausgabe (tatsächliche Lastbewegung), um die Bildung *kompatibler* Task-Action-Mappings zu fördern

3. Gezielte Automatisierung mit Hilfe von rechnergestützten Assistenzfunktionen

Die Studie belegt somit nicht nur die erwarteten messbaren Effekte einer erhöhten Intuitivität, sondern liefert gleichzeitig eindeutige Belege für die Validität des entwickelten Gestaltungsrahmens (Verifikation) und somit – über die Beantwortung von Forschungsfrage 2 hinaus – weitere Unterstützung für die Antwort auf Forschungsfrage 1 aus dem vorangegangenen Kapitel.

Welches der beiden nutzerzentrierten Konzepte besser abschneidet, kann nicht eindeutig gefolgert werden. Abhängig vom Anwendungsfall, der Aufgabe und den gewählten Randbedingungen haben beide Konzepte spezifische Vorteile und schneiden bei verschiedenen Metriken unterschiedlich gut ab. Insbesondere kommt die Frage auf, ob die weitere Reduktion der mentalen Beanspruchung durch das zielorientierte HMI vorteilhaft ist oder ob sich die Wahrscheinlichkeit der mentalen Unterbeanspruchung erhöht. Zudem ist wichtig zu bedenken, dass einige der von den Probanden genannten Nachteile des zielorientierten HMI, wie z. B. die Sichtbarkeit des Lichtpunkts, auch bei der Implementierung an einem realen Kran zu unerwünschten Effekten für den Bediener führen können, je nachdem wie die konkrete Implementierung aussieht. Das zielorientierte HMI wird nur dann zu einer sinnvollen Alternative, wenn es so implementiert werden kann, dass die Herausforderungen überwunden werden, die bereits im Rahmen der VR-Studie von den Probanden wahrgenommen werden.

Beide nutzerzentrierten HMIs bieten jedoch großes Potenzial, und werden daher in den nachfolgenden Kapiteln an einem realen Kran appliziert, um weitere Untersuchungen durchführen zu können. Wenn beide nutzerzentrierten HMIs an einem realen Kransystem implementiert und funktionsfähig sind (Ziel: Beantwortung von Forschungsfrage 3), sollte durch ein geeignetes Experiment untersucht werden, ob die abgeleiteten Schlussfolgerungen auch außerhalb der Laborumgebung gelten (Ziel: Beantwortung von Forschungsfrage 4). Dort werden dann zum Vergleich auch erfahrene Kranführer in die Probandengruppe eingeschlossen, was insbesondere weitere Rückschlüsse auf die Bildung von kompatiblen Task-Action-Mappings ermöglicht, wenn Experten mit bereits vorhandenem Modell mit Novizen ohne mentalem Modell zur Kransteuerung verglichen werden.

7 Nutzungskontext: Ladekran mit Auslegerspitzensteuerung

Der Gestaltungsprozess sieht als nächsten Schritt eine iterative Schleife zur konkreten „Ausarbeitung der Gestaltungslösungen“ vor, damit sich die Gestaltungslösungen im Nutzungskontext des durchzuführenden Prozesses (im vorliegenden Fall: Bewegung einer Last an einem realen Kran) evaluieren lassen. Hierfür wird zunächst der Nutzungskontext beschrieben. Anschließend wird ein Steuerungs- und Regelungskonzept mit Auslegerspitzensteuerung vorgestellt, das für die reale Umsetzung der nutzerzentrierten HMIs an einem echten Kran notwendig ist.

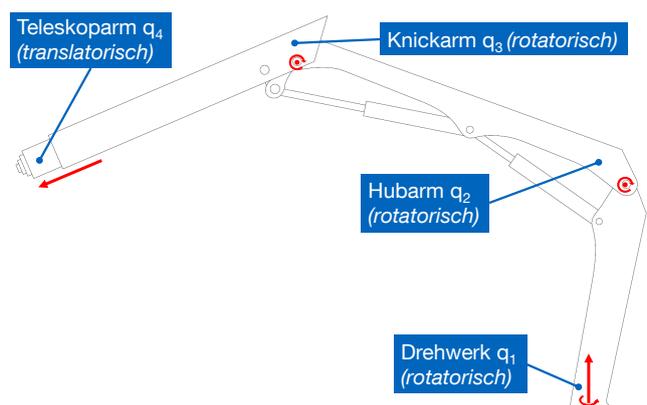
Inhalte dieses Kapitels wurden vom Autor bereits im Rahmen von [Fot-2020; Top-2019b] vorveröffentlicht.

7.1 Systembeschreibung

Die entwickelten Steuerungskonzepte werden an einem stationären Ladekran am Campus Garching der Technischen Universität München appliziert¹². Der hydraulisch angetriebene Palfinger PK 7.501 SLD 5 wurde im Jahr 2018 gebaut. Er befindet sich auf der Versuchs-Freifläche des Lehrstuhls fml und ist dort stationär auf einer Stahlkonsole montiert (siehe Abbildung 7-1a).



(a) Foto des Demonstrator-Ladekrans



(b) Zeichnerische Darstellung inkl. Markierung der DOFs

Abbildung 7-1: Nutzungskontext: Ladekran

¹²Alle vorgestellten HMIs sind weder vom Krantyp noch von einer bestimmten Zahl von DOFs am Kran abhängig. Die HMIs sind daher nicht an die Gestaltung des Krans gebunden, und damit beliebig auf andere Krane und andere Krananwendungen übertragbar.

Er besitzt vier DOFs: Drei rotatorische Gelenke (Drehwerk q_1 , Hubarm q_2 , Knickarm q_3) sowie ein translatorisches Gelenk (Teleskoparm q_4). Die Position der Gelenke ist in Abbildung 7-1b dargestellt. Der Ladekran besitzt eine maximale Ausladung von 11,1 m und ist um 360° schwenkbar. Die Steuerung erfolgt serienmäßig durch ein maschinenzentriertes HMI mit Joysticks oder Linearhebeln.

Der Ladekran ist in der Mitte einer quadratischen betonierten Fläche aufgestellt (ca. $25\text{ m} \times 25\text{ m}$). Um die Betonfläche herum befinden sich Prüfstandsgebäude mit Blech-Außenwänden, eine asphaltierte Straße sowie ein gemauertes Bürogebäude und ein kleiner Grünstreifen. Mit auf der Betonfläche befinden sich ein Büro- und Werkstattcontainer sowie einige Zeltaufbauten. Es handelt sich somit um eine industrienaher Mischumgebung, wie sie in vielen Industriegebieten oder in der Umgebung vieler Baustellen vorkommt.

Ein Hydraulikaggregat versorgt die Hydraulikzylinder zur Bewegung der Freiheitsgrade des Krans mit hydraulischer Leistung. Die Regelung der hydraulischen Leistung erfolgt durch einen Steuerblock mit vier Ventilen, wobei jedes Ventil einem Freiheitsgrad zugeordnet ist: Ein Öffnen des Ventils ergibt einen Volumenstrom in den entsprechenden Hydraulikzylinder, der in einer Zylinderbewegung und damit der entsprechenden Gelenkbewegung resultiert. Die Auslenkung der Hebel an der serienmäßigen maschinenzentrierten Linearhebel-Funksteuerung korreliert dabei mit der Ventilöffnung und somit mit der gewünschten Bewegungsgeschwindigkeit und -richtung des jeweiligen Freiheitsgrads. Die Hebelauslenkungen werden mit Hilfe von Potentiometern erfasst und an die Funksendeeinheit übergeben. Von dort werden die Steuersignale drahtlos an den Funkempfänger übertragen. Der Funkempfänger gibt die Bewegungssignale aller DOFs über ein internes Kommunikationsprotokoll an die Ventilsteuerung weiter. Die Ansteuerung der Ventile durch die Ventilsteuerung erfolgt elektrisch über ein Mittelspannungs-Steuersignal. Der Ventilsteuerung ist die kraninterne Überwachungslogik vorgeschaltet. Sie greift bei Fehlern innerhalb der Steuerung ein, indem alle Ventile drucklos geschaltet werden, so dass keine Kranbewegung mehr möglich ist. Drehgelenk-Sensoren geben die Stellung der Krangelenke q_1 , q_2 , q_3 über das Bus-Protokoll CANopen-Safety¹³ aus. Um im Steuergerät die aktuelle Position des Hakens bzw. der Last berechnen zu können, wird zusätzlich der Teleskoparm des Krans mit einem Längenmesser ausgestattet. Auch dieser Sensor ist über CANopen-Safety an das Steuergerät angebunden.

Zusätzlich zum Serienzustand des Ladekrans werden für die Implementierung der nutzerzentrierten HMIs einige Modifikationen durchgeführt. Der Anschluss der nutzerzentrierten HMIs an die Steuerung des Ladekrans erfolgt über den Funkempfänger. Zu diesem Zweck wird die serienmäßige Funkverbindung dekodiert und in der Folge durch ein Steuergerät

¹³Das CANopen-Safety-Protokoll ist als europäische Norm EN 50325-5 veröffentlicht. Es handelt sich um eine Erweiterung der CANopen-Norm EN 50325-4. CANopen-Safety ermöglicht eine sicherheitsgerichtete Datenübertragung, ist für sicherheitskritische Anwendungen bis Level 3 zertifiziert und ist ein bei mobilen Arbeitsmaschinen bewährtes Bus-Protokoll.

für die nutzerzentrierten HMIs imitiert. Das Steuergerät, das den Bedienerwunsch in die entsprechenden Einzelbewegungen der Krangelenke umwandelt sowie die inverse Kinematik inkl. Regelung der DOFs übernimmt (siehe Abschnitt 7.3), gibt die Steuersignale für die DOFs in der gleichen Form aus wie die serienmäßige maschinenzentrierte Steuerung. Über einen Auswahlschalter kann eine Steuerung vorgewählt werden, so dass immer nur eine Steuerung gleichzeitig zu einer Kranbewegung führen kann.

Der Anschluss der Eingabegeräte an das Steuergerät für die nutzerzentrierten HMIs erfolgt ebenfalls über das Kommunikationsprotokoll CANopen-Safety. Die Standardisierung der Kommunikation ermöglicht eine einfache Übertragung der Steuerungskonzepte auf andere Krantypen und gleichzeitig eine einfache Einbindung der Gelenksensoren, die auch mit diesem Protokoll arbeiten.

7.2 Messung der Hakenposition

Die aktuelle Hakenposition lässt sich mit Hilfe der Gelenkstellungen aller Kran-DOFs über die kinematische Kette ermitteln. Hierzu besitzt jedes Gelenk einen eigenen Sensor. Im Fall der rotatorischen DOFs q_1 , q_2 und q_3 handelt es sich dabei um in den Drehgelenken verbaute inkrementelle Drehgeber. Beim Teleskopausschub q_4 kommt ein Seilzugsensor für Mobilhydraulikanwendungen zur Längenmessung zum Einsatz. Abbildung 7-2 zeigt eine Skizze der geometrischen Zusammenhänge.

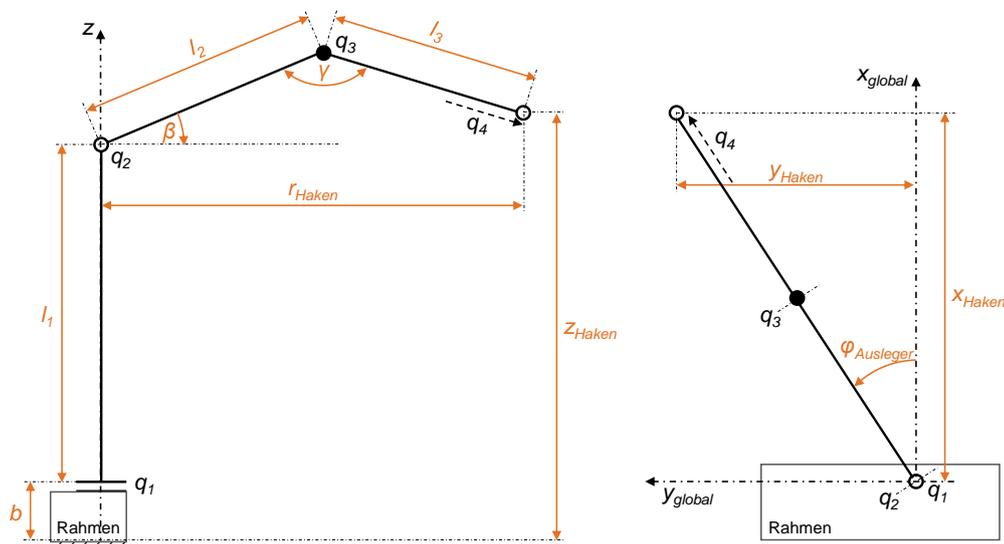


Abbildung 7-2: Geometrische Zusammenhänge für die Bestimmung der Hakenposition (Skizze): Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts)

Die Größen $\varphi_{\text{Ausleger}}$, β , γ sowie l_3 sind veränderliche Größen im Rahmen der Gelenkbewegungen. Alle anderen Größen sind unveränderlich und ergeben sich aus der Krangeometrie. Der Abstand a beschreibt die Höhe des Krandrehpunktes über dem Boden. Die

Messung des Drehwinkels $\varphi_{Ausleger}$ erfolgt von der x-Achse aus, die senkrecht auf dem Montagerahmen des Krans steht. Es ergeben sich folgende Formeln zur Berechnung der Hakenposition:

$$r_{Haken} = \cos \beta \cdot l_2 + \sin (\gamma - (90^\circ - \beta)) \cdot l_3, \quad (7-2)$$

$$z_{Haken} = \sin \beta \cdot l_2 - \cos (\gamma - (90^\circ - \beta)) \cdot l_3 + a + l_1, \quad (7-3)$$

$$x_{Haken} = \sin \varphi_{Ausleger} \cdot r_{Haken}, \quad (7-4)$$

$$y_{Haken} = \cos \varphi_{Ausleger} \cdot r_{Haken}. \quad (7-5)$$

Die Messgenauigkeit der Gelenksensoren wurde in [Meu-2018] untersucht. Die Abweichungen der gemessenen Stellungen im Vergleich zur Realposition bewegen sich deutlich unter 1 % für q_1 und q_4 sowie maximal bis 2,8 % bei q_2 und q_3 und ergeben sich aus einer Kombination von Gelenkspiel und elastischen Gelenkverformungen am Demonstrator-Kran. Diese Genauigkeitsfehler sind im Vergleich zu den im Betrieb auftretenden elastischen Verformungen des Krantragwerks klein, die sich bei maximaler Tragwerksbelastung auf 5 – 15 % belaufen. Die Genauigkeit der Gelenkmessungen und damit die Genauigkeit der Hakenpositionsberechnung werden folglich als hinreichend beurteilt.

7.3 Auslegerspitzensteuerung und Regelungskonzept

Bei der Entwicklung der Gestaltungsrichtlinien wurde der Einsatz einer Auslegerspitzensteuerung als zentrales Werkzeug für die Umsetzung von nutzerzentrierten Kransteuerungen identifiziert. Es existieren in der Literatur bereits vielfältige Ansätze zur Implementierung von Auslegerspitzensteuerungen (vgl. Abschnitt 3.4.6). Für den vorliegenden Nutzungskontext am Ladekran wird daher ein bestehendes Konzept zur Auslegerspitzensteuerung aus der Robotik [Fah-2009] übernommen und für die Verwendung am Ladekran adaptiert und parametrisiert. Die Auslegerspitzensteuerung besteht aus einer inversen Kinematik zur Umrechnung von der gewünschten Hakenbewegung auf die entsprechenden Gelenkbewegungen (Steuerung), und einem Regelungskonzept, um die Krangelenke exakt ansteuern zu können und auf durch Störungen verursachte Abweichungen zu reagieren (Regelung).

Die technische Umsetzung der Auslegerspitzensteuerung wurde vom Autor bereits im Rahmen von [Top-2019b] und [Fot-2020] veröffentlicht. Die Auslegerspitzensteuerung kommt sowohl für die Implementierung des zielorientierten als auch des richtungsorientierten HMI zum Einsatz.

7.3.1 Steuerung: Inverse Kinematik

Der Ladekran besitzt vier DOFs (q_1 bis q_4), mit deren Hilfe der Haken in drei Raumrichtungen x, y, z bewegt werden kann. Somit handelt es sich um einen geometrisch redundanten Manipulator, wobei für eine gewünschte Hakenbewegung theoretisch unendlich viele verschiedene Einzellösungen aus Gelenkbewegungen existieren. Die inverse Kinematik hat somit nicht nur die Aufgabe sicherzustellen, dass sich alle Gelenke so bewegen, dass in Summe die gewünschte Hakenbewegung resultiert. Zusätzlich muss sie in der Lage sein, aus allen hierfür möglichen Lösungen die optimalen Gelenkbewegungen auszuwählen.

Im Folgenden werden Hakenposition und -geschwindigkeit als \mathbf{h} und $\dot{\mathbf{h}}$ bezeichnet. Es gilt $\mathbf{h}, \dot{\mathbf{h}} \in \mathbb{R}^3$. Ferner werden die Gelenkgeschwindigkeiten \dot{q}_1 bis \dot{q}_4 als Vektor geschrieben:

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 & \dot{q}_2 & \dot{q}_3 & \dot{q}_4 \end{pmatrix}^T. \quad (7-6)$$

Anforderungen an die inverse Kinematik

Mit Hilfe der inversen Kinematik wird somit eine Lösung für die Frage gesucht, welche Gelenkbewegungen in Summe zur gewünschten Hakenbewegungen führen, so dass gilt:

$$\dot{\mathbf{h}} = \begin{pmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \end{pmatrix}^T = \mathbf{J}_e \dot{\mathbf{q}}. \quad (7-7)$$

Die Jacobi-Matrix \mathbf{J}_e beschreibt die Beziehung zwischen den Gelenkgeschwindigkeiten und der Hakenbewegungsgeschwindigkeit:

$$\mathbf{J}_e = \begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{h}}{d\mathbf{q}} \end{bmatrix}. \quad (7-8)$$

Eine Übersicht über unterschiedliche Ansätze für inverse Kinematiken, die die Gleichung (7-7) lösen, findet sich in [Sic-1990].

Die für den Ladekran verwendete inverse Kinematik soll folgende weitere Anforderungen erfüllen:

1. Gelenkbegrenzungen der Kran-DOFs sollen möglichst vermieden werden, um zu jedem Zeitpunkt eine möglichst große Beweglichkeit sicherzustellen. Die inverse Kinematik soll daher Gelenkbewegungen nachteilig beaufschlagen, die zu einer Annäherung an die Gelenkbegrenzung führen.
2. Die inverse Kinematik soll Bewegungen von q_2 und q_3 gegenüber q_4 bevorzugen, da Untersuchungen am Ladekran zeigen, dass q_2 und q_3 deutlich höhere Bewegungsgeschwindigkeiten ermöglichen als q_4 .
3. Um Schäden am Kran zu vermeiden, darf die inverse Kinematik nur zu begrenzten Gelenkgeschwindigkeiten führen. Die Grenze soll für jedes Gelenk einstellbar sein.

4. Die inverse Kinematik soll möglichst frei von Singularitäten im gesamten Arbeitsraum sein¹⁴. Es müssen stets sinnvolle Gelenkgeschwindigkeiten ausgegeben werden.
5. Die Berechnungen der inversen Kinematik müssen echtzeitfähig sein. Als erlaubte Latenzzeit wird die Zykluszeit des Kran-CAN-Bus (ca. 50 ms) definiert.

Auswahl einer Berechnungsstrategie

Es werden sechs Berechnungsstrategien aus [Sic-1990] betrachtet: *Pseudo-Inverse (PI)*, *Jacobian Transpose (JT)*, *Gradient Projection Method (GPM)*, *Weighed Pseudo-Inverse (WPI)*, *Dampened Least Squares (DLS)* und *Configuration Control (CC)*. Alle Ansätze liefern eine Lösung für Gleichung (7-7). In Tabelle 7-1 sind die Ansätze den weiteren Anforderungen gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass lediglich der Ansatz der CC alle Anforderungen erfüllt. Daher wird dieser Ansatz für die inverse Kinematik ausgewählt.

Tabelle 7-1: *Bewertung der Berechnungsstrategien im Hinblick auf die Anforderungen*

Anforderung	Vermeidung Grenzen	Bevorzugung q_2, q_3	Begrenzte Geschw.	keine Singularitäten	Echtzeitfähigkeit
Pseudo-Inverse	×	×	✓	×	✓
Jacobian Transponse	×	×	✓	×	✓
Gradient Projection Method	○	○	✓	✓	✓
Weighed Pseudo-Inverse	×	×	✓	✓	✓
Dampened Least Squares	×	×	✓	✓	✓
Configuration Control	✓	✓	✓	✓	✓

Legende: ✓ erfüllt, × nicht erfüllt, ○ teilw. erfüllbar

Modifizierte Configuration Control für den Ladekran

Eine mögliche Formulierung einer passenden CC für den Nutzungskontext am Ladekran wird in [Fah-2009] beschrieben. Zur Erfüllung der Zusatzanforderungen wird die dort gezeigte Berechnungsweise leicht modifiziert und lautet

$$\dot{\mathbf{q}} = \left(\mathbf{J}_e^T \mathbf{W}_e \mathbf{J}_e + \mathbf{J}_l^T \mathbf{W}_l \mathbf{J}_l + \mathbf{J}_p^T \mathbf{W}_p \mathbf{J}_p + \mathbf{W}_v \right)^{-1} \left(\mathbf{J}_e^T \mathbf{W}_e \dot{\mathbf{h}} \right), \quad (7-9)$$

¹⁴Als Singularitäten gelten Punkte, die der Kran mit dem Haken nicht anfahren oder von denen er nicht mehr wegfahren kann, weil sich keine gültigen Gelenkbewegungen berechnen lassen.

wobei mit den $n \times n$ Identitätsmatrizen \mathbf{I}_n folgende Zusammenhänge gelten:

$$\mathbf{W}_e = 30 \cdot \mathbf{I}_3, \quad (7-10)$$

$$\mathbf{J}_l = \mathbf{I}_4, \quad (7-11)$$

$$\mathbf{W}_v = 0,01 \cdot \mathbf{I}_4, \quad (7-12)$$

$$\mathbf{J}_p = \text{diag} \left(0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \right), \quad (7-13)$$

$$\mathbf{W}_p = \text{diag} \left(0 \quad 0,1 \quad 0,1 \quad 2 \right). \quad (7-14)$$

Unter Berücksichtigung der oberen \bar{q}_i und unteren \underline{q}_i Gelenkbegrenzungen und mit dem Performance-Kriterium $H(q)$

$$H(q) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4} \frac{(\bar{q}_i - \underline{q}_i)^2}{(\bar{q}_i - q_i)(q_i - \underline{q}_i)} \quad (7-15)$$

aus [Cha-1995] zur Beurteilung, ob eine Veränderung der aktuellen Gelenkposition q_i zu einer Annäherung oder Entfernung von den Gelenkgrenzen führt, ergibt sich mit Hilfe von

$$\omega_i = \begin{cases} 1 + \left| \frac{\partial H}{\partial q} \right|, & \text{wenn } \Delta \left| \frac{\partial H}{\partial q} \right| > 0 \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad (7-16)$$

zusätzlich noch \mathbf{W}_l :

$$\mathbf{W}_l = \text{diag} \left(\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4 \right). \quad (7-17)$$

Dabei beschreibt $\Delta \left| \frac{\partial H}{\partial q} \right|$ die Veränderung des Absolutwerts $\left| \frac{\partial H}{\partial q} \right|$ vom vorherigen zum aktuellen Zeitschritt und ist positiv, wenn sich das Gelenk in Richtung einer Gelenkbegrenzung bewegt, und negativ wenn es sich in Richtung der Gelenkmittelstellung bewegt. Eine Gelenkbewegung wird folglich nur nachteilig beaufschlagt, wenn sich ein Gelenk näher zur Gelenkbegrenzung bewegen möchte. Alle genannten numerischen Parameter wurden simulativ und iterativ bestimmt. Gleichung (7-9) ermöglicht somit die Berechnung der Gelenkgeschwindigkeiten \dot{q}_i bei Eingabe der gewünschten Hakenbewegung \dot{h} .

Validierung der inversen Kinematik

Der vorgestellte Berechnungsansatz für die inverse Kinematik wird simulativ validiert. Hierfür wird ein Simulationsmodell in MATLAB implementiert, das den Demonstrator-Ladekran mit seinen vier DOFs in Form von Balkenelementen und den Gelenkbegrenzungen zur Definition des Arbeitsraums abbildet. Die Länge und Beweglichkeit der Balkenelemente entspricht dabei den Gegebenheiten am realen Kran.

Zur Untersuchung der inversen Kinematik wird der Arbeitsraum punktförmig diskretisiert, in dem alle Krangelenke in Schritten von 5° (q_1, q_2, q_3) und 5 cm (q_4) in allen möglichen Kombinationen durch den Arbeitsraum bewegt werden. In der Simulation wird dann zunächst jeder Punkt im Arbeitsraum bezüglich seiner Erreichbarkeit mit der Auslegerspitze (Haken) untersucht. Im zweiten Schritt wird für jeden Punkt untersucht, ob sich sinnvolle Gelenkgeschwindigkeiten berechnen lassen, die eine Bewegung zu den jeweils benachbarten Punkten in alle Raumrichtungen ermöglichen. Werden beide Kriterien erfüllt, liefert die inverse Kinematik für den betrachteten Punkt sinnvolle Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Simulationsstudie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

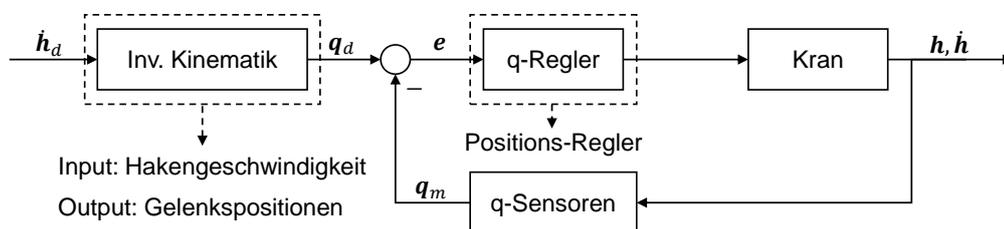
- Der ganze Arbeitsbereich (100 % der Punkte) kann mit Hilfe der inversen Kinematik erreicht werden. Es treten im Arbeitsbereich keine Singularitäten auf.
- Bei der Bewegung von einem Punkt zu einem beliebigen benachbarten Punkt kommt es im Mittel zu einer Abweichung von 4 % zwischen den durch die inverse Kinematik berechneten Gelenkgeschwindigkeiten und den ideal für die Punkt-zu-Punkt-Verbindung notwendigen Geschwindigkeiten. Diese Abweichung bewegt sich im Bereich der Regelbarkeit und ist daher hinnehmbar, sofern ein entsprechender Regler eingesetzt wird.
- Gelenkbegrenzungen werden in 100 % der Fälle vermieden.
- Bei 97,4 % der Bewegungen werden q_2 und q_3 gegenüber q_4 bevorzugt.
- Solange die eingegebene gewünschte Hakengeschwindigkeit \dot{h} begrenzt ist, werden auch nur begrenzte Gelenkgeschwindigkeiten ausgegeben. Geschwindigkeiten, die zu Schäden am Kran führen, werden so vermieden.
- Die Berechnungszeit für die Gelenkgeschwindigkeiten ist ausreichend klein für eine echtzeitfähige Implementierung am Demonstrator-Ladekran.
- Es kommt in keinem Berechnungsfall zu Fehlern. Die inverse Kinematik ist stabil.

Die vorgestellte inverse Kinematik wird somit für die Anwendung im Rahmen der nutzerzentrierten HMIs am Ladekran als tauglich beurteilt. Weiterführende Simulationen zeigen außerdem, dass die vorgestellte inverse Kinematik für Krane mit bis zu 10 DOFs robust funktioniert, was die Übertragung auf andere Anwendungen vereinfacht.

7.3.2 Regelungskonzept

Um die Gelenkbewegungen am Demonstrator-Ladekran exakt und robust ansteuern zu können, wird eine Regelung eingesetzt. Somit wird das System in die Lage versetzt, selbstständig auf Abweichungen von der Bewegungsvorgabe durch interne oder externe Störungen zu reagieren und die Abweichungen zu kompensieren.

Das realisierte Regelungskonzept ist in Abbildung 7-3 abgebildet. Wichtigste Eingabe ist die Wunschgeschwindigkeit des Hakens \dot{h}_d , die aus der Bedieneingabe (Ziel der Lastbewegung oder gewünschte Bewegungsrichtung) berechnet wird. Die inverse Kinematik berechnet anschließend die für die gewünschte Hakengeschwindigkeit \dot{h} notwendigen Gelenkgeschwindigkeiten \dot{q}_d , die dann über einen Integratorbaustein in die entsprechenden Wunschpositionen der Gelenke q_d umgerechnet werden. Anschließend werden alle Krangelenke so bewegt, dass jedes Gelenk die entsprechende Stellung q_i erreicht. Durch die gleichzeitige Bewegung aller Gelenke in Richtung der Wunschstellungen entsteht somit die Hakenbewegung mit der Geschwindigkeit \dot{h} . Dann erfolgt die Vorgabe der nächsten Gelenkpositionen und die Bewegung setzt sich fort. Durch kurze Zykluszeiten in diesem Berechnungsalgorithmus entsteht eine kontinuierliche Bewegung. Der eigentliche Regelkreis ist nur dafür verantwortlich, die realen Gelenkpositionen q_m zu messen und mit den Wunschpositionen q_d zu vergleichen. Über eine Kompensationsrechnung werden Abweichungen (Fehler e) erkannt und ausgeglichen.



Legende

h	Position des Hakens	q_d	Wunsch-Position(en) der Gelenke
\dot{h}	Geschwindigkeit des Hakens	q_m	Gemessene Gelenk-Position
\dot{h}_d	Wunsch-Geschwindigkeit des Hakens	e	Regeldifferenz

Abbildung 7-3: Regelungskonzept für die Hakenbewegung

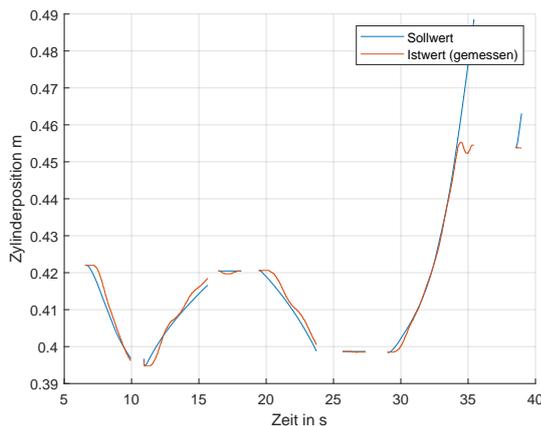
7.3.3 Funktionsnachweis des Steuerungs- und Regelungskonzepts

Zur Beurteilung ob das Regelungskonzept die ausreichend genaue Positionierung der Krangelenke und damit die Position des Hakens sicherstellen kann, werden Messungen am Ladekran durchgeführt. Hierfür wird dem System eine gewünschte Hakenbewegung \dot{h}_d vorgegeben, die resultierenden Sollwerte q_d für die Gelenke werden berechnet und aufgezeichnet. Der q-Regler erhält die Sollwerte als Eingabe und es resultieren folglich neue

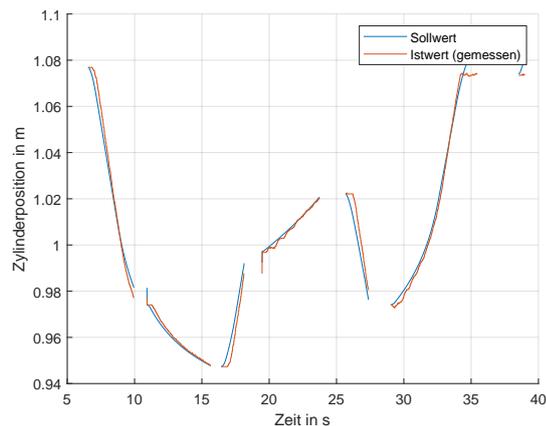
Hakenpositionen h . Die hierfür notwendigen Gelenkstellungen werden über die Gelenksensoren als Istwerte q_m der Gelenke gemessen. Aus den Soll- und Istwerten der Gelenke können dann die Soll- und die Ist-Hakenposition errechnet und verglichen werden.

Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 7-4 bis 7-6 abgebildet. Die Kurven in den Abbildungen weisen stellenweise Lücken auf. Diese Lücken treten auf, da die Wunscheingaben im Lauf der Messung immer wieder kurz unterbrochen werden (entspricht einer Rückstellung der Bewegungsvorgabe). Zu diesen Zeitpunkten findet keine Bewegungsvorgabe statt. Daher sind auch die inverse Kinematik sowie der Regler zu diesem Zeitpunkt nicht aktiv, und es können in diesen Zeiträumen keine Sollwerte vorgegeben werden.

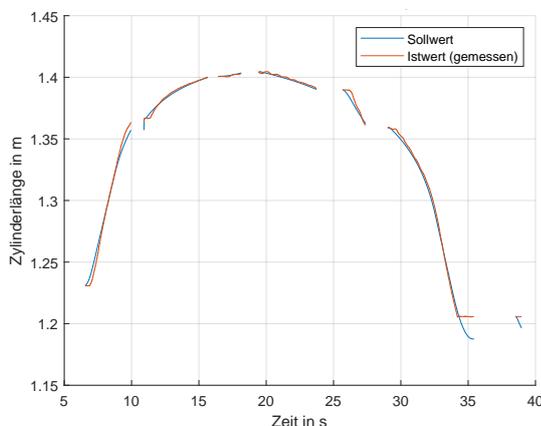
Abbildung 7-4 zeigt für jedes der vier Krangelenke einen Positionsverlauf über der Zeit. Die angegebene Länge bezieht sich auf die Ausfahrlänge der Hydraulikzylinder (q_1, q_2, q_3) sowie die gesamte Länge des Teleskopauschubs (q_4). Es ist erkennbar, dass die gemessene Istposition dem vorgegebenen Sollwert folgt. Die Abweichungen bewegen sich meist im Bereich weniger Millimeter.



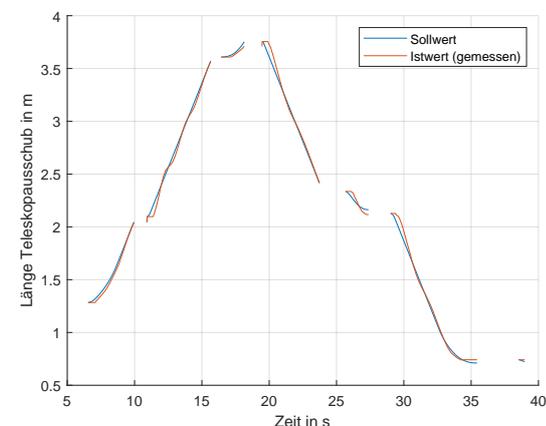
(a) Zylinderposition: Schwenkwerk q_1



(b) Zylinderposition: Hubarm q_2



(c) Zylinderposition: Knickarm q_3



(d) Zylinderposition: Teleskoparm q_4

Abbildung 7-4: Positionsregelung der Gelenke: Vergleich des Sollwerts der Zylinderposition mit dem Istwert

Abbildung 7-5 zeigt zur besseren Beurteilung die Absolutabweichung der einzelnen Zylinderlängen bzw. der Teleskopausschublänge, die sich aus dem Zeitverlauf ergibt. Die Abweichungen bewegen sich bei den Hydraulikzylindern (q_1, q_2, q_3) immer im Bereich unter 10 mm und sind damit sehr klein im Verhältnis zur Zylinderlänge. Die Abweichungen beim Teleskopausschub (q_4) liegen im Bereich bis 100 mm und sind damit bis zu eine Größenordnung größer. Die Ursache hierfür liegt darin, dass der Teleskopausschub durch die kleineren hydraulischen Querschnitte der Anschlussleitungen in Verbindung mit erheblich erhöhter Gelenkreibung sehr viel träger zu bewegen ist als die drei anderen Zylinder.

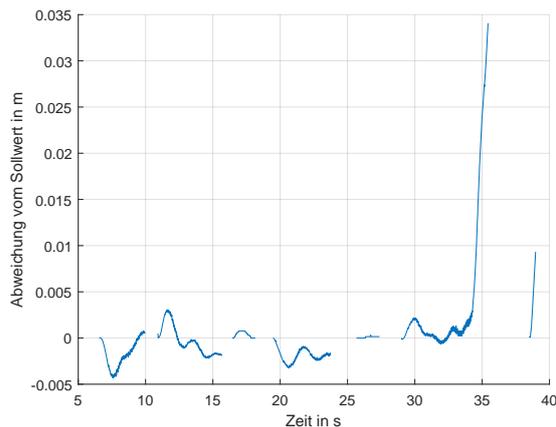
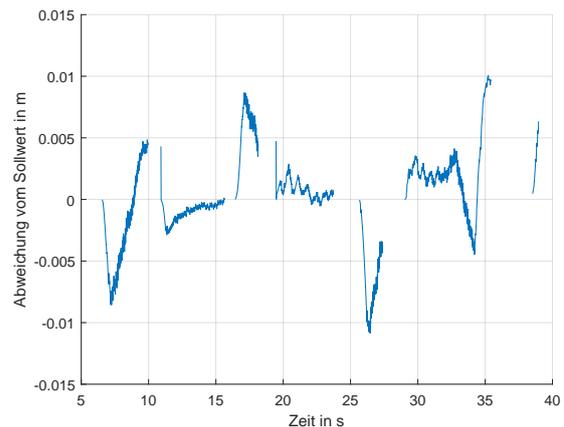
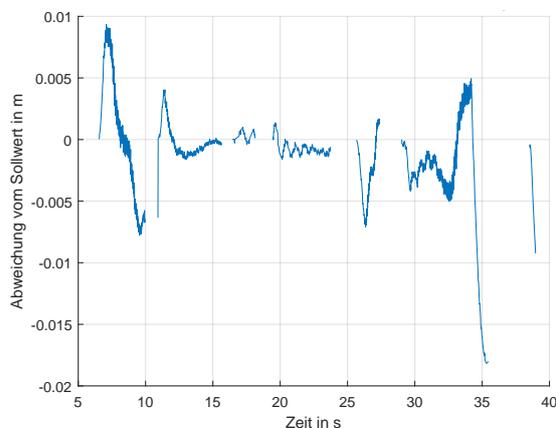
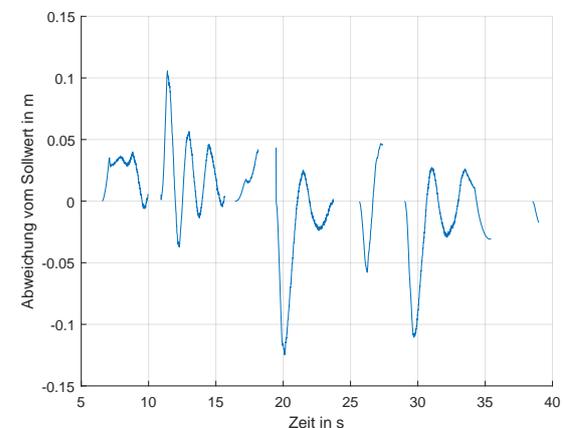
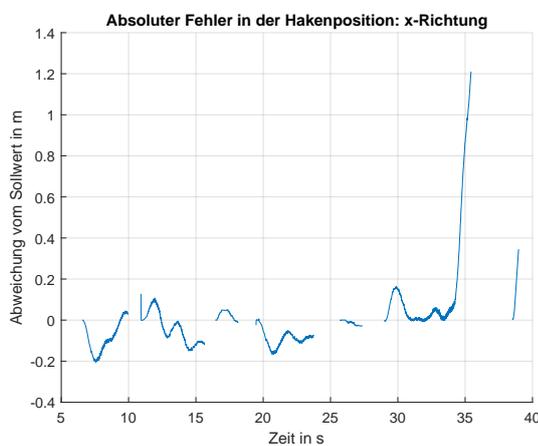
(a) Schwenkwerk q_1 (b) Hubarm q_2 (c) Knickarm q_3 (d) Teleskoparm q_4

Abbildung 7-5: Absolute Fehler der Zylinderlängen je Gelenk

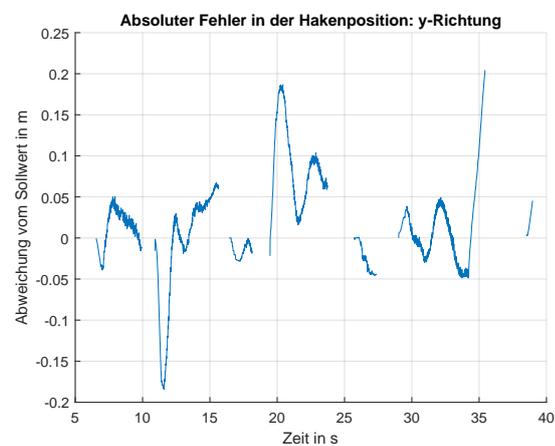
Beim Vergleich der Teleskopausschubbewegungen in Abbildung 7-5 wird deutlich, dass die extremen Abweichungen bei ca. 11 s, 20 s und 30 s auftreten. Dies ist der Zeitpunkt, an dem der Teleskopausschub aus der Ruhelage heraus stark beschleunigt wird. Die beschriebene hohe Trägheit sorgt für die große Abweichung zwischen Soll- und Istwert. Außerhalb dieser Beschleunigungsphasen liegt die Positionsabweichung unter 50 mm.

Abbildung 7-6 verdeutlicht, dass die Abweichungen in der resultierenden Hakenposition trotz der Positionsfehler, die sich bei den Krangelenken ergeben, in einem akzeptablen Be-

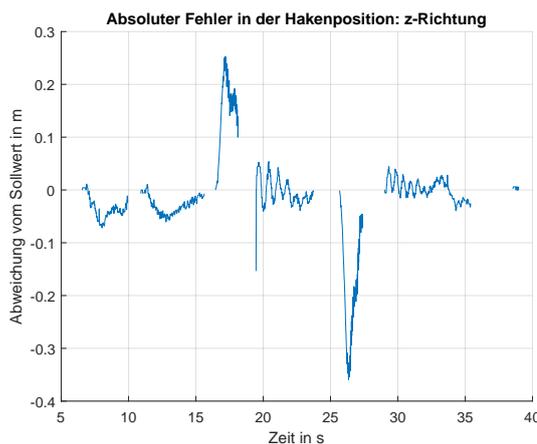
reich, d. h. deutlich unterhalb der ohnehin auftretenden elastischen Tragwerksverformungen liegen¹⁵. Die Ausschläge bei ca. 35 s (x- und y-Richtung), 11 s und 20 s (y-Richtung) sowie bei ca. 17 s und 26 s (z-Richtung) treten genau an den Rändern des Regelfensters auf, wenn der Regler aufgrund der gerade fehlenden Bedieneingabe inaktiv wird. Zu diesem Zeitpunkt ist die Sollposition „eingefroren“, auch wenn sich der Kran noch kurz weiter bewegt (Bremsvorgang). Deshalb ergibt sich eine große Abweichung zwischen Soll- und Istwert. Außerhalb dieser besonderen Bereiche liegt der Absolute Fehler in x-Richtung immer unter 20 cm sowie in y- und z-Richtung jeweils unter 10 cm. In Anbetracht der Auslegerlänge von max. 11,1 m sowie elastischen Auslegerbiegungen und -schwingungen, deren Größe häufig über 20 cm liegt, werden die Positionsfehler als vergleichsweise klein angesehen. Somit kann die Positioniergenauigkeit mit Hilfe des gewählten Regelungskonzepts als hinreichend beurteilt werden.



(a) x-Richtung



(b) y-Richtung



(c) z-Richtung

Abbildung 7-6: Absoluter Fehler in der Hakenposition

¹⁵Für die Definition der Koordinatenrichtungen wird auf Abbildung 5-4 auf Seite 72 verwiesen.

Der in diesem Abschnitt entwickelte Steuerungs- und Regelungsansatz, bestehend aus inverser Kinematik sowie dem Ansteuerungs- und Regelungskonzept, eignet sich für die Umsetzung von nutzerorientierten Steuerungskonzepten an einem realen Kran im realistischen Nutzungskontext. Forschungsfrage 3c kann somit als beantwortet gelten.

Der Nutzungskontext für die Umsetzung der nutzerzentrierten HMIs ist vollständig dargelegt. Dem Vorschlag von Lee et al. [Lee-2020] für die Automatisierung von teleoperierten Arbeitsmaschinen folgend wird ein standardisiertes Bussystem sowie eine inverse Kinematik mit geschlossenem Regelkreis verwendet.

8 Gestaltungsmöglichkeiten für zielorientierte Steuerungskonzepte

Dieses und das folgende Kapitel zeigen mögliche Gestaltungslösungen für die Umsetzung von nutzerzentrierten HMIs im realen Nutzungskontext. Ohne Priorisierung werden zuerst Lösungen für eine zielorientierte Steuerung präsentiert. Ausgehend von der Auswahl sinnvoller Eingabemodalitäten beschreibt dieses Kapitel zwei zielorientierte Interaktionsparadigmen (vgl. Abschnitt 3.2 mit Abbildung 3-1), die umgesetzt wurden. Im iterativen Prozess zur nutzerzentrierten Gestaltung entspricht dies dem „Erarbeiten von Gestaltungslösungen zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen“. Ziel dieses Kapitels ist die Beantwortung von Forschungsfrage 3: Wie können nutzerzentrierte (in diesem Fall: zielorientierte) Steuerungskonzepte für Krane mit bewegtem Bediener im realistischen Nutzungskontext aussehen und wie lassen sie sich umsetzen?

8.1 Interaktionselemente zur Zielvorgabe

Der gewünschte Zielort der Last ist die Haupteingabe für das zielorientierte HMI. Aus der Differenz zwischen aktueller Hakenposition und der gewünschten Zielposition wird die notwendige Horizontalbewegung des Hakens (Projektion des Bewegungsvektors in eine horizontale Ebene) ermittelt. Um den Zielort (oder beliebig viele Zwischenpunkte auf dem Weg zum endgültigen Zielort) einzugeben, wird ein Eingabegerät benötigt, das die Spezifikation eines Punkts (Koordinaten) im Arbeitsbereich des Krans durch den Bediener ermöglicht. Folglich wird ein koordinatengebendes Interaktionselement benötigt, das die Eingabe in zwei oder mehr räumlichen Dimensionen ermöglicht. 1D-Interaktionselemente scheiden hierfür aus. Berücksichtigt man zudem die Basisanforderungen für nutzerzentrierte Steuerungskonzepte, scheiden weitere 2D- und 3D-Interaktionselemente aus:

- **Indirekte Interaktionselemente (Maus, 3D-Maus, Trackpoint, Trackball, Joystick, Touchpad, Grafiktablett)** setzen, wenn sie zur Eingabe einer absoluten Punktkoordinate verwendet werden, immer eine Einarbeitungszeit zum Erlernen der Referenzierung voraus (s. [Rog-2005, S. 272]). Das ist notwendig, weil sich Aktionsort und Wirkort der Eingabe bei indirekten Elementen unterscheiden. Im Sinne einer intuitiven, lernförderlichen Interaktion ist das zu vermeiden.
- **Eye-Tracking, Datenhandschuh und Gestenerkennung** sind Laborwerkzeuge und eignen sich derzeit noch nicht für Einsatz im industrienahen Umfeld [VDI-3850-2, S. 12].
- **Touchscreen und Markertracking** erfordern für die absolute Zielvorgabe aufwendige Infrastruktur wie Kameras oder RFID-Reader zur Ausleuchtung des gesamten Arbeitsraums.

Berücksichtigt man die verfügbaren Interaktionselemente (vgl. Abschnitt 3.3 mit Abbildung 3-2) sowie die Basisanforderungen für nutzerzentrierte Steuerungskonzepte bei der Auswahl geeigneter Interaktionselemente, zeigen sich nur die folgenden Elemente für ein Zeigergerät zur Punktvorgabe als geeignet:

1. Pointer (Markierung des Zielorts mit einem Lichtpunkt).
2. Augmented Reality: Vorgabe eines Zielpunkts in der erweiterten Realität.

Mit beiden Eingabemöglichkeiten kann der Bediener einen Zielpunkt spezifizieren, der anschließend in das Koordinatensystem des Krans übertragen werden muss (Mapping), um durch die Kransteuerung automatisch angesteuert werden zu können.

Zur parallelen Kontrolle der Vertikalbewegung der Last während der Bewegung zum Zielort wird für das zielorientierte HMI eine zweite Eingabemöglichkeit benötigt:

1. Die Bewegung eines Pointers und damit des Lichtpunkts erfolgt durch die Handbewegung des Bedieners, der den Pointer trägt. Es ist zweckmäßig, ein Interaktionselement für die Vertikalbewegung am gleichen Eingabegerät unterzubringen, das der Bediener ohnehin schon in der Hand hat. Hierfür kommen alle 1D-Interaktionselemente in Frage, zum Beispiel ein Scroll-Rad oder eine Kombination aus zwei Tastern.
2. Bei der Zielvorgabe in der erweiterten Realität kommen zur Steuerung der Vertikalbewegung des Hakens digitale Schaltflächen zum Einsatz, die realen 1D-Interaktionselementen entsprechen (z. B. Schieberegler, Kombination aus zwei Tastern).

In beiden Fällen ist zu beachten, dass die Prinzipien der Kompatibilität erfüllt werden.

8.2 Umsetzung des zielorientierten Interaktionsparadigmas

Die vom Bediener zu lösende Aufgabe (Bewegungswunsch) in Kombination mit der sensorischen Perzeption der aktuellen (Start-)Position des Hakens sowie der Umgebung der Last bestimmt den gewünschten (Zwischen-)Zielort. Davon ausgehend durchläuft die Mensch-Maschine-Interaktion vier Schritte (vgl. Interaktionsparadigma in Abbildung 3-1):

1. Kognitive Verarbeitung: Der Bewegungswunsch wird auf die Funktionsweise des HMI übertragen (mentale Kodierung des Bewegungswunschs in die Funktionsweise des HMI). Über das HMI muss der gewünschte Zielort der Last vorgegeben werden.
2. Motorische Handlung mit dem Interaktionselement: Der gewünschte Zielpunkt wird mit dem Eingabeelement (Lichtpunkt oder AR-Zielpunkt) markiert und durch eine Bestätigungshandlung fixiert. Bei der Bestätigung wird die Position des Lichtpunkts durch eine 3D-Tiefenkamera aufgenommen.

3. Signal: Eine elektrische Stellgröße innerhalb des Steuerungssystems wird ausgegeben, um den Bedienerwunsch (Zielort) im System aufnehmen und verarbeiten zu können.
4. Verarbeitung (Steuerungslogik): Der Bewegungsvektor für den Haken sowie die dafür notwendigen Freiheitsgrad-Bewegungen werden durch die inverse Kinematik berechnet. Anschließend werden passende Bewegungsbefehle generiert.

Nach Abschluss der vier Schritte führt das Steuergerät des Krans die notwendigen Aktionen aus, so dass die Aufgabe schließlich erfüllt wird. Die konkrete technische Umsetzung des Interaktionsparadigmas „zielorientierte Laststeuerung“ für die beiden alternativen Eingabeelemente wird im Folgenden erläutert.

8.2.1 Markierung des Zielorts mit einem Lichtpunkt

Zur Auswahl des Zielorts kommt ein Lichtpunkt zum Einsatz, der über eine 3D-Kamera (2D-Farbbild und Tiefeninformationen) geortet wird. Als Kamera wird eine Intel RealSense D435 verwendet. Die wichtigsten Eigenschaften der Kamera sind in Tabelle 8-1 aufgeführt. Darüber hinaus wurde die Verwendung einer Microsoft Kinect V2-Kamera geprüft. Letztere weist zwar eine höhere Genauigkeit auf als die schlussendlich gewählte D435, zeigt sich aber als ungeeignet für einen Einsatz im Außenbereich, bedingt durch die massive Störung der Tiefenmessung als Folge des Infrarotanteils im Tageslicht.

Tabelle 8-1: Technische Spezifikation der RealSense D435 [Int-2020]

Eigenschaft	Wert
Auflösung RGB-Kamera (Pixel)	1920 × 1080
Field of View RGB-Kamera (horiz./vert./diag.)	69° × 42° × 77°
Max. Framerate RGB-Kamera	30 Frames/s
Tiefenerkennung	Stereo Vision und Structured Light
Auflösung Tiefenkamera (Pixel)	1280 × 720
Field of View Stereo-Tiefe (horiz./vert./diag.)	87° × 58° × 95°
Field of View Infraot-Tiefe (horiz./vert./diag.)	90° × 63° × 99°
Max. Framerate Tiefenkamera	90 Frames/s
Maximal messbare Tiefe	10 m
Minimal messbare Tiefe	1,05 m
Fehler der Tiefenmessung (lt. Hersteller)	<2% bei 2 m

Um im Sinne der Basisanforderungen zu vermeiden, dass wegen des begrenzten Sichtfelds der D435 der gesamte Kranarbeitsraum mit 3D-Kameras ausgeleuchtet werden muss, wird die Kamera in ca. 2 m Höhe an der Kransäule angebracht, damit sie immer in Richtung des Hakens zeigt (s. Abbildung 8-1a). Für den Fall, dass der Zielpunkt sich außerhalb des

aktuellen Sichtfelds der Kamera befindet, erhält die Steuerung eine einfache (kompatible) Möglichkeit, den Kran zu schwenken, bis der Zielpunkt im Sichtfeld der Kamera liegt. Je weiter der Bildwinkel der Kamera ist, desto seltener ist diese Korrektur notwendig.



(a) Tiefenkamera RealSense D435 an der Kransäule



(b) Sichtfeld der Kamera inkl. Lichtpunkt und automatisch ermitteltem Zielpunkt der Last

Abbildung 8-1: Installationen zur Lichtpunktdetektion

Der Funksender (s. Abbildung 8-2) wird als Einhand-Steuerung vom Kranführer getragen und ist mit einer starken Leuchte (LED) ausgestattet, deren Strahl über eine Linse zu einem Lichtpunkt gebündelt wird. Die physische Gestaltung des Funksenders erfolgt mit Hilfe von iterativen Vor- und Detailwürfen mit Feedback-Schleifen durch Experten für Ergonomie und Kranbedienung. Der Funksender ist über eine WLAN-Schnittstelle drahtlos mit der Recheneinheit verbunden. Hierzu befindet sich ein Arduino Nano im Gehäuse des Funksenders. Bei der verwendeten LED XP-L2 der Firma Cree handelt es sich um die stärkste derzeit frei im Handel erhältliche Handtaschenlampe mit einem Lichtstrom von 1200 lm. Der gebündelte Lichtpunkt hat – abhängig vom Abstand zum Bediener – einen Durchmesser von ca. 20 cm bis 80 cm. Die Verwendung eines Laserpointers – also einer stark gebündelten Lichtquelle mit hoher Intensität – hat sich als nicht zweckmäßig erwiesen, da die Emissionsleistung bei Lasern, die außerhalb von Laserschutzeinrichtungen betrieben werden (Laserklassen 1, 1M, 1C, 2, 2M), gesetzlich begrenzt ist. Der Laserpointer wäre im Kranumfeld dadurch nur bei Dunkelheit mit bloßem Auge und auch nur in einer Entfernung von wenigen Metern vom Bediener zu sehen.



Abbildung 8-2: Funksender für die zielorientierte Lichtpunkt-Steuerung

Mit dem Lichtpunkt peilt der Bediener den Zielpunkt für die Last an. Über einen Bestätigungsknopf (Druck auf den Joystick) wird der Zielpunkt fixiert. Die Kamera, die an der Kransäule befestigt ist, detektiert den Lichtpunkt in der Umgebung und ermittelt daraus die relative Lage des Punkts zur Kamera (Raumkoordinaten). Für die Lichtpunktdetektion wird ein Bildvergleichsalgorithmus (Differenzbildung) verwendet, der ein Bild kurz vor der Aktivierung der Lampe mit einem Bild zum Zeitpunkt der Zielbestätigung vergleicht und so die Koordinaten des Lichtpunkts im Bild ermittelt. Zur optimalen Extraktion der Bildinformationen kommen neben der Differenzbildung diverse Verarbeitungswerkzeuge zum Einsatz (Graubildumwandlung, Kontrastverstärkung, Farbwertanalyse, Häufigkeitsverteilung der Farbwerte und Konturenfinder). Über die Tiefeninformationen der Lichtpunktkoordinaten werden die Raumkoordinaten des Lichtpunkts (Zielposition) berechnet. Die Zielposition ergibt sich aus dem Flächenschwerpunkt des detektierten Lichtpunkts (s. Abbildung 8-1b).

Aus der aktuellen Hakenposition (Sensoren des Krans) und der gewünschten Zielposition errechnet eine Software den Bewegungsvektor des Hakens in der horizontalen Ebene und diskretisiert ihn in Zwischenschritte. Anschließend fährt der Kranhaken automatisiert entlang der Zwischenpunkte bis über den vorgegebenen Zielpunkt. Während dieser Bewegung gibt der Bediener lediglich die Fahrgeschwindigkeit des Hakens über eine Vorschubeingabe vor (Auslenken des Joysticks um die Vor-Zurück-Achse). Über einen selbstrückstellenden Kippschalter steuert der Bediener zusätzlich die Vertikalbewegung des Kranhakens vor, während und nach der automatischen Hakenbewegung. Darüber hinaus besitzt der Funksender weitere Bedienelemente für das Umschalten in weitere Bedienmodi (Rüsten etc.). Die Stromversorgung des Funksenders erfolgt über einen wechselbaren Akku.

Die Steuerungssoftware zur Bildverarbeitung, Bewegungsberechnung und Ausgabe der CAN-Steuersignale läuft auf einem NVIDIA Jetson Xavier Board, das in einem Schaltkasten am Kran untergebracht ist (s. Abbildung 8-1a). Die Software ist in Python implementiert. Das Jetson Board gibt CANopen-Signale für die Hakenbewegung aus, die vom Steuergerät der nutzerzentrierten HMIs in Freiheitsgrad-Bewegungen umgerechnet und für die Ansteuerung der Kranantriebe verwendet werden. Die beschriebene Steuerung ist demonstratorisch am Ladekran appliziert und funktionsfähig. Hindernisse bei der Umsetzung und daraus resultierende Konzeptschwächen, die einen Einfluss auf die Verwendung der Steuerung und eine Evaluation des Steuerungskonzepts im realen Nutzungskontext haben, werden im Unterkapitel 8.3 diskutiert.

8.2.2 Vorgabe eines Zielpunkts in der erweiterten Realität

Das zweite Interaktionsparadigma, das für das zielorientierte HMI am Ladekran umgesetzt wird, nutzt die Augmented-Reality-Brille *Hololens* der Firma Microsoft, die (gemeinsam mit der *Hololens 2*, die zum Zeitpunkt der Umsetzung noch nicht erhältlich war) derzeit als technologieführendes AR-Headset gilt. Die *Hololens* wird vom Bediener auf dem Kopf getragen. Er blickt durch die halbtransparenten Anzeigen, was eine Ergänzung des natürlichen Sichtfelds um virtuelle Elemente ermöglicht. Im Sichtfeld können interaktive Projektionen (Holografien) eingeblendet werden, mit denen der Bediener über Gesten oder einen zusätzlichen Taster (sog. Clicker), den er in der Hand hält, interagieren kann (klicken, drag-and-drop). Der Clicker ist zusätzlich in der Lage, einfache Gesten zu erkennen, zum Beispiel Handbewegungen nach oben oder unten.

Die gesamte notwendige Hard- und Software (Akku, Prozessor, Sensoren, Lautsprecher, ...) ist in der *Hololens* integriert, so dass keine zusätzlichen Kabel oder Rechner notwendig sind, welche die Bewegung des Bedieners beschränken. Über die Gesten- und Tastereingabe hinaus unterstützt die *Hololens* auch eine Spracheingabe, die jedoch nicht zur Kranbedienung verwendet wird. Die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 8-2 zusammengefasst.

Während des Betriebs wird von der *Hololens* mit Hilfe der Kameradaten und der Tiefenmessung laufend ein 360°-Umgebungsmodell erstellt (Live-Kartierung der Oberflächen in der Umgebung), was ermöglicht, dass die Holografien auch relativ zu realen Fixpunkten im Raum positioniert werden können, z. B. auf Oberflächen oder in einem festen Abstand zu einem bekannten Referenzpunkt. Für die Kransteuerung kommt als realer Fixpunkt zur Referenzierung der Kranposition ein optischer Marker in Form eines Fotos zum Einsatz, der jedes Mal, wenn die *Hololens* eingeschaltet wird, gescannt werden muss. Der Marker ist in der Nähe des Krandrehpunkts fest angebracht. Über das automatisch erstellte Umgebungsmodell und die IMU-Messdaten errechnet die *Hololens* mit Hilfe interner Tracking-Algorithmen automatisch und in Echtzeit die Position des Bedieners relativ zum Marker und

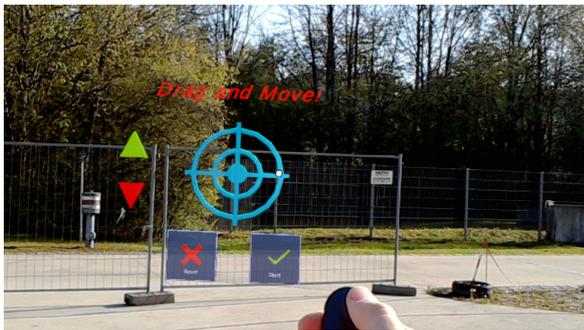
damit relativ zum Kran. Über die Kransensorik kann dann die aktuelle Hakenposition relativ zum Krandrehpunkt ermittelt werden und folglich die Position des Bedieners relativ zum Haken (und damit zur Last). Die Live-Kartierung sorgt dafür, dass das Umgebungsmodell auch bei sich ändernder Umgebung aktuell bleibt.

Tabelle 8-2: Technische Spezifikation der Microsoft HoloLens [Mic-2021]

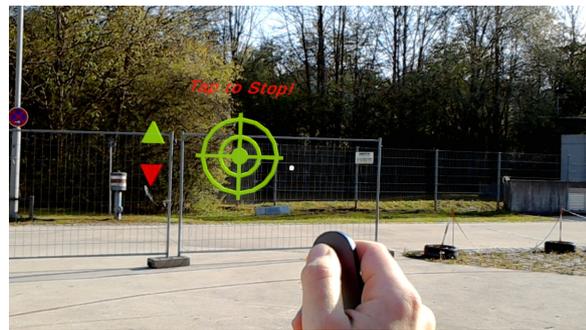
Eigenschaft	Wert
Sensoren	IMU, Tiefenkamera, 4 RGB-Kameras, 4 Mikrofone, Umgebungslichtsensor
Holographische Auflösung	2,3 MP
Auflösung RGB-Kamera	2 MP
Tiefenerkennung	Time of Flight
Reichweite der Tiefenmessung	ca. 8 m
Field of View der Tiefenmessung (horiz./vert.)	120° × 120°
Max. Framerate Tiefenmessung	45 Frames/s
Fehler der Tiefenmessung	unbekannt
Datenverbindung	WLAN 802.11ac

Sobald der Marker gescannt wurde, kann sich der Bediener mit der HoloLens frei in der Umgebung des Krans bewegen. Die optimale Darstellung der HMI-Funktionen wird mit Hilfe von iterativen Vor- und Detailentwürfen mit Feedback-Schleifen gestaltet. Im Sichtfeld wird einige Meter vor dem Bediener eine pfeilförmige Holografie eingeblendet, welche den Zielpunkt für die Hakenbewegung darstellt. Auch wenn sich der Bediener bewegt, bleibt der Pfeil in seinem Sichtfeld und folgt der Blickbewegung (Visual-Field-Kompatibilität). Der Pfeil zeigt dabei immer in Richtung der aktuellen Hakenposition, um dem Bediener eine zusätzliche Orientierung zu ermöglichen, wo er sich gerade relativ zum Kranhaken befindet. Über die Kopfbewegungen und seine Bewegung im Raum kann der Bediener den Zielpfeil im Umfeld des Krans bewegen, bis er sich am gewünschten Zielpunkt (oder in dessen Nähe) befindet. Mit einem Eingabeklick, der entweder über die entsprechende Geste oder den externen Taster ausgeführt wird, lässt sich die Holografie im Raum fixieren. Es erscheint ein visualisierter Zielpunkt in Form eines Fadenkreuzes (siehe Abbildung 8-3a). Anschließend kann die Zielpunkt-Holografie noch mit einer Drag-and-Drop-Geste im Raum verschoben werden. So lassen sich beispielsweise der Abstand des Ziels vom Bediener oder die Höhe des Ziels über dem Boden justieren. Durch einen anschließenden Klick auf die direkt unter dem Pfeil eingeblendete Startfeld-Holografie wird die Bewegung ausgelöst: Der Kranhaken bewegt sich automatisch von der aktuellen Position über die vorgegebene Zielposition. Vor dem Start der Bewegung kann über einen Schieberegler die maximale Hakengeschwindigkeit eingestellt werden (Vorschubbegrenzer). Die Vorgabe der Hakengeschwindigkeit während der Horizontalbewegung wird automatisch vom System übernommen und ist abhängig von der Gesamtlänge der Bewegung. Ähnlich wie beim Laserpointer-HMI erfolgt die automatisch ausgelöste Bewegung lediglich in einer horizontalen Ebene. Für die Vertikalbewe-

gung hat der Bediener zusätzlich den Hololens-Clicker zur Steuerung der Vertikalbewegung in der Hand. Vor, während und nach der horizontalen Lastbewegung kann durch eine Bewegung nach oben oder unten mit dem Clicker die Last gehoben oder abgesenkt werden. Eine manuell ausgelöste Vertikalbewegung wird durch grün aufleuchtende Dreieckshologramme im Sichtfeld visualisiert (s. Abbildung 8-3b). Die Vertikalbewegung der Last ist somit unabhängig von der Horizontalbewegung steuerbar.



(a) Zielorientiertes AR-HMI mit eingeloggtem Zielpunkt, der über drag-and-drop-Gesten noch verschoben werden kann



(b) Zielorientiertes AR-HMI während der automatisierten Hakenbewegung

Abbildung 8-3: Hololens-HMI zur Zielvorgabe, in beiden Fällen mit gleichzeitig durch die Clicker-Geste ausgelöster manueller Vertikalbewegung (roter Pfeil)

Das Hololens-HMI ist in der Umgebung Unity in C# implementiert und läuft verzögerungsfrei. Die Berechnung des Bewegungsvektors des Hakens erfolgt in entsprechenden Skripten durch die Hololens-Recheneinheit. Über eine WLAN-Schnittstelle wird das Eingangssignal von der Hololens auf einen Mini-Rechner (Raspberry Pi 3 Model B+ mit PiCAN2 Shield) übertragen, der aus den Bewegungswünschen entsprechende CANopen-Signale generiert. Diese Signale werden über eine Kabelverbindung an das Steuergerät der nutzerzentrierten HMIs übertragen, wo die gewünschte Hakenbewegung letztlich in entsprechende Freiheitsgrad-Bewegungen umgesetzt wird und die Antriebsansteuerung erfolgt.

Die Zielvorgabe über das AR-Interface ist am Ladekran demonstratorisch appliziert und funktionsfähig. Verbleibende Konzeptschwächen, die einen Einfluss auf die Verwendung der Steuerung und eine Evaluation der zielorientierten HMIs im realen Nutzungskontext haben, werden im folgenden Unterkapitel 8.3 diskutiert.

8.3 Limitationen

Die beiden Interaktionselemente für die Zielvorgabe (Lichtpunkt und AR-Headset) wurden systematisch durch ein Ausschlussverfahren aus den verfügbaren Eingabeelementen ermittelt. Alle anderen Interaktionselemente mussten ausgeschlossen werden. Für die Umsetzung beider Interaktionsparadigmen wird die aktuell leistungsstärkste verfügbare Technik verwendet, in diesem Fall die leistungsstärkste tragbare LED-Taschenlampe, deren

Lichtpunkt sich durch eine bewegliche Linse fokussieren lässt bzw. das derzeit marktführende und leistungsstärkste AR-Headset. Ferner handelt es sich bei der verwendeten Kamera Realsense D435 um eine sehr häufig in der Robotik verwendete Tiefenkamera, deren Spezifikation im Hinblick auf den vorliegenden Anwendungsfall ausreichend erscheint. Nichtsdestotrotz zeigen sich erhebliche Limitationen für die Nutzung der beiden zielorientierten HMIs, die im Folgenden dargestellt werden.

Als wesentliche konzeptionelle Limitation ist zu nennen, dass die konkrete Gestaltung der beiden zielorientierten Interaktionsparadigmen durch Einbeziehung von Experten aus dem Bereich Ergonomie und Kransteuerung in mehreren Iterationsschleifen erfolgt ist. Es ist daher nicht auszuschließen, dass auch andere Gestaltungen für eine zielorientierte Laststeuerung mit den gleichen Eingabeelementen in Frage kommen und sich ebenso eignen wie die beiden umgesetzten Konzepte. Bei der Gestaltung der zielorientierten Interaktionsparadigmen wurden jedoch nicht nur individuelle Meinungen berücksichtigt, sondern insbesondere auch die Grundsätze der Dialoggestaltung (vgl. Tabelle 2-2 in Abschnitt 2.1.2) für die Gestaltung von gebrauchstauglichen HMIs mit einbezogen. Dies ist in Tabelle 8-3 zusammengefasst. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die resultierenden Interaktionsparadigmen eine gewisse Universalität aufweisen und die Evaluationsergebnisse nicht zu stark von Individuallösungen verzerrt werden.

Jedoch weisen beide zielorientierten Konzepte Schwächen im Hinblick auf die Basisanforderungen auf:

- Verwendung von nicht-sicherheitszertifizierten Kommunikationsprotokollen (WLAN)
- Verwendung von nicht-sicherheitszertifizierbarer Consumer-Hardware (Hololens, Raspberry Pi, selbstgebaute Funksender mit Lichtpunktfunktion)

Da die beiden genannten Punkte lediglich eine Frage der konkreten Implementierung bzw. Komponentenauswahl sind, haben sie keinen Einfluss auf die grundsätzliche Eignung der zielorientierten HMIs. Leider existieren zusätzlich einige schwerwiegende Limitationen für beide zielorientierten HMIs, was das grundsätzliche Proof of Concept an einem realen Kran im praxisnahen Umfeld (Basisanforderung) in Frage stellt.

Tabelle 8-3: Zielorientiertes HMI: Berücksichtigung der Grundsätze der Dialoggestaltung

Lernförderlichkeit, Fehlertoleranz, Steuerbarkeit	Eine konsequente Farbkodierung und die Verwendung aussagekräftiger Icons fördert die eindeutige Identifikation des ausgewählten HMI sowie der Einzelinteraktionen und dadurch die schnelle Informationsaufnahme und -verarbeitung. Bei der Farbgestaltung werden zudem ergonomische Gesichtspunkte berücksichtigt, z. B. durch Vermeidung von chromatischer Aberration. Die Funktionen innerhalb der Modi werden mit Hilfe von eindeutig identifizierbaren Symbolen visualisiert und bieten zusätzlich zur Farbe einen eindeutigen Wiedererkennungseffekt.
Erwartungskonformität, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Lernförderlichkeit	Alle Stellteile und Schaltflächen wurden so gestaltet, dass aus ihrer Form die Funktion und die Art der Interaktion hervorgeht. Hierfür wurde auf etablierte Designrichtlinien (z. B. Universal Windows Plattform) oder breit vorhandene Vorerfahrung (Funktionsweise von Joysticks, Tastern) zurückgegriffen, um möglichst niedrige Ebenen im Kontinuum des Wissens anzusprechen.
Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Individualisierbarkeit	Um eine vereinfachte Informationsdarstellung zu erreichen, werden dem Bediener nur die Informationen angezeigt, die den aktuellen Betriebszustand beschreiben. Weitere Informationen können individuell im Menü abgerufen werden.
Aufgabenangemessenheit	Auf weitere Zusatztasten, die nicht zur unmittelbaren Kransteuerung benötigt werden, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. So ist zum Beispiel kein Zustimm- oder Totmannschalter verbaut.
Individualisierbarkeit	Je nach individueller Präferenz können die Haupteingaben mit der bevorzugten Hand getätigt werden.
Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Aufgabenangemessenheit	Die Zielpunktbewegungen sind zu jeder Zeit kompatibel zu den Bedienerbewegungen.

Markierung des Zielorts mit einem Lichtpunkt

Die wesentlichen Limitationen der Zielpunktvorgabe mit einem Lichtpunkt sind:

- Nicht ausreichende Ausleuchtung: Die Kamertechnik kann nicht den gesamten Arbeitsraum auf einmal erfassen (Verletzung der Basisanforderung), sondern lediglich dem Lichtpunkt folgen, wenn der Kran geschwenkt wird.
- Ungenauigkeit in der Hakenpositionierung: Da aus Sicherheitsgründen keine stark fokussierte Lichtquelle (Laser) verwendet werden kann, wird statt eines kleinen Punkts eher ein „Lichtfleck“ erzeugt. Der Durchmesser des Lichtflecks (20 cm - 50 cm) sorgt für eine Ungenauigkeit der Hakenpositionierung im grenzwertigen Bereich.
- Ungenauigkeit in der Tiefenmessung: Die Tiefeninformation weicht insbesondere bei Entfernungen von mehr als 2 m stark vom tatsächlichen Abstand ab. Der Fehler ist zufällig und schwankt stark zwischen Messwiederholungen (>10 %). Er tritt unabhängig von den äußeren Bedingungen auch in der Laborumgebung auf oder bei der Verwendung von anderen Kameras des gleichen Typs. Eine Lösung für die Messungenauigkeiten,

die im Anwendungsfall am Ladekran weit außerhalb der Herstellerspezifikation liegen, konnte auch mit Herstellerunterstützung nicht gefunden werden. Es sollte also in Zukunft ein genaueres Kamerasystem oder eine zusätzliche, andersartige Tiefenmessung verwendet werden. Dies geht jedoch mit einer Vervielfachung der Hardware-Kosten einher und war im Rahmen der Forschungstätigkeiten des Autors nicht möglich.

- Sensitivität der Tiefenmessung für Umgebungsbedingungen: Sonnenlicht verschlechtert die Qualität der Tiefenmessung zusätzlich, da die Tiefenmessung in diesem Szenario nur noch über Stereo Vision funktioniert (Störung der Infrarotmessung durch den Infrarotanteil im Tageslicht). Die o. g. Messungengenauigkeit wird dadurch noch größer. Auch aus diesem Grund sollte geprüft werden, bei zukünftigen Anwendungen eine alternative Tiefenmessung zu ergänzen.
- Zuverlässige Funktion nur während der Dämmerung oder bei Dunkelheit: Obwohl der Lichtpunkt mit einer extrem starken LED erzeugt wird, ist er bei hellem Tageslicht im Außenbereich weder für das bloße Auge noch für die Kamera zu erkennen, sobald er sich mehrere Meter vom Bediener entfernt befindet. Es sind weder stärkere Leuchten noch andere Fokussierungslinsen verfügbar, welche die Intensität des Lichtpunkts soweit erhöhen, dass sich das Problem beseitigen lässt. Beim Einsatz der Leuchte in geschlossenen Räumen detektiert die Kamera den Lichtpunkt bis zu einer Entfernung von 20 m, auch bei einfallendem Tageslicht. Im Außenbereich ist der Lichtpunkt an einem leicht bewölkten oder sonnigen Tag bereits bei einer Entfernung von 2 m nicht mehr zu erkennen.
- Begrenzte Reichweite der Tiefenmessung: Die maximale Reichweite gängiger Kameras zur Tiefenmessung ist deutlich kleiner als die übliche Arbeitsbereichsgröße von Kranen. Die Lichtpunktdetektion kann derzeit – selbst bei Dunkelheit – nur in einem Bereich von ca. 8 m um den Krandrehpunkt erfolgen.

Die meisten der genannten Limitationen stellen zum gegenwärtigen Zeitpunkt wesentliche Hindernisse für die Evaluation der Steuerung im vorgegebenen Nutzungskontext dar, wenn realitätsnahe Aufgaben im gesamten Arbeitsbereichs des Ladekrans durchgeführt werden sollen.

Vorgabe eines Zielpunkts in der erweiterten Realität

Die wesentlichen Limitationen der Zielpunktvorgabe mit Hilfe der AR-Brille Hololens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Begrenztes Sichtfeld: Einerseits sorgt das Tragen der Hololens für eine Einschränkung des Sichtfelds beim Bediener, was aus Sicherheitsgründen problematisch ist. Andererseits ist der Teil des Sichtfelds, in dem Holografien eingeblendet werden können und der folglich den Kernbereich für die Interaktion bildet, relativ klein, was schnell zu Ori-

entierungsschwierigkeiten führt, da sich die Bediener auf einen sehr kleinen Teil ihres Sichtfelds konzentrieren müssen.

- **Begrenzte Reichweite der Kartierung:** Die Hololens baut durch die Live-Kartierung auch Umgebungsmodelle für relativ große Umgebungen von mehr als 20 m Durchmesser auf. Durch die begrenzte Reichweite der Tiefenmessung ist es hierfür aber notwendig, dass sich der Bediener in dieser Umgebung bewegt, damit die Karte vervollständigt werden kann. Zu große Bewegungen führen – insbesondere bei zügiger Bewegungsgeschwindigkeit – dazu, dass die Bewegungsverfolgung Ungenauigkeiten kumuliert und so beispielsweise die Positionen der Hologramme nicht mehr korrekt mit der Realität überlagert werden können. Die reale Position des Referenzpunkts weicht so mit größerem Arbeitsraum und längerer Kartierungsdauer immer mehr von der angenommenen virtuellen Position ab, was zu Ungenauigkeiten im HMI bzw. bei der Hakenposition führt. Dieser Effekt verstärkt sich in Umgebungen mit großen ebenen Flächen, wie es im Nutzungskontext des Ladekrans der Fall ist, da der Hololens in diesem Fall dreidimensionale Strukturen mit Wiedererkennungseffekt fehlen, um Ungenauigkeiten in der Live-Kartierung kompensieren zu können.
- **Begrenzte Reichweite für exakte Holografie-Manipulation:** Sollen Holografien weit weg vom Bediener platziert werden, wird die exakte Manipulation der Zielpunkt-Holografie durch die steigende Entfernung immer schwieriger und ungenauer. Dies fällt insbesondere bei Entfernungen von mehr als 10 m zum Bediener negativ auf. Für Krane mit großem Arbeitsraum oder Hebeaufgaben, bei denen das Ziel der Lastbewegung über 10 m vom Bediener entfernt ist, ist die Hololens als Steuerungseinheit in der aktuellen Form nicht geeignet.
- **Empfindlichkeit gegenüber starkem Sonnenlicht:** Im Gegensatz zur Realsense D435 reagiert die Hololens nicht negativ auf Tageslicht. Starke Sonneneinstrahlung führt jedoch dazu, dass die Holografien kaum mehr zu erkennen sind, weil die Kontraste zwischen der Realumgebung und den virtuellen Elementen im Sichtfeld des Bedieners nicht mehr stark genug sind. Dies konnte auch nicht durch halbtransparente Verdunkelungsfolien auf der Hololens verbessert werden. Außerdem verschlechtert direkte Sonneneinstrahlung die Gestenerkennung, was insgesamt zu einer Verschlechterung der Bedienerfahrung in diesen Situationen führt.
- **Ergonomische Schwächen:** Die Hololens ist mit einer Masse von 579 g nur für kurze Tragezeiten geeignet. Zudem ist die Fixierung über ein verstellbares Kopfband mit Komforteinbußen verbunden. Das Tragen der Brille über mehrere Stunden, wie es bei der Kranfunktbedienung üblich ist, ist aus ergonomischer Perspektive nicht sinnvoll.
- **Begrenzte Akkulaufzeit:** Die dauerhafte Erzeugung der Holografien, die Live-Kartierung sowie die Verarbeitung und Kommunikation der Bedienereingaben führt zu einer Verkürzung der Akkulaufzeit auf unter 2 h. Dies ist für den Demonstratorbetrieb unproblematisch, stellt jedoch für die Übertragung des zielorientierten HMI in die Praxis ein wesentliches Hindernis dar.

- Fehlende Eignung für den Außenbetrieb: Die Hololens ist für den Gebrauch in sauberen Innenräumen konzipiert. Die AR-Brille ist daher nicht ausreichend gegen Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit oder Temperaturschwankungen geschützt. Zudem muss die Hololens vor Verschmutzungen geschützt werden, um Beschädigungen am System und eine Beeinträchtigung der Sensorleistung zu verhindern.

Die meisten der genannten Limitationen stellen zum gegenwärtigen Zeitpunkt wesentliche Hindernisse für die Evaluation der Steuerung im vorgegebenen Nutzungskontext dar, wenn realitätsnahe Aufgaben im gesamten Arbeitsbereichs des Ladekrans durchgeführt werden sollen.

8.4 Beantwortung der Forschungsfrage 3

8.4.1 Konsequenzen der Limitationen

Forschungsfrage 3c (Steuerungs-/Regelungskonzept) wurde bereits im Rahmen von Abschnitt 7.3 beantwortet. Die beiden zielorientierten Interaktionsparadigmen funktionieren grundsätzlich im Nutzungskontext des Ladekrans für die Zielvorgabe. Die beiden ausgewählten Interaktionselemente sowie die darauf aufbauend entstehenden Interaktionsparadigmen eignen sich für die Eingabe des Bedienerwunschs (Ziel der Lastbewegung) und resultieren in einer entsprechend kompatiblen Hakenbewegung (Forschungsfrage 3a). Die Zielposition kann bei beiden zielorientierten Interaktionsparadigmen über die MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)-Sensorik der Hololens bzw. die Tiefenmessung der Kamera bei der Lichtpunktsteuerung erfasst werden, weist jedoch Ungenauigkeiten auf, die nicht beseitigt werden konnten. Ein wesentliches Hindernis bei der Beantwortung von Forschungsfrage 3b ist, dass die Vorgabe der Zielposition nur in sehr engen Grenzen funktioniert, und durch äußere Bedingungen (Lichtverhältnisse, Abstand des Zielpunkts vom Bediener) wesentlich negativ beeinflusst wird. Es ist nicht auszuschließen, dass zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit bereits leistungsstärkere Technologie zur Verfügung steht, die einige der genannten Hindernisse behebt. Nichtsdestotrotz muss zum aktuellen Zeitpunkt zugegeben werden, dass Forschungsfrage 3b (Ermittlung der gewünschten Lastbewegung) im Hinblick auf ein zielorientiertes HMI derzeit nur vorläufig beantwortet werden kann.

Daraus resultiert, dass die Umsetzung der zielorientierten Interaktionsparadigmen derzeit nicht in einer Art und Weise möglich ist, dass weiterführende Untersuchungen durch Probandenstudien im realen Nutzungskontext am Ladekran (und damit die Beantwortung von Forschungsfrage 4: Evaluation) möglich sind. Eine entsprechende Evaluation der zielorientierten HMIs am realen Kran ist aus diesem Grund derzeit nicht sinnvoll. Insbesondere die Frage, ob zielorientierte HMIs zu mentaler Unterbeanspruchung führen, und somit den richtungsorientierten HMIs unterlegen sind, kann somit vorerst nicht untersucht und damit nicht abschließend beantwortet werden.

8.4.2 Ausblick auf zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten

Es ist davon auszugehen, dass die zukünftige technische Entwicklung die robuste und praxistaugliche Umsetzung von zielorientierten HMIs erleichtert. Das kann einerseits dadurch möglich werden, dass die verfügbare Kameratechnologie (Kameras mit Tiefenmessung für den Outdoor-Einsatz auch bei großen Abständen) robust und genau genug für den Einsatz an einem Kran wird und sich entsprechende Zielvorgabekonzepte (z. B. über optische Marker oder andere Leuchtkonzepte) umsetzen lassen. Die Verwendung moderner Kameratechnologie bietet auch weiteres Potenzial für die Implementierung moderner Algorithmen, zum Beispiel für die Objekterkennung mit Hilfe von Computer Vision auf Basis künstlicher neuronaler Netze. Andererseits ist zu erwarten, dass die kurzen Entwicklungszyklen bei elektronischen Produkten und die damit einhergehende Miniaturisierung bei gleichzeitiger Leistungssteigerung dazu führen werden, dass leistungsstärkere, ergonomischere und robustere AR-Werkzeuge erhältlich sind. Es ist davon auszugehen, dass beide Entwicklungsszenarien in Zukunft eine praxistaugliche Umsetzung der zielorientierten HMIs auch in einem realen Nutzungskontext ermöglichen.

9 Gestaltungsmöglichkeiten für richtungsorientierte Steuerungskonzepte

In der Laborstudie (vgl. Kapitel 6) konnte eindeutig gezeigt werden, dass beide nutzerzentrierten HMIs dem traditionellen maschinenzentrierten HMI im Hinblick auf die Intuitivität (als Konsequenz geringerer mentaler Beanspruchung) und die Gebrauchstauglichkeit überlegen sind. Während beim zielorientierten HMI die Gefahr besteht, dass der Bediener mentaler Unterbeanspruchung ausgesetzt wird, zeigt die Untersuchung des richtungsorientierten HMI keine entsprechenden Indizien. Wenn man die vergleichbare Bedienerleistung mitberücksichtigt, ist zu vermuten, dass das richtungsorientierte HMI dem zielorientierten HMI sogar leicht überlegen ist. Aus diesem Grund wird eine weitere Untersuchung des richtungsorientierten HMI als lohnenswert erachtet.

Im Rahmen dieses Kapitels werden zwei mögliche Ausprägungen für das richtungsorientierte HMI abgeleitet. Ausgehend von der Auswahl sinnvoller Eingabemodalitäten (vgl. Abschnitt 3.3 mit Abbildung 3-2) beschreibt dieses Kapitel zwei richtungsorientierte Interaktionsparadigmen (vgl. Abschnitt 3.2 mit Abbildung 3-1), die im Rahmen der Forschungstätigkeiten des Autors umgesetzt wurden. Im iterativen Prozess zur nutzerzentrierten Gestaltung entspricht dies dem „Erarbeiten von Gestaltungslösungen zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen“. Ziel dieses Kapitels ist die Beantwortung von Forschungsfrage 3: Wie können nutzerzentrierte (in diesem Fall: richtungsorientierte) Steuerungskonzepte für Krane mit bewegtem Bediener im realistischen Nutzungskontext aussehen und wie lassen sie sich umsetzen?

Einzelne Inhalte dieses Kapitels wurden vom Autor in [Top-2018c], [Top-2020b] und [Pra-2022] vorveröffentlicht.

9.1 Interaktionselemente zur Richtungsvorgabe

Die gewünschte Bewegungsrichtung der Last ist die Haupteingabe für das richtungsorientierte HMI. Die Bewegungsvorgabe soll dabei aus der Perspektive des Nutzers geschehen, der zu diesem Zweck die Funksteuerungseinheit mitführt. Aus der Kombination der aktuellen Nutzerorientierung (Messgröße) mit der – aus der aktuellen Perspektive – vorgegebenen Bewegungsrichtung (Eingabegröße) wird über eine Koordinatentransformation die gewünschte Bewegungsrichtung im Krankoordinatensystem berechnet. Wie schon beim zielorientierten HMI werden die Bewegungen des Hakens in der horizontalen Ebene von den Vertikalbewegungen entkoppelt und die Horizontal- bzw. Vertikalbewegungen

werden separat angesteuert. Zur Vorgabe der gewünschten horizontalen Bewegungsrichtung wird ein Eingabeelement benötigt, das die Spezifikation einer Bewegungsrichtung in zwei Koordinatenrichtungen (xy-Ebene, siehe Abbildung 5-3) ermöglicht. Koordinatengebende 1D-Interaktionselemente sowie alle Formen der nicht-koordinatengebenden Interaktionselemente scheiden hierfür grundsätzlich aus. Berücksichtigt man zudem die Basisanforderungen für nutzerzentrierte Steuerungskonzepte, scheiden weitere 2D- und 3D-Interaktionselemente aus:

- **Eye-Tracking, Datenhandschuh und Gestenerkennung** sind Laborwerkzeuge und eignen sich zum aktuellen Zeitpunkt nicht für Einsatz im industriellen bzw. industriennahen Umfeld [VDI-3850-2, S. 12].
- **Pointer und AR-Eingaben** eignen sich nicht für die Richtungsvorgabe im vorgegebenen Nutzungskontext (vgl. Limitationen der zielorientierten Steuerungskonzepte in Abschnitt 8.3).
- **Markertracking** erfordert eine für die Richtungsvorgabe aufwendige Infrastruktur wie Kameras oder RFID-Reader zur Ausleuchtung des gesamten Arbeitsraums.

Übrig bleiben indirekte Interaktionselemente (Maus, 3D-Maus, Trackpoint, Trackball, Joystick, Touchpad, Grafiktablett) sowie die direkte Interaktion über einen Touchscreen. Um die beiden verbleibenden Gruppen von Eingabeelementen vergleichen zu können, werden sowohl ein indirekt als auch ein direkt wirkendes Interaktionselement ausgewählt:

1. Vorgabe der gewünschten Bewegungsrichtung durch einen Joystick (indirektes Interaktionselement)
2. Vorgabe der gewünschten Bewegungsrichtung durch Wischbewegungen auf einem Tablet mit Touchscreen (direktes Interaktionselement)

Mit beiden Eingabemöglichkeiten kann der Bediener eine Bewegungsrichtung in der xy-Ebene aus seiner Sicht spezifizieren. Diese muss anschließend vom System unter Berücksichtigung der aktuellen Bedienerorientierung in das Koordinatensystem des Krans übertragen werden (Mapping), um durch die Kransteuerung automatisch angesteuert werden zu können.

Zur parallelen Kontrolle der Vertikalbewegung der Last während der Bewegung in der gewünschten Richtung wird für das richtungsorientierte HMI eine zweite Eingabemöglichkeit für die Bewegung der Last in z-Richtung benötigt:

1. Die Steuerung der z-Bewegung erfolgt durch einen zweiten Joystick, der neben dem Joystick für die xy-Bewegung auf der Steuerung angeordnet ist.
2. Die Steuerung der z-Bewegung bei der Touchscreensteuerung erfolgt durch die bekannte Zoom-Bewegung (Pinch-Geste).

9.2 Technische Umsetzung des richtungsorientierten Interaktionsparadigmas

Die vom Bediener zu lösende Aufgabe (Bewegungswunsch) in Kombination mit der sensorischen Perzeption der aktuellen (Start-)Position des Hakens sowie der Umgebung der Last bestimmt den gewünschten (Zwischen-)Zielort. Davon ausgehend durchläuft die Mensch-Maschine-Interaktion vier Schritte (vgl. Interaktionsparadigma in Abbildung 3-1):

1. Kognitive Verarbeitung: Der Bewegungswunsch wird auf die Funktionsweise des HMI übertragen (mentale Kodierung des Bewegungswunschs in die Funktionsweise des HMI). Hierfür muss aus der räumlichen Differenz zwischen Start- und Zielort unter Berücksichtigung der Umgebung (z. B. vorhandene Hindernisse) vom Bediener mental ein Bewegungspfad generiert werden. Die Bewegungsrichtungen der Last, die zum Erreichen des Bewegungswunschs notwendig sind, resultieren aus dem Verlauf des Pfads.
2. Motorische Handlung mit dem Interaktionselement: Vorgabe der Bewegungsrichtung durch Bedienen des Eingabeelements. Die Bewegung des Eingabeelements ist dabei stets parallel zur Bewegungsrichtung, die sich aus dem Pfad ergibt. Die Intensität der Eingabe (z. B. Auslenkungswinkel) korrespondiert mit der Bewegungsgeschwindigkeit. Wenn der Pfad aus Schritt 1 keine gerade Linie darstellt, muss die Eingabe am Interaktionselement dem Pfadverlauf während der Bewegung nachgeführt werden.
3. Signal: Ausgabe einer elektrischen Stellgröße innerhalb des Steuerungssystems, um den Bedienerwunsch (Bewegungsrichtung) im System aufnehmen und verarbeiten zu können. Die Intensität der Stellgröße wird durch Potentiometer (Joystick-Steuerung: Auslenkung und Richtung) oder durch die Messung der gewünschten Distanz (Tablet: Wischlänge und -richtung) festgelegt.
4. Verarbeitung (Steuerungslogik): Berechnung des Bewegungsvektors für den Haken, Berechnung der notwendigen Freiheitsgrad-Bewegungen durch die inverse Kinematik, Generierung von Bewegungsbefehlen.

Nach Abschluss der vier Schritte führt das Steuergerät des Krans die notwendigen Aktionen aus, so dass die Aufgabe schließlich erfüllt ist. Die konkrete technische Umsetzung des Interaktionsparadigmas „richtungsorientierte Laststeuerung“ für die beiden alternativen Eingabeelemente wird im Folgenden kurz erläutert.

9.2.1 Richtungsvorgabe durch Joysticks

Für die Joystick-Steuerung wird auf die kommerzielle Funksteuerungs-Plattform technos A der Firma HBC-radiomatic zurückgegriffen. Auf der Empfängerseite der Funksteuerung kommt ein Empfänger vom Typ FSE 727 radiobus des gleichen Herstellers zum Einsatz. Der Empfänger gibt alle Steuerungssignale in Form eines CANopen-Safety-Bussignals aus

und kann so direkt an das Steuergerät der nutzerzentrierten HMIs angeschlossen werden. Die wichtigsten technischen Daten der Sender-/Empfängerkombination sind in Tabelle 9-1 dargestellt.

Tabelle 9-1: Technische Spezifikation der Joystick-Steuerung (Auswahl) [HBC-2017a; HBC-2017b]

Sender	Abmessungen, Masse	255 mm x 162 mm x 169 mm; ca. 1,8 kg
Sender	Akkulaufzeit (Dauereinsatz)	ca. 20 h
Empfänger	Schnittstelle	CANopen Safety
Empfänger	Abmessungen, Masse	165 mm x 165 mm x 115 mm; ca. 2,6 kg
Sender + Empfänger	Funktechnologie	2,4 GHz Industriefunk (ISM)
Sender + Empfänger	Betriebstemperaturbereich	-20 °C - 70 °C
Sender + Empfänger	Sicherheitsfunktion	NOT-STOP: Performance Level d, Kategorie 3 nach [DIN-13849-1]
Sender + Empfänger	Frequenzbereich	ISM-Band um 2,4 GHz (2402 MHz - 2480 MHz)

Die optimale Konfiguration des Funksenders wird iterativ ermittelt und basiert auf dem Herstellerbaukasten. Die Joystick-Steuerung ist in Abbildung 9-1 abgebildet.

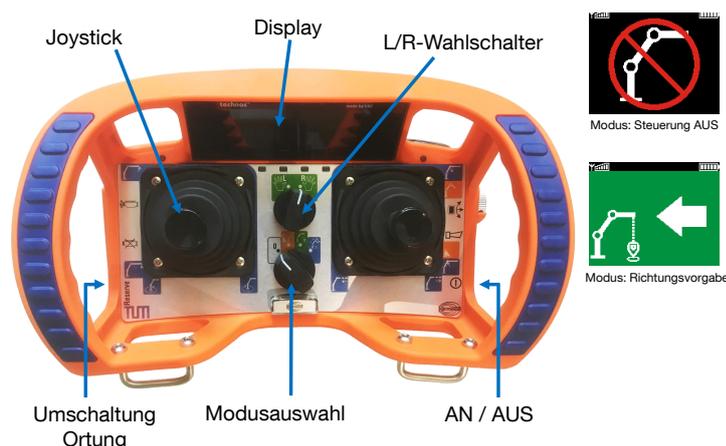


Abbildung 9-1: Funksteuerung: Eingabegerät für die richtungsorientierte Joystick-Steuerung

Zur Steuerung der Kranbewegungen besitzt die Funksteuerung zwei Joysticks mit je zwei DOFs, wovon einer für die Bewegungsvorgabe in der xy-Ebene und der zweite für die Vorgabe der Vertikalbewegung verwendet wird. Auf der Oberseite der Steuerung befinden sich zwischen den Joysticks ein Drehschalter für die Modusauswahl¹⁶ sowie ein weiterer Drehschalter für den Tausch der Joystick-Belegung, mit dem ausgewählt werden kann, welcher der beiden Joysticks für die Richtungsvorgabe in der horizontalen xy-Ebene verwendet werden soll. Die Lastbewegung erfolgt immer parallel zur Auslenkung der Joysticks – unabhängig von der Position und Orientierung des Bedieners. Hierfür wird eine Orientierungsmes-

¹⁶Die Farben blau und orange gehören zu den Betriebsmodi ‚maschinenzentrierte Steuerung‘ (blau) und zu einem Rüstmodus für Auf- bzw. Abbau des Krans (orange). Sie sind nicht Teil des nutzerzentrierten Steuerungskonzepts und werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet. Für Details zu diesen Modi wird auf [Fot-2020, Kap. 5] verwiesen.

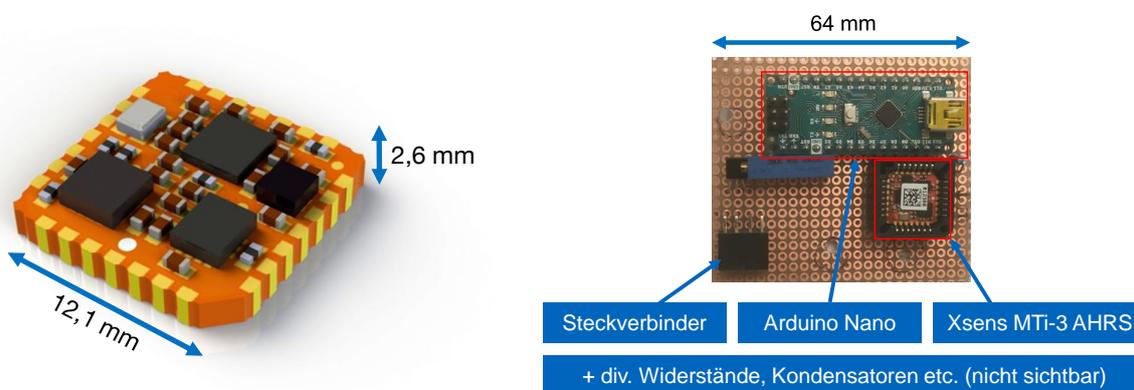
sung in den Funksender integriert (s. u.). Die Beschriftung der Funksteuerung mit Hilfe farbiger Symbole (eine Farbe für jeden Betriebsmodus) sorgt für eine eindeutige Zuordnung der Funktionen zu den Bedienelementen und deren Funktion im gewählten Betriebsmodus. Auf den Displays werden dem Bediener wichtige Informationen (d. h. Informationen, die mit der Kranbewegung zusammenhängen) visuell dargestellt. Im grünen Modus der Richtungsvorgabe erscheinen ein modusspezifisches Symbol sowie ein dynamischer Pfeil, der unter Berücksichtigung der aktuellen Bedienerorientierung zu jedem Zeitpunkt parallel zum Ausleger zeigt (vgl. Abbildung 9-1, ganz rechts). Der Pfeil ermöglicht dem Bediener eine einfache visuelle Überprüfung, ob die Messung der Bedienerorientierung, die in die Funksteuerung integriert ist, korrekt funktioniert. Im Fehlerfall weicht die Pfeilrichtung von der Auslegerrichtung ab, und die Funksteuerung muss neu referenziert werden. Ferner erlauben die Displays eine Menünavigation für weitere Einstellungen.

Zusatzfunktionen, die nicht zur unmittelbaren Bewegung der Krangelenke oder des Hakens dienen, sind auf den Seitenflächen der Funksteuerung als Funktionstaster angebracht. Hierzu gehören ein Ein-/Ausschaltknopf, die Kranhupe, Motor an/aus sowie eine Möglichkeit zur Umschaltung zwischen zwei verschiedenen Ortungsmodi. Im Modus *diskret* wird die aktuell gemessene Bedienerorientierung fixiert („eingefroren“), sobald einer der beiden Joysticks ausgelenkt wird. Während der ausgelösten Kranbewegung wird als Referenzorientierung immer der fixierte Startwert verwendet, auch wenn sich der Bediener während des Bewegungsvorgangs dreht oder bewegt. Sobald beide Joysticks in Nullstellung stehen, wird die Bedienerorientierung wieder aktualisiert. Im Modus *kontinuierlich* erfolgt auch bei einer Bewegung des Bedieners während einer bereits begonnenen Hakenbewegung die Anpassung der Hakenbewegung auf die aktuelle Bedienerorientierung. Im letzteren Fall ist es zum Beispiel möglich, die Bewegungsrichtung der Last während des Bewegungsablaufs zu verändern, in dem – bei konstanter Joystick-Auslenkung – die Funksteuerung um die eigene Hochachse gedreht wird. Im Rahmen der Nutzerstudie zur Untersuchung der richtungsorientierten Konzepte in Kapitel 10 wird untersucht, ob die verschiedenen Ortungsmodi in unterschiedlicher Bedienerleistung und Gebrauchstauglichkeit resultieren.

Der Funksender bietet im Inneren genug Bauraum, um die für die Messung der Bedienerorientierung notwendige Sensorik unterzubringen. Die Messung der Bedienerorientierung erfolgt durch einen Sensor, der die Verdrehung des Funksteuerungs-Koordinatensystems relativ zum globalen Krankoordinatensystem (Winkel Δ_{Nutzer} in Abbildung 5-3) zuverlässig und robust messen kann. Der Verdrehwinkel der Funksteuerung gegenüber dem Krankoordinatensystem wird als Orientierung bezeichnet. Für die Messung der Bedienerorientierung mit Hilfe von MEMS-Sensorik wird auf ein kommerziell erhältliches System der Firma Xsens Technologies zurückgegriffen. Es handelt sich um den Sensorbaustein MTi-3 AHRS¹⁷ (siehe Abbildung 9-2). Ähnliche Elektronikbausteine existieren auch von anderen Herstellern.

¹⁷ AHRS: Attitude Heading Reference System. Messsystem zur Bestimmung von Roll-, Nick- und Gierwinkel. Zu den technischen Details der Sensorauswahl siehe [Fot-2020, Kap. 5.4].

Der MTi-3 besitzt ein 3-Achs-Magnetometer zur Magnetfeldmessung, ein 3-Achs-Gyroskop zur Messung von Drehbeschleunigungen sowie ein 3-Achs-Accelerometer zur Messung von Linearbeschleunigungen. Diese Sensoren sind im Rendering in Abbildung 9-2a als schwarze Boxen dargestellt. Die Sensoren werden einer Micro-Controller-Einheit (MCU) ausgewertet und zu Roll-, Nick- und Gierwinkel fusioniert. Die Ausgabe der Messrohdaten sowie der fusionierten Orientierungswinkel erfolgt über verschiedene digitale Schnittstellen (u. a. I²C, SPI, UART). Die Datenaufnahme, -verarbeitung und -weitergabe erfolgt durch einen Arduino Nano (siehe Abbildung 9-2b). Die Platine mit dem Sensor, der Datenverarbeitung sowie den physischen Schnittstellen wird in den Funksender integriert, so dass der Sensor die Bewegungen des Funksenders erfasst.



(a) Rendering des MEMS-Bausteins [Xse-2018]

(b) Einbaufertiger Sensor inkl. Datenverarbeitung (Arduino Nano)

Abbildung 9-2: MEMS-Sensorbaustein MTi-3 AHRS der Firma Xsens Technologies

Die Auswahl eines passenden Fusionsalgorithmus für die Orientierungsmessung aus den vorhandenen IMU-Rohdaten sowie die Konfiguration der weiteren Einstellungen (Datenformat, Updaterate etc.) erfolgt über eine Konfigurationssoftware der Firma Xsens. Es wird ein mitgelieferter Sensorfusionsalgorithmus ausgewählt, der für die Berechnung von Roll-, Nick- und Gierwinkel vollständig auf die Auswertung des Magnetfelds verzichtet, was sich als die robusteste Konfiguration gegenüber elektromagnetischen Feldern und anderen Störungen des Erdmagnetfelds (z. B. durch Stahlarmierung in Betonböden) zeigt. Das Profil eignet sich sehr gut für Umgebungen mit einem durch äußere Einflüsse schwer gestörten Magnetfeld [Xse-2018, S.19], wie es im industriellen Umfeld der Kranbedienung oft der Fall ist. Nachteilig am Verzicht auf die Magnetfelddaten ist, dass auf Basis der Beschleunigungen lediglich eine Messung der Orientierung relativ zu einem Initialisierungspunkt möglich ist, und keine absolute Positionsmessung (Messung mit Referenz zum Nordpol). Zur Lösung dieses Problems wird beim Einschalten des Funksenders eine Initialisierung des Messsystems durchgeführt und sichergestellt, dass sich die Steuerung zu diesem Zeitpunkt in einer festen Orientierung an einem Referenzpunkt befindet. Hierfür kommt eine Halterung zum Einsatz, in die der Funksender für den Einschaltvorgang eingelegt werden

muss, und die fest am Kranrahmen angebracht wird (s. Abbildung 9-3). Die mit Hilfe eines 3D-Druckers hergestellte Halterung ist so gestaltet, dass die Funksteuerung nur in der korrekten Orientierung in die Kiste gestellt werden kann (Poka Yoke). Eine eindeutige Referenzierung ist somit stets gewährleistet. Da die Box fest am Kranrahmen verbaut und damit mit dem globalen Krankoordinatensystem x_{global}, y_{global} (vgl. Abbildung 5-3) verbunden ist, eignet sich diese Form der Referenzierung auch für Krane, deren Position veränderlich ist.



Abbildung 9-3: Box zur Referenzierung der Funksteuerung im Bezug auf das Krankoordinatensystem

Der MEMS-Baustein in der Funksteuerung misst die Verdrehung des Funksteuerungs-Koordinatensystems (Winkel Δ_{Nutzer}) relativ zum globalen Koordinatensystem zuverlässig und robust. Untersuchungen des Autors in [Fot-2020] zeigen, dass die Orientierungsmessung auch unter widrigen Bedingungen die Ausrichtung des Bedieners mit der erforderlichen Genauigkeit (ergonomischer Erfahrungswert: ausreichend sind $\pm 10^\circ$ über eine Zeitdauer von mindestens 90 min in statischen und dynamischen Szenarien) korrekt ermittelt.

Mit der umgesetzten Orientierungsmessung in Kombination mit der Messung der Hakenposition über die Stellung der einzelnen DOFs (s. Abschnitt 7.2) sind somit alle Informationen bekannt, um den Bewegungswunsch von der Joystick-Eingabe im Bedienerkoordinatensystem auf das Krankoordinatensystem umzurechnen. Durch Multiplikation mit einer Rotationsmatrix wird die Joystick-Eingabe vom Bedienerkoordinatensystem in globale Koordinaten umgerechnet. Die Messung der Freiheitsgrad-Stellungen ermöglicht anschließend eine weitere Koordinatentransformation ins Hakenkoordinatensystem, so dass letztendlich die gewünschte Hakenbewegung (Ausgabe) parallel zur Bedienereingabe resultiert. Die inverse Kinematik erhält die entsprechend resultierende Hakengeschwindigkeit als Wunschvorgabe und das Steuergerät der nutzerzentrierten HMIs übernimmt die Ansteuerung der einzelnen Antriebe. Die Hakenbewegung ist stets parallel zur Richtung der aktuellen Joystick-Auslenkung. Die Hakengeschwindigkeit korrespondiert mit dem Auslenkungswinkel. Für die Bewegung in der z-Achse wird eine Bewegung des Joysticks nach vorne (also vom Bediener weg) als ein Bewegungswunsch nach oben interpretiert, wie es gängigen Populationsstereotypen entspricht (vgl. Kurzstudie in Abschnitt 5.4.1).

Die Richtungsvorgabe mit Hilfe von Joysticks funktioniert im bekannten Nutzungskontext am Ladekran zuverlässig, robust und fehlerfrei.

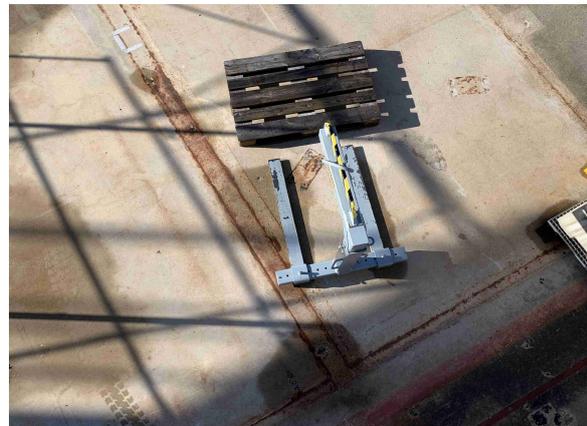
9.2.2 Richtungsvorgabe mit Hilfe eines touchfähigen Tablets inkl. passender App

Für die Richtungsvorgabe über ein Tablet wird eine eigens erstellte App verwendet. Die App dient einerseits dazu, die gewünschte Hakenbewegung zu erfassen und andererseits dem Kranführer alle notwendigen Informationen zur Verfügung zu stellen sowie alle weiteren Kranfunktionen zu steuern. Es wird angenommen, dass die überwiegende Mehrheit der potenziellen Kranbediener bereits mit Touch-Geräten vertraut ist. Die App ist in C# unter Verwendung der Grafikumgebung Unity und nach den weltweit gültigen Designrichtlinien der Universal Windows Platform realisiert. Dadurch wird sichergestellt, dass möglichst viele Bediener die App auf Anhieb verstehen und die App ohne oder mit wenig Erklärung genutzt werden kann.

Um zusätzliche Informationen über die Last und die Umgebung des Krans auf dem Bildschirm des Tablets bereitzustellen, wird eine Kamera an der Auslegerspitze des Krans neben dem Haken montiert (siehe Abbildung 9-4a). Die Kamera zeigt eine Draufsicht auf die Umgebung der Last, wie sie beispielhaft in Abbildung 9-4b zu sehen ist.



(a) Kamera an der Auslegerspitze [Dan-2019]



(b) Blickfeld (beispielhaft)

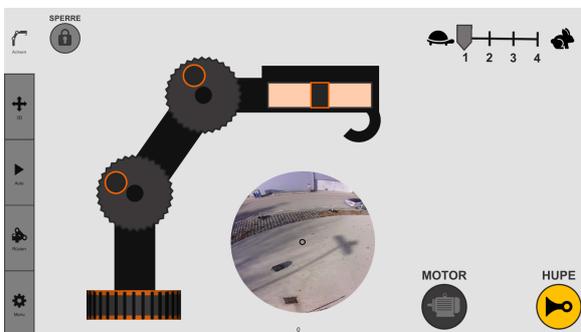
Abbildung 9-4: Kamera für Live-Draufsicht auf die Hakenumgebung

Die Tablet-App zeigt den aktuellen Betriebszustand und die Kameraansicht an. Gleichzeitig erfasst es die Touch-Eingaben des Bedieners. Neben den Vorgaben für die Haken- bzw. Freiheitsgrad-Bewegungen können über Funktionsschaltflächen z. B. der Motor an/aus geschaltet oder die Hupe betätigt werden. Das Tablet ist drahtlos über eine WLAN-Schnittstelle mit einem Raspberry Pi Mini-Rechner verbunden, der die Kamerabilder als Live-Stream zur Verfügung stellt sowie die CAN-Signale für die Bewegungsvorgabe generiert, die dann vom Steuergerät der nutzerzentrierten HMIs über die inverse Kinematik in Freiheitsgrad-Bewegungen umgesetzt werden. Tabelle 9-2 gibt einen Überblick über die verwendeten Hardwarekomponenten.

Tabelle 9-2: *Komponenten der Tablet-Steuerung*

Tablet	Panasonic FZ-G1 (rugged); Betriebssystem: Windows 10
Kamera	SJCAM SJ4000 Action Cam
Datenverarbeitung	Raspberry Pi 3 Model B+ mit PiCAN2 Shield

Die grafische Benutzeroberfläche (engl.: GUI (Graphical User Interface)) wird mit Hilfe von iterativen Vor- und Detailentwürfen mit Feedback-Schleifen gestaltet. In das Design fließen dadurch die Meinungen von Experten für Software-Ergonomie und Kranbedienung sowie von Industriepartnern ein. Das Endergebnis ist eine Oberfläche mit verschiedenen Betriebsmodi und einem Menü. So kann der Bediener immer die beste Steuerung für die aktuelle Anwendung auswählen. Die zwei für die vorliegende Arbeit relevanten Steuerungsmodi sind in Abbildung 9-5 dargestellt.

(a) *Manueller (maschinenzentrierter) Tablet-Modus*(b) *Richtungsorientierter 3D-Modus [Dan-2019]*Abbildung 9-5: *Tablet-GUI zur richtungsorientierten Laststeuerung*

Der 3D-Modus (Abbildung 9-5b) erlaubt die direkte Vorgabe einer gewünschten Hakenbewegung: In einem Live-Bild von der Auslegerspitze (Draufsicht) gibt der Bediener die Hakenbewegung durch Wischen in die gewünschte Richtung vor. Die Länge der Wischbewegung korrespondiert mit der Hakenbewegungsgeschwindigkeit. Richtung und Intensität der Eingabe werden über einen dynamischen Pfeil visualisiert, der im Kamerabild beim Wischen erscheint. Sobald der Bediener den Finger vom Display entfernt, verschwindet der dynamische Pfeil und der Haken bleibt stehen. Die Höhe des Hakens kann mit der bekannten Zoom-Geste (Zwei-Finger-Bedienung) gesteuert werden. Die maximal mögliche Hakenbewegungsgeschwindigkeit kann über einen Schieberegler mit der bei Arbeitsmaschinen etablierten Schildkröte/Hase-Symbolik eingestellt werden. Das Live-Bild der Kamera an der Auslegerspitze gibt dem Bediener auf dem Tablet eine direkte Rückmeldung über die Hakenbewegung und unterstützt die Feinpositionierung. Die Bewegung des Hakens erfolgt immer parallel zur Eingabegeste des Bedieners, unabhängig von dessen Position. Eine Live-Messung der Bedienerorientierung, wie sie für die richtungsorientierte Joystick-Steuerung beschrieben ist, kann analog für die Tablet-App umgesetzt werden, so dass auch in diesem Fall eine Steuerung direkt aus der Perspektive des Bedieners, unabhängig von seiner aktuellen

Position und Orientierung, möglich ist. Für die grundsätzliche Untersuchung des Tablet-GUI wird hierauf jedoch verzichtet. Stattdessen kann der Bediener das Tablet drehen, so dass die Orientierung des Tablets immer zur aktuellen Orientierung des Krans passt. Das Live-Bild unterstützt den Bediener bei der Überprüfung, ob das Tablet korrekt ausgerichtet ist, damit die Hakenbewegung tatsächlich parallel zur Wischbewegung am Tablet resultiert.

Im zusätzlich umgesetzten manuellen Modus (siehe Abbildung 9-5a) steuert der Bediener alle einzelnen Gelenke des Krans durch Berühren der Gelenke und Auslenkung entsprechender Stellschaltflächen auf einem virtuellen 2D-Kranmodell. Es handelt sich um eine maschinenzentrierte Steuerung ohne Auslegerspitzensteuerung. Trotzdem vereinfacht der manuelle Modus bereits die Zuordnung der Eingabehebel zu den entsprechenden Krangelenken im Vergleich zum standardmäßigen maschinenzentrierten HMI mit Icons, da er die Gelenke und ihre Bewegungen dynamisch visualisiert. Er kann somit – über den richtungsorientierten 3D-Modus hinaus – als zusätzlicher Modus für spezielle Aufgaben betrachtet werden, bei denen es wichtig ist, die Gelenke separat zu steuern. Der Vollständigkeit halber wird der manuelle App-Modus in Kapitel 10 den richtungsorientierten HMIs gegenübergestellt, auch wenn er keine richtungsorientierte Eingabe ermöglicht.

Sowohl die Richtungsvorgabe als auch die maschinenzentrierte Freiheitsgrad-Steuerung funktionieren mit Hilfe der Tablet App im bekannten Nutzungskontext am Ladekran zuverlässig, robust und fehlerfrei.

9.3 Limitationen

Die beiden Interaktionselemente für die Richtungsvorgabe (Joystick und Touchscreen) wurden systematisch durch ein Ausschlussverfahren aus den verfügbaren Eingabeelementen ermittelt. Für die Umsetzung beider Interaktionsparadigmen wird auf etablierte Hardware zurückgegriffen. Dies ist einerseits eine marktübliche Joystick-Funksteuerung, die durch einen Orientierungssensor erweitert wird, und andererseits ein industrietaugliches Tablet.

Beide richtungsorientierten Konzepte weisen Schwächen im Hinblick auf die Basisanforderung auf:

- Verwendung von nicht-sicherheitszertifizierten Kommunikationsprotokollen beim Tablet (WLAN)
- Verwendung von nicht-sicherheitszertifizierbarer Hardware (Tablet, Raspberry Pi, Sensor zur Orientierungsmessung)

Die zwei genannten Punkte sind jedoch lediglich eine Frage der konkreten Implementierung bzw. Komponentenauswahl und haben keinen Einfluss auf die grundsätzliche Eignung der richtungsorientierten HMIs.

Eine Limitation der richtungsorientierten Joystick-Steuerung ist die implementierte Messung der Bedienerorientierung. Die korrekte Funktion der Umrechnung des Bedienerwunschs auf die Hakenbewegung setzt eine korrekte und robuste Messung der Bedienerorientierung voraus. Dies kann zwar mit dem entwickelten Messkonzept zufriedenstellend erreicht werden, jedoch ist das Sensorverhalten nicht so stabil, wie es wünschenswert wäre. Lange Laufzeiten der Steuerung (> 90 min) sowie Temperaturen außerhalb des Bereichs von 15°C - 25°C führen zu einem über die Zeit zunehmenden Messfehler. Es ist zu erwarten, dass verbesserte Sensorik (softwareseitige Temperaturkalibrierung) diese Schwächen effizient beseitigen kann.

Tabelle 9-3: Richtungsorientiertes HMI: Berücksichtigung der Grundsätze der Dialoggestaltung

Lernförderlichkeit, Fehlertoleranz, Steuerbarkeit	Die konsequente Farbkodierung der Betriebsmodi über die HMIs hinweg fördert die eindeutige Identifikation des ausgewählten HMI und dadurch die schnelle Informationsaufnahme und -verarbeitung. Bei der Farbgestaltung wurden zudem ergonomische Gesichtspunkte berücksichtigt, z. B. durch Vermeidung von chromatischer Aberration. Die Funktionen innerhalb der Modi werden mit Hilfe von eindeutig identifizierbaren Symbolen visualisiert und bieten zusätzlich zur Farbe einen eindeutigen Wiedererkennungseffekt.
Erwartungskonformität, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Lernförderlichkeit	Alle Stellteile und Schaltflächen wurden so gestaltet, dass aus ihrer Form die Funktion und die Art der Interaktion hervorgeht, um den Bediener bestmöglich anzuleiten. Hierfür wurde auf etablierte Designrichtlinien (z. B. Universal Windows Plattform) oder breit vorhandene Vorerfahrung (Funktionsweise eines Joysticks) zurückgegriffen, um möglichst niedrige Ebenen im Kontinuum des Wissens anzusprechen.
Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Individualisierbarkeit	Um eine vereinfachte Informationsdarstellung zu erreichen, werden dem Bediener nur die Informationen angezeigt, die den aktuellen Betriebszustand beschreiben. Weitere Informationen können individuell im Menü abgerufen werden.
Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Lernförderlichkeit	Zusatzfunktionen, die ständig und schnell zugänglich sein sollen, sind auf seitlich angebrachte Funktionstasten ausgelagert und durch eindeutige Symbole beschriftet oder als Schaltflächen mit Symbolen auf der sichtbaren Oberseite platziert. Die Oberfläche nicht von oben sichtbarer Taster ist leicht abgesetzt, so dass die Taster ohne Sichtkontakt mit dem Finger gefunden und betätigt werden können.
Aufgabenangemessenheit	Auf weitere Zusatz Tasten, die nicht zur unmittelbaren Kransteuerung benötigt werden, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. So ist zum Beispiel kein Zustimm- oder Totmannschalter verbaut.
Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Aufgabenangemessenheit	Die Hakenbewegungen sind zu jeder Zeit kompatibel zu den Bedienereingaben.

Als wesentliche Limitation der Tablet-Steuerung ist die Empfindlichkeit der Kamera gegenüber Umwelteinflüssen zu nennen. Um eine Anzeige der Kamera-Draufsicht von der Auslegerspitze auf dem Tablet zu ermöglichen, muss die Kamera vor äußeren mechani-

schen Einwirkungen und Verschmutzung geschützt werden. Dies ist durch eine entsprechende Kapselung zu erreichen und sollte in Zukunft berücksichtigt werden.

Als letzte konzeptionelle Limitation bleibt zu nennen, dass die konkrete Gestaltung der beiden richtungsorientierten Interaktionsparadigmen durch Einbeziehung von Experten aus dem Bereich Ergonomie und Kransteuerung in mehreren Iterationsschleifen erfolgt ist. Es ist daher nicht auszuschließen, dass auch andere Gestaltungen für eine richtungsorientierte Laststeuerung in Frage kommen und sich ebenso eignen wie die beiden umgesetzten Konzepte. Dies hätte auch einen potenziellen Einfluss auf die Ergebnisse der Bedienerstudie aus dem folgenden Kapitel. Bei der Gestaltung der richtungsorientierten Interaktionsparadigmen wurden jedoch nicht nur individuelle (Experten-)Meinungen berücksichtigt, sondern insbesondere auch die Grundsätze der Dialoggestaltung für die Gestaltung von gebrauchstauglichen HMLs mit einbezogen (vgl. Tabelle 9-3), so dass davon ausgegangen wird, dass die resultierenden Interaktionsparadigmen eine gewisse Universalität aufweisen und Evaluationsergebnisse nicht zu stark von Individuallösungen verzerrt werden.

9.4 Beantwortung der Forschungsfrage 3

Die beiden richtungsorientierten Interaktionsparadigmen funktionieren zuverlässig und robust im Nutzungskontext des Ladekrans. Die beiden ausgewählten Interaktionselemente sowie die darauf aufbauend entstehenden Interaktionsparadigmen eignen sich für die Eingabe des Bedienerwunschs und resultieren in einer entsprechend kompatiblen Hakenbewegung (Forschungsfrage 3a). Die Bedienerorientierung kann über die MEMS-Sensorik unabhängig vom Interaktionselement zuverlässig erfasst werden, auch wenn sie im Rahmen dieser Arbeit nur in die Joystick-Steuerung integriert wurde, was zur Folge hat, dass bei der demonstratorischen Touchscreen-Steuerung der Bediener für die korrekte Orientierung sorgen muss. Dies wird ihm durch die zusätzliche Kamerasicht auf dem Bildschirm so leicht wie möglich gemacht. Über die Transformation der Bedieneringabe vom Bedienerkoordinatensystem in das Krankoordinatensystem sowie die anschließende Transformation ins Hakenkoordinatensystem mit Hilfe der Freiheitsgrad-Stellungen kann aus der Eingabe des bewegten Bedieners die gewünschte Bewegungsrichtung der Last ermittelt werden (Forschungsfrage 3b). Forschungsfrage 3c (Steuerungs-/Regelungskonzept) wurde bereits im Rahmen von Abschnitt 7.3 beantwortet. Beide richtungsorientierten Interaktionsparadigmen wurden am Ladekran erfolgreich appliziert und funktionieren im Nutzungskontext robust und fehlerfrei. Das Proof of Concept im realen Nutzungskontext ist somit erbracht (Forschungsfrage 3d). Insgesamt gilt Forschungsfrage 3 damit als beantwortet.

10 Evaluation richtungsorientierter Steuerungskonzepte (Studie 2)

Dieses Kapitel dient der Evaluierung der richtungsorientierten Interaktionsparadigmen aus dem vorangegangenen Abschnitt gegenüber dem maschinenzentrierten HMI sowie dem Vergleich der verschiedenen richtungsorientierten HMIs untereinander. Im iterativen Prozess nutzerzentrierter Gestaltung [DIN-9241-210] entspricht dies dem Schritt „Evaluierung von Gestaltungslösungen anhand der Anforderungen“.

Im Gegensatz zu Kapitel 6 werden in dieser Studie die implementierten HMIs außerhalb der Laborumgebung im Praxiseinsatz an einem realen Kran im realistischen, industrienahe Nutzungskontext evaluiert. Hierdurch wird untersucht, ob die im Labor nachgewiesenen Effekte auch in der Praxis nachgewiesen werden können und wie sich die Effekte durch die praktische Implementierung verändern. Bedingt durch die schwerwiegenden Limitierungen der zielorientierten Interaktionsparadigmen für das Proof of Concept im realen Nutzungskontext kann die Untersuchung nur für die richtungsorientierten HMIs durchgeführt werden. Ziel dieses Kapitels ist die Beantwortung von Forschungsfrage 4: Welche Effekte und Verbesserungen ergeben sich durch den Einsatz von nutzerzentrierten HMIs (hier: richtungsorientierte HMIs) im Vergleich zu herkömmlichen Kransteuerungen bei einem Einsatz an einem realen Kran?

Die Untersuchung erfolgt durch eine empirische Probandenstudie, in deren Rahmen die beiden richtungsorientierten Interaktionsparadigmen anhand unabhängiger Hypothesen verglichen werden. Versuchsaufbau und -durchführung erfolgte im Rahmen von [Kro-2019; Hai-2019]. Inhalte dieses Kapitels wurden vom Autor bereits in [Pra-2022], [Fot-2020] und [Top-2020b] vorveröffentlicht.

10.1 Methoden

Für die Evaluation der richtungsorientierten HMIs werden – analog zur empirischen Laborstudie aus Kapitel 6 – Hypothesen im Bezug auf die Bedienerleistung (Ablagegenauigkeit, Zeit zur Aufgabenerfüllung, Bedienfehler) und die subjektive Bedienerzufriedenheit (SUS) formuliert. Da für das richtungsorientierte HMI die Messergebnisse der Laborstudie im Hinblick auf die objektive (Pupillendurchmesser) und subjektive (RTLX) mentale Beanspruchung sehr eindeutig waren und beim richtungsorientierten HMI keine Gefahr der mentalen Unterbeanspruchung identifiziert werden konnte, wird auf die erneute Untersuchung der mentalen Beanspruchung verzichtet. Dies erleichtert die Studiendurchführung erheblich,

da insbesondere die Messung von mentaler Beanspruchung mit objektiven, psychophysiologischen Maßen außerhalb einer kontrollierten Laborumgebung äußerst anspruchsvoll ist und sehr sensitiv auf (meist unvermeidbare) Änderungen der Umgebungsbedingungen reagiert. Die empirische Probandenstudie untersucht die richtungsorientierten HMIs daher ausschließlich im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit, um daraus – in Kombination mit den aus der Laborstudie bekannten Einflüssen auf die mentale Beanspruchung – Rückschlüsse auf die Intuitivität der richtungsorientierten HMIs im Vergleich zum maschinenzentrierten HMI ziehen zu können.

10.1.1 Messung der Gebrauchstauglichkeit

Als Leistungsmaße für die Dimensionen Effektivität und Effizienz der Gebrauchstauglichkeit werden Metriken zur Erfüllung der Primäraufgabe, also der Bewegung einer Last, verwendet. Zudem wird die Zufriedenheit der Probanden gemessen, so dass alle Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit erfasst werden. Die Messung erfolgt über vier AVs (abhängige Variablen):

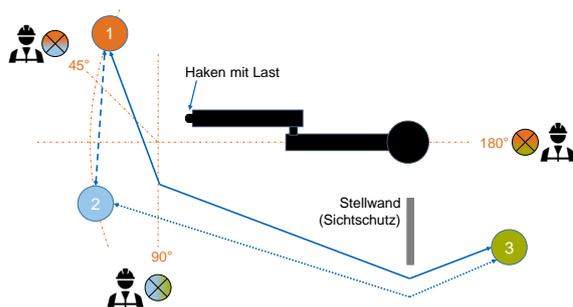
- Die Messung der **Ablagegenauigkeit** wird als Effektivitätsmaß verwendet (d. h. Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Bediener ein bestimmtes Ziel erreichen).
- Zur Messung der Effizienz werden die benötigte **Zeit zur Aufgabenerfüllung** sowie die während der Aufgabenerfüllung gemachten **Fehler** erfasst (d. h. im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzter Aufwand, mit dem Bediener ein bestimmtes Ziel erreichen).
- Die Messung der Zufriedenstellung (d. h. Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellungen gegenüber der Nutzung des Produkts, Abwesenheit von Frustration) erfolgt über einen etablierten, standardisierten Fragebogen, den **SUS**.

Bezüglich der Gründe für die getroffene Auswahl wird auf Abschnitt 2.1 verwiesen.

10.1.2 Versuchsaufbau

Die Probandenstudie wird an einem Ladekran (vgl. Kapitel 7) durchgeführt. Um die richtungsorientierten HMIs im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit zu untersuchen, werden realitätsnahe Lastbewegungen als Aufgaben definiert. Start und Ziel für jede Aufgabe werden durch Paletten mit einer Zahl markiert (1, 2 oder 3: vgl. Abbildung 10-1a). Die Paletten besitzen neben der Nummerierung eine farbige Zielscheibe mit acht konzentrischen Kreisen im Abstand von je 8 cm, mit der die Genauigkeit der Lastpositionierung beim Absetzen auf der Zielpalette erfasst werden kann (vgl. Abbildung 10-1b). Für jede Aufgabe ist ein Punkt definiert, an dem sich der Bediener zu Beginn der Aufgabe befinden muss (Kreise mit Kreuzmarkierung in Abbildung 10-1a, Sperrholzplatten mit Kreuzmarkierung in Abbildung 10-1b). Während der Aufgabe darf der Bediener diesen Punkt verlassen, sofern er

das möchte. Die Startpunkte sind für jede Aufgabe in einem anderen Winkel zum Krankoordinatensystem angeordnet, so dass der Winkel für die mentale Rotation beim maschinenzentrierten HMI bei jeder Aufgabe anders ist. Beim Sichtschutz handelt es sich um eine etwa 1,9 m hohe Stellwand, die umfahren oder überfahren werden muss. Als Last wird ein Schaumstoffwürfel mit der Kantenlänge 0,5 m verwendet, an dessen Unterseite ein Trichter angebracht ist, der zum Ablesen der Positioniergenauigkeit beim Absetzen des Würfels auf der Zielscheibe verwendet wird. Die Last wird mit einer Bandschlinge am Haken angeschlagen.



(a) Skizze des Studienaufbaus (Draufsicht): standardisierte Aufgaben



(b) Studienaufbau am Ladekran

Abbildung 10-1: Versuchsaufbau

Die drei Aufgaben unterscheiden sich in ihrer Komplexität, Länge, den für die Lastbewegung notwendigen Kranbewegungen sowie in der Einsehbarkeit der Strecke. Jede der drei Aufgaben kann in beide Richtungen absolviert werden. Die Aufgaben werden realitätsnah konzipiert und sind wie folgt gewählt:

- Die erste Bewegung (1 ↔ 2) ist mit dem maschinenzentrierten HMI durch eine reine Rotationsbewegung des Krans zu realisieren und relativ kurz. Auch ohne sich zu bewegen hat der Bediener jederzeit freie Sicht auf die Last.
- Die zweite Bewegung (2 ↔ 3) erfordert bei Verwendung des maschinenzentrierten HMIs die Bewegung mehrerer Kran-DOFs, führt knapp an der Sichtschutz-Stellwand entlang und ist ca. 10 m lang. Die Sicht auf die Last ist von der Bediener-Startposition aus nicht behindert.
- Für die dritte Bewegung (3 ↔ 1) muss der Kran mehr als 180° geschwenkt sowie mit der Last die Sichtschutzstellwand über- oder umfahren werden. Diese Bewegung ist gleichzeitig die längste und erfordert in jedem Fall eine Bewegung des Bedieners während der Lastbewegung, um die Last jederzeit sehen zu können. Zudem müssen bei Verwendung eines maschinenzentrierten HMI alle Kran-DOFs bewegt werden.

Es werden insgesamt fünf verschiedene Steuerungsmodi miteinander verglichen:

1. **Traditionelles, maschinenzentriertes HMI** mit zwei Joysticks mit je zwei Bewegungsrichtungen für die vier Kran-DOFs (blauer Bedienmodus in Abbildung 9-1 auf Seite 144).
2. **Richtungsorientierte Joystick-Steuerung mit diskreter Orientierungsanpassung** zur Vorgabe der Bewegungsrichtung durch Joystick-Auslenkung. Die Messung der Bedienerorientierung wird beim aktuellen Wert fixiert, sobald einer der beiden Joysticks ausgelenkt wird. Während der gesamten folgenden Kranbewegung wird für die Bedienerorientierung immer der fixierte Startwert verwendet, auch bei einer Drehung des Bedieners während der laufenden Bewegung. Sobald beide Joysticks wieder in Nullstellung stehen, wird die Bedienerorientierung neu aktualisiert.
3. **Richtungsorientierte Joystick-Steuerung mit kontinuierlicher Orientierungsanpassung** zur Vorgabe der Bewegungsrichtung durch Joystick-Auslenkung. Bei einer Bewegung bzw. Drehung des Bedieners während einer bereits begonnenen Hakenbewegung erfolgt die Anpassung der Hakenbewegung dynamisch, so dass die Bewegung parallel zur Auslenkungsrichtung der Joysticks in Kombination mit der veränderten Orientierung des Bedieners bleibt.
4. **Maschinenzentrierte Tablet-Steuerung** für die Ansteuerung der einzelnen Kran-DOFs durch Berühren der Gelenke eines virtuellen 2D-Kranmodells.
5. **Richtungsorientierte Tablet-Steuerung** zur Vorgabe der gewünschten Hakenbewegung durch Wischbewegungen in die entsprechende Richtung im Live-Kamerabild.

Die maximale Hakengeschwindigkeit ergibt sich in den verschiedenen Modi leicht unterschiedlich. Für die beiden maschinenzentrierten HMIs (Joystick und Tablet) ergibt sich die maximale Hakengeschwindigkeit durch die Überlagerung der maximalen Geschwindigkeit aller vier Kran-DOFs, d. h. durch das vollständige Öffnen der vier Hydraulikventile. Je nach aktueller Hakenposition kann das vollständige Öffnen zu sehr hohen Hakengeschwindigkeiten führen, z. B. bei Schwenkbewegungen, wenn der Haken sehr weit von der Kranmitte entfernt ist. Im Fall der richtungsorientierten HMIs wird die Hakenbewegung dagegen computergesteuert ausgelöst. Damit das System die Bewegungen des Hakens sicher steuern kann, ist es notwendig, die Maximalgeschwindigkeit jedes einzelnen Gelenks auf einen Wert unterhalb der Maximalgeschwindigkeit bei der Einzelsteuerung zu begrenzen, um die Regelungsflexibilität jederzeit durch entsprechenden Spielraum zu gewährleisten. Folglich ist die maximale Geschwindigkeit des Hakens für die richtungsorientierten HMIs aufgrund der Konstruktion des Systems niedriger als für die maschinenzentrierten HMIs. Leider ist die Differenz zwischen den beiden Maximalgeschwindigkeiten nicht konstant, sondern hängt vom aktuellen Abstand des Hakens zur Kranmitte und der Position aller aktuellen Gelenke ab. Das wiederum bedeutet, dass der Unterschied, der sich durch die verschiedenen Maximalgeschwindigkeiten bei den zur Aufgabenerfüllung notwendigen Zeiten ergibt, rechnerisch nicht durch einen Offset o. ä. kompensiert werden kann. Dies ist bei der Datenauswertung und -interpretation zur berücksichtigen.

10.1.3 Versuchsablauf

Zu Beginn des Versuchs füllt jeder Proband einen Eingangsfragebogen aus, der die demographischen Daten wie Alter, Geschlecht und die Vorerfahrung mit Kransteuerungen – unabhängig vom Krantyp oder dem verwendeten HMI – abfragt. Abhängig von der Selbsteinschätzung zur Vorerfahrung werden die Probanden der Gruppe Experten (d. h. mit Vorerfahrung) oder Novizen (ohne Vorerfahrung) zugeteilt. Anschließend folgt eine Einführung in die Aufgabenstellung und den Versuchsablauf. In jedem Modus wird den Probanden eine kurze Einarbeitungszeit (ca. 3 min) ermöglicht, um sich mit dem HMI und der Reaktion des Krans vertraut zu machen, bevor mit der Bearbeitung der Hebeaufgaben begonnen wird. Während der Einarbeitungszeit können die Probanden Fragen zu den HMIs stellen.

Jeder Proband absolviert alle drei Aufgaben mit allen fünf Steuerungen, wobei die Reihenfolge und Richtung der Aufgaben und die Reihenfolge der Steuerungen jeweils durchpermutiert werden, um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Für die Modusreihenfolge gilt die Einschränkung, dass zuerst die drei Joystick-Modi in permutierter Reihenfolge absolviert werden, und anschließend die beiden Tablet-Varianten, ebenfalls in permutierter Reihenfolge¹⁸. Die Aufgabe der Probanden ist es, die Last von der Startpalette zum Ziel zu bewegen und auf der Zielpalette zu positionieren. Die Last gilt als abgesetzt, sobald der Trichter die Zielpalette berührt. Die Fahrwege mit der Last sind dem Bediener selbst überlassen. Ziel ist, die Last möglichst zügig zu bewegen und ohne viele Korrekturbewegungen auf den Zielscheiben zu positionieren. Die Startposition des Bedieners ist für jede Lastbewegung vorgegeben. Während der Lastbewegung ist dem Bediener selbst überlassen, ob und ggf. wann er sich bewegt. Der Fahrweg der Last ist für jede Aufgabe innerhalb des Arbeitsbereichs des Krans frei wählbar. Nach dem Abschluss jedes Modus füllen die Probanden den Fragebogen zum SUS aus.

Nach Abschluss aller fünf HMIs füllen die Probanden einen abschließenden Fragebogen aus. Dieser Fragebogen enthält den Kurztest zur mentalen Rotation nach Peters [Pet-1995]. Dieser Standardtest lässt Schlüsse bezüglich potenzieller Einflüsse der mentalen Rotationsfähigkeit auf den Umgang mit den Steuerungssystemen zu. Für jeden Probanden resultiert ein Kennwert (Skala: 0-24), der im folgenden als mentale Rotationsfähigkeit bezeichnet wird. Ein hoher Wert korrespondiert mit einer hohen Fähigkeit zur mentalen Rotation. Die mentale Rotationsfähigkeit dient als Kontrollvariable (d. h. zur Kontrolle der Versuchsergebnisse auf den Effekt der mentalen Rotationsfähigkeit) für die Auswertung der Versuchsergebnisse.

Aus Sicherheitsgründen wird jeder Proband während der Versuchsdurchführung vom Versuchsleiter überwacht. Über einen Not-Aus-Schalter kann der Versuchsleiter den Versuch

¹⁸Diese Einschränkung hat technische Gründe: Beim Wechsel zwischen der Joystick-Steuerung und der Tablet-Steuerung ist ein kurzer Umbau notwendig. Dieser soll für jeden Probanden nur einmal durchgeführt werden, um die Gesamtversuchsdauer je Proband nicht unnötig zu verlängern.

jederzeit unterbrechen. Die Probanden werden zudem mit einem Helm und Sicherheitsüberziehern für die Schuhe ausgestattet. Die Versuchsdauer beträgt ca. 60 min je Proband.

10.2 Hypothesen

Es soll untersucht werden, ob die verschiedenen richtungsorientierten HMIs eine erhöhte Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zu den maschinenzentrierten HMIs bieten. Hierfür werden die fünf HMIs anhand unabhängiger Hypothesen miteinander verglichen. Zur vereinfachten Interpretation werden die Alternativhypothesen angegeben. Die korrespondierenden Nullhypothesen lassen sich trivial aus den Alternativhypothesen ableiten.

Zunächst werden die Effizienz und Effektivität anhand der primären Aufgabenleistung der Probanden untersucht. Da diese nicht durch eine einzige Messgröße quantifiziert werden können, kommen Operationalisierungen zur Leistungsmessung zum Einsatz: die Zeit zur Aufgabenerfüllung, die Zahl der Fehler während der Aufgabenerfüllung sowie die Ablagegenauigkeit. Hieraus ergeben sich folgende Alternativhypothesen:

H₁: Die richtungs- und zielorientierten HMIs unterscheiden sich bei der Verwendung durch alle Bediener – unabhängig von ihrer Vorerfahrung – in der Zeit zur Aufgabenerfüllung.

H₂: Die richtungs- und zielorientierten HMIs unterscheiden sich bei der Verwendung durch alle Bediener – unabhängig von ihrer Vorerfahrung – in der Zahl der Fehler.

H₃: Die richtungs- und zielorientierten HMIs unterscheiden sich bei der Verwendung durch alle Bediener – unabhängig von ihrer Vorerfahrung – in der Ablagegenauigkeit.

Die Hypothesen H₁ und H₂ untersuchen die Effizienz der Aufgabenerfüllung, da sie die Investition von Zeit und Energie durch den Bediener bewerten. Die Hypothese H₃ bezieht sich auf die Effektivität des Vorgangs, da eine schlechtere Ablagegenauigkeit einem schlechteren Erreichen des Aufgabenziels entspricht.

Die Zeit zur Aufgabenerfüllung wird mit Hilfe einer Stoppuhr gemessen. Die Zahl der Fehler wird aus der Trajektorie des Kranhakens während der Aufgabenerfüllung ermittelt: Es wird ein Fehler gezählt, wenn eine getätigte Steuereingabe die Last weiter vom Ziel weg bewegt, anstatt sich ihm zu nähern. Die Zählung erfolgt automatisiert durch ein Matlab-Skript, das als Eingangswerte die Sensordaten der Kransensoren für jede Aufgabe erhält. Die Ablagegenauigkeit wird mit Hilfe der Zielscheiben gemessen: Jedem Kreis wird ein numerischer Wert von 1 (Mitte, perfekt) bis 10 (Palettenberührung, aber Zielscheibe verfehlt) zugeordnet. Der Kreis, der vom Trichter an der Unterseite der Last zuerst berührt wird, wird gewertet.

Für die Messung der Zufriedenheit ergibt sich folgende Alternativhypothese:

H₄: Die richtungs- und zielorientierten HMIs unterscheiden sich bei der Verwendung durch alle Bediener – unabhängig von ihrer Vorerfahrung – im Hinblick auf den SUS.

Der Fragebogen zur Ermittlung des SUS wird schriftlich und in deutscher Sprache durchgeführt.

10.3 Ergebnisse

10.3.1 Probandenkollektiv

Für das Experiment wird eine Stichprobe von $N = 60$ Teilnehmern rekrutiert. Vier Teilnehmer können die Studie aufgrund unvorhergesehener technischer Hindernisse während des Versuchs nur zu einem kleinen Teil durchführen und wurden daher von der Auswertung ausgeschlossen. Folglich verbleiben $N = 56$ Teilnehmer in der Stichprobe, die zu gleichen Teilen den beiden Gruppen (Novizen bzw. Experten) zugeordnet sind. Die Teilnehmer sind entweder Mitarbeiter des Lehrstuhls fml, Studenten oder Mitarbeiter von Industrieunternehmen. Das Alter der Teilnehmer liegt zwischen 20 und 62 Jahren (Novizen (N): 20 - 62 Jahre; Experten (E): 22 - 62 Jahre), mit einem arithmetischen Mittelwert von 35,46 Jahren (N: 30,4 Jahre; E: 40,5 Jahre) und einer Standardabweichung von 12,14 Jahren (N: 10,1 Jahre; E: 12,2 Jahre). Die Stichprobe enthält 6 weibliche (10,7 %) und 50 männliche Teilnehmer (89,3 %).

10.3.2 Auswertungsverfahren

Bei der Studie handelt es sich um eine zweifaktorielle Studie mit dem Zwischensubjektfaktor Vorerfahrung (im Folgenden auch Gruppe genannt) als UV (unabhängige Variable) und einem Innersubjektfaktor (Steuerungsmodus) als weitere UV. Zusätzlich existiert mit der mentalen Rotationsfähigkeit eine Kontrollvariable.

Die Daten werden sowohl deskriptiv als auch mit Methoden der Inferenzstatistik ausgewertet¹⁹. Für alle Hypothesen werden zur deskriptiven Analyse eigene Boxplots für die Messgrößen ausgegeben. Für die abhängigen Variablen „Zeit zur Aufgabenerfüllung“, „Fehlerzahl“ und „Ablagegenauigkeit“ wird zu diesem Zweck für jeden Probanden je ein HMI-spezifischer Wert berechnet, der sich aus der Summe für alle drei Aufgaben ergibt. Der SUS wird direkt aus dem Fragebogen für jedes HMI berechnet.

Für die inferenzstatistischen Untersuchungen kommen LMM zum Einsatz. LMM bieten gegenüber Varianzanalysen mit Messwiederholung (z. B. Mixed ANOVA) den Vorteil, dass sie als Regressionsmethode nicht nur den Vergleich zweier Einflüsse miteinander ermöglichen, sondern bei der Überlagerung von mehreren Einflüssen erlauben, die unterschiedlichen Einflussgrößen direkt zu vergleichen. Insbesondere ermöglichen sie beispielsweise eine gleichzeitige Aussage darüber, ob sowohl die Vorerfahrung der Probanden als auch

¹⁹Die Auswertung folgt den Empfehlungen von Dr. Stephan Haug von der Statistikberatung der TUM.

das verwendete HMI einen Einfluss auf die AV haben. Darüber hinaus reagieren LMM bei sauberer Modellierung der Fixed Effects extrem sensitiv auf genau diese Einflüsse und zeigen Signifikanzen der Einzeleffekte auf, selbst wenn diese nur einen schwachen Einfluss auf die AV haben. LMM ermöglichen somit auch die Identifikation von Effekten, die zwar signifikant sind, sich aber aufgrund des schwachen Effekts nicht signifikant auf die Gesamtleistung auswirken, wenn man orthogonale Kontraste der AV – also beispielsweise den Zeitunterschied zwischen zwei HMIs – betrachtet. Dies trägt dem Umstand Rechnung, dass bei Studien außerhalb des Labors Effekte häufig schwächer sind als in kontrollierter Laborumgebung. Um solche schwachen Effekte auch zu erfassen, werden im Anschluss an die Modellbildung zusätzlich paarweise Vergleiche ausgewertet.

Die Modellbildung und -analyse erfolgt analog zur Laborstudie aus Kapitel 6. Für alle Hypothesen werden Baseline-Modelle erstellt, die je ein zufälliges Absolutglied (Random Intercept, d. h. y-Achsenabschnitt der Regressionsgerade als Prädiktor) für das verwendete HMI und einen Fixed Effekt für die Vorerfahrung der Teilnehmer (Gruppe) enthalten. Zudem zeigt sich bei der Modellbildung, dass das Quadrat der mentalen Rotationsfähigkeit zu einer wesentlichen Verbesserung der Baseline-Modelle führt. Daher wird die quadrierte Kontrollvariable als zusätzlicher Fixed Effect in die Baseline-Modelle einbezogen.

Um den Effekt der fünf HMI-Konzepte zu untersuchen, wird im nächsten Schritt der Faktor HMI zum jeweiligen Baseline-Modell als Fixed Effect hinzugefügt. Dort, wo es zu einer weiteren Modellverbesserung führt (Zeit zur Aufgabenerfüllung, Fehlerzahl, Ablagegenauigkeit), wird außerdem die Interaktion zwischen Gruppe und HMI (Schreibweise: Gruppe · HMI) dem erweiterten Modell hinzugefügt. Zur Beurteilung, ob der Faktor HMI bzw. die Interaktion zur Modellverbesserung beiträgt, wird das erweiterte Modell mit dem Basismodell unter Verwendung des AIC verglichen. Über das AIC hinaus werden die beiden Modelle über einen Vergleich der Log-Likelihood-Dichten (Abkürzung: LogLike) im Bezug auf alle Beobachtungen verglichen, wobei hier ein steigender Wert mit einer besseren Modellqualität korreliert. Über einen Likelihood-Quotienten-Test wird geprüft, ob das erweiterte Modell dem Baseline-Modell signifikant überlegen ist (Ausgabe von χ^2 und p). Wenn beim erweiterten Modell das AIC kleiner wird, die LogLike steigt und p kleiner ist als das gewählte Signifikanzniveau, dann bedeutet das, dass der Faktor HMI einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable hat.

Als Effektgröße für alle Vergleiche wird der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient r berechnet. Für eine Einordnung der Effektgröße wird die Klassifikation von kleinen Effekten ($r \approx 0.1$), mittleren Effekten ($r \approx 0.3$) und starken Effekten ($r \approx 0.5$) nach Cohen verwendet [Coh-2013]. Das Signifikanzniveau wird auf $\alpha = 0,05$ gesetzt. Die p -Werte für alle Effekte werden als zweiseitige Tests durchgeführt. Ist ein Effekt signifikant, kann am Vorzeichen der korrespondierenden Geradensteigung b erkannt werden, in welche Richtung der Effekt ausschlägt. Der Betrag der Regressionsgeradensteigung b zeigt die absolute Größe des Effekts. Die mit den LMM untersuchten Daten sind – mit zwei Ausnahmen – frei von

extremen Ausreißern, d. h. Ausreißern, die außerhalb des dreifachen Interquartilsabstands liegen. Durch die geringe Ausreißerzahl kann davon ausgegangen werden, dass sie keinen Einfluss auf die Qualität der LMM haben.

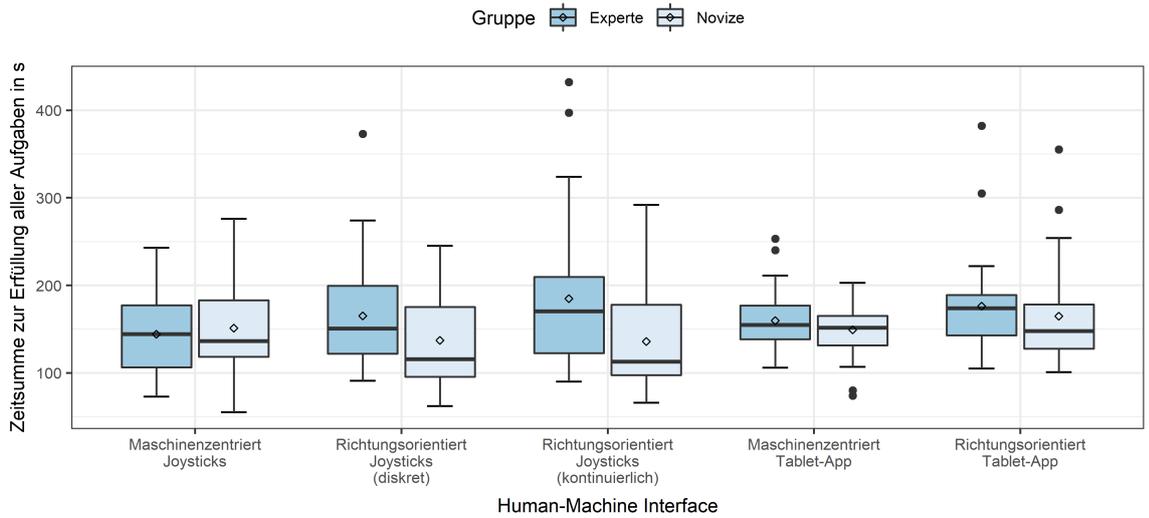
Abweichend zu den Untersuchungen der Hypothesen kommt für die explorative Analyse des Verlaufseffekts statt eines LMM eine Mixed ANOVA zum Einsatz ($2 \times 5 \times 3$ -ANOVA: 2 Gruppen als Zwischensubjektfaktor, 5 HMIs als Innersubjektfaktor, 3 Aufgaben als Innersubjektfaktor). Der Wechsel von den LMM zur Mixed ANOVA für die statistische Auswertung des Verlaufseffekts ist unumgänglich, weil durch die Randbedingung für die HMI-Reihenfolge (zuerst 3 Joystick-Steuerungen, dann 2 Tablet-Steuerungen) die Randomisierung der HMIs nicht vollständig perfekt ist, sondern nur innerhalb des Eingabegeräts randomisiert wird. Wenn man zur Untersuchung des Verlaufseffekts die Zeiten zur Aufgabenerfüllung für die unterschiedlichen Aufgabennummern miteinander vergleichen möchte, führt diese Randbedingung zu singularitätsbehafteten LMM. LMM eignen sich folglich nicht für die inferenzstatistische Untersuchung des Verlaufseffekts. Nachdem es sich beim Verlaufseffekt um eine explorative Untersuchung ohne Bezug zu den vorhergehenden Hypothesen handelt, ist die Abweichung von der Auswertesystematik unproblematisch.

Die Prüfungen auf die Erfüllung der Voraussetzungen für die LMM bzw. die Mixed ANOVA werden im Zusammenhang mit den berichteten Ergebnissen präsentiert. Alle statistischen Analysen werden in der Statistikumgebung R durchgeführt.

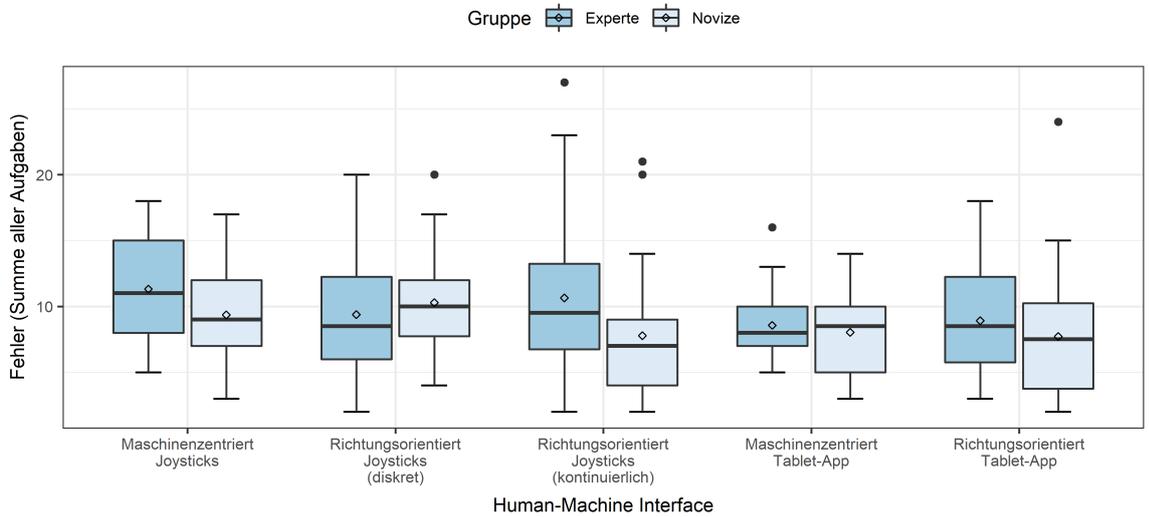
10.3.3 Auswertung: Deskriptive Statistik

Die deskriptive Darstellung erfolgt mit Hilfe von Boxplots. Die Abbildungen 10-2 und 10-3 zeigen Boxplots für die Verteilung der ausgewerteten Kenngrößen (AVs): Zeit zur Aufgabenerfüllung, Fehlerzahl, Ablagegenauigkeit, SUS. Eine Zusammenfassung der deskriptiven Kennwerte im Bezug zu den Hypothesen ist in Tabelle 10-1 aufgeführt.

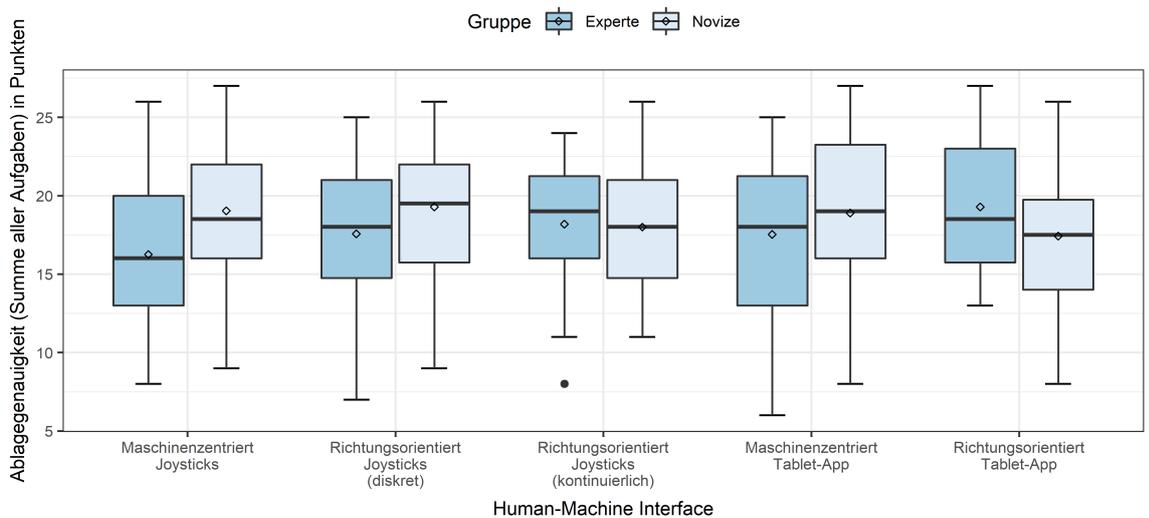
Tabelle 10-2 enthält darüber hinaus die relevanten deskriptiven Kennwerte für die explorative Untersuchung des Verlaufseffekts über die Hypothesen hinaus. Die Unterabbildung 10-3b zeigt ebenfalls zu diesem Zweck den Verlauf der Zeit zur Aufgabenerfüllung über die drei Aufgaben je HMI. Hierbei handelt es sich um die Zeit für die jeweils erste bis dritte ausgeführte Einzelaufgabe mit jedem HMI. Weil jede der drei Bewegungsaufgaben ($1 \leftrightarrow 2$, $2 \leftrightarrow 3$, $3 \leftrightarrow 1$) gleich oft als erstes, zweites oder drittes von den Probanden ausgeführt werden, sind der Median sowie der Mittelwert in dieser Darstellung trotzdem aussagekräftig, obwohl die drei Bewegungsaufgaben an sich unterschiedlich lang sind. Die Entwicklung der Zeit zur Aufgabenerfüllung über die Aufgabennummern wird im Folgenden dazu genutzt, die Lernförderlichkeit der HMIs explorativ zu untersuchen.



(a) Verteilung der Zeitsumme zur Erfüllung aller Aufgaben für die betrachteten HMIs

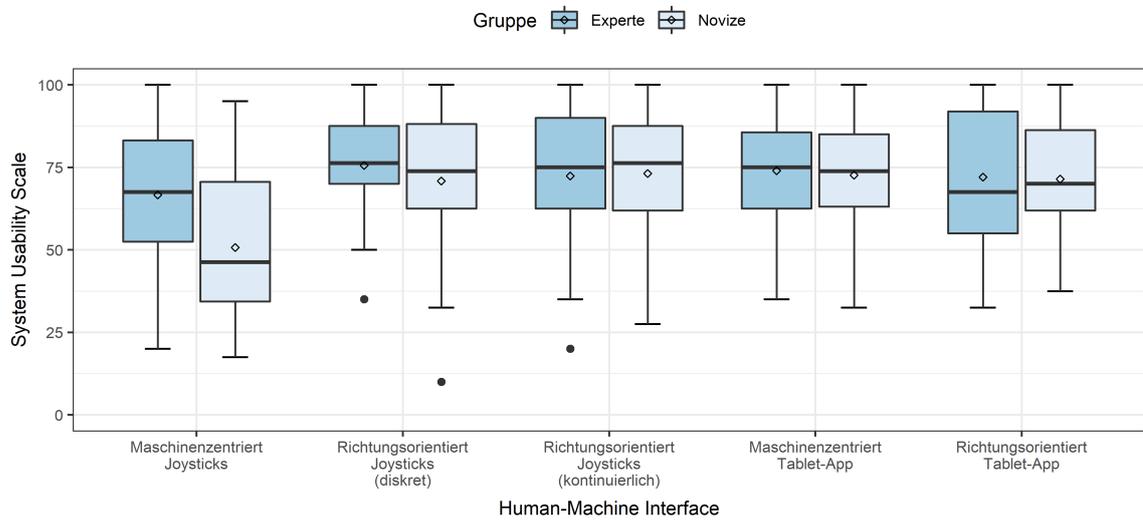


(b) Verteilung der Fehlerzahl (Summe aus allen Aufgaben) für die betrachteten HMIs

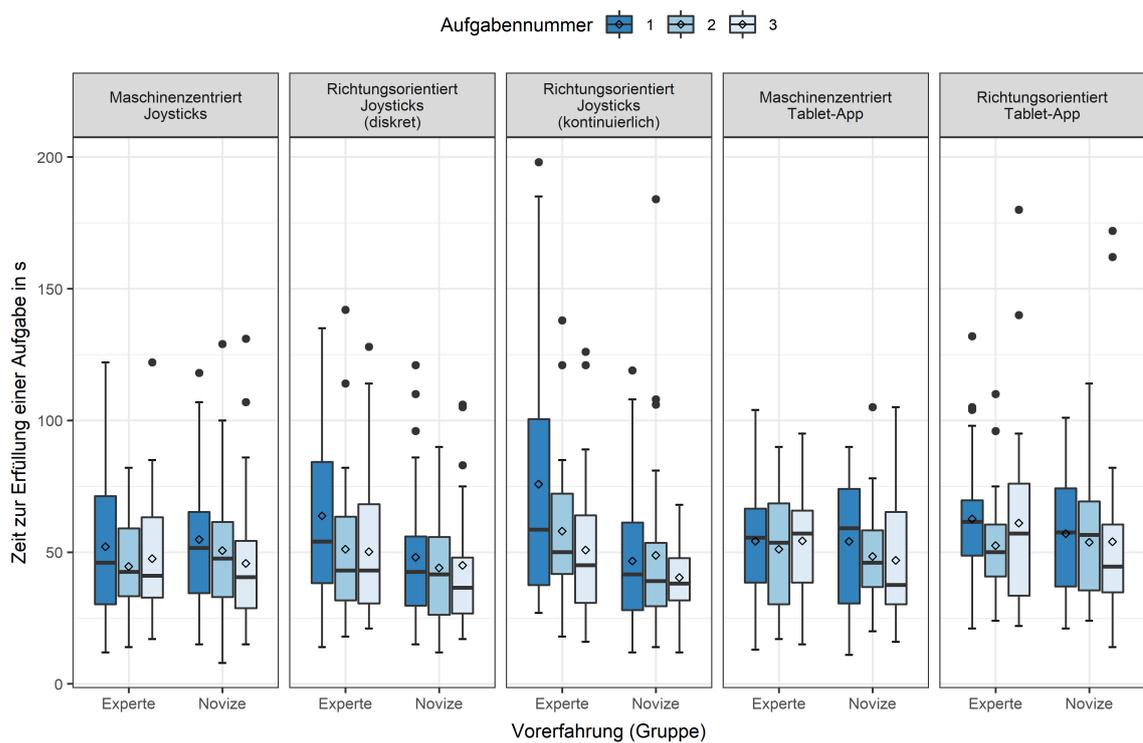


(c) Verteilung der Ablagegenauigkeit (Summe aus allen Aufgaben) für die betrachteten HMIs

Abbildung 10-2: Boxplots mit der Verteilung der HMI-spezifischen Werte für alle Probanden zur deskriptiven Auswertung der realen Bedienerstudie (Teil 1)



(a) Verteilung der SUS-Werte für die betrachteten HMIs



(b) Verlaufseffekt: Entwicklung der Zeit zur Aufgabenerfüllung über den Verlauf der 3 Aufgaben je HMI

Abbildung 10-3: Boxplots mit der Verteilung der HMI-spezifischen Werte für alle Probanden zur deskriptiven Auswertung der realen Bedienerstudie (Teil 2)

Tabelle 10-1: Zusammenfassung der deskriptiven Kenngrößen für die Hypothesen (MZ: maschinenzentriertes HMI; RO: richtungsorientiertes HMI)

	HMI	Gruppe	arithm. Mittel	Std.-abw.	Median	Minimum	Maximum	
Zeit zur Aufgabenerfüllung (Zeitsumme über alle drei Aufgaben je HMI)	MZ: Joysticks	Experte	144,1 s	47,4 s	144,0 s	73,0 s	243,0 s	
		Novize	151,1 s	52,7 s	136,0 s	55,0 s	276,0 s	
	RO: Joysticks (diskret)	Experte	165,1 s	61,0 s	150,5 s	91,0 s	373,0 s	
		Novize	137,1 s	55,8 s	115,5 s	62,0 s	245,0 s	
	RO: Joysticks (kontinuierlich)	Experte	184,6 s	86,1 s	170,0 s	90,0 s	432,0 s	
		Novize	135,8 s	55,9 s	112,5 s	66,0 s	292,0 s	
	MZ: Tablet-App	Experte	159,6 s	36,6 s	154,5 s	106,0 s	253,0 s	
		Novize	149,3 s	33,4 s	151,5 s	74,0 s	203,0 s	
	RO: Tablet-App	Experte	176,1 s	56,4 s	173,5 s	105,0 s	382,0 s	
		Novize	164,9 s	57,4 s	147,5 s	101,0 s	355,0 s	
	Fehlerzahl (Summe über alle drei Aufgaben je HMI)	MZ: Joysticks	Experte	11,3	4,0	11,0	5,0	18,0
			Novize	9,4	3,6	9,0	3,0	17,0
RO: Joysticks (diskret)		Experte	9,4	4,3	8,5	2,0	20,0	
		Novize	10,3	4,0	10,0	4,0	20,0	
RO: Joysticks (kontinuierlich)		Experte	10,6	6,1	9,5	2,0	27,0	
		Novize	7,8	6,6	7,0	2,0	21,0	
MZ: Tablet-App		Experte	8,6	2,6	8,0	5,0	16,0	
		Novize	8,0	2,8	8,5	3,0	14,0	
RO: Tablet-App		Experte	8,9	4,3	8,5	5,0	16,0	
		Novize	7,7	4,8	7,5	2,0	24,0	
Ablagegenauigkeit (Summe über alle drei Aufgaben je HMI)		MZ: Joysticks	Experte	16,3	5,1	16,0	8,0	26,0
			Novize	19,0	5,1	18,5	9,0	27,0
	RO: Joysticks (diskret)	Experte	17,6	4,2	18,0	7,0	25,0	
		Novize	19,3	4,3	19,5	9,0	26,0	
	RO: Joysticks (kontinuierlich)	Experte	18,2	4,3	19,0	8,0	24,0	
		Novize	18,0	4,1	18,0	11,0	26,0	
	MZ: Tablet-App	Experte	17,5	5,0	18,0	6,0	25,0	
		Novize	18,9	5,4	19,0	8,0	27,0	
	RO: Tablet-App	Experte	19,3	4,1	18,5	13,0	27,0	
		Novize	17,4	5,0	17,5	8,0	26,0	
	SUS (je HMI)	MZ: Joysticks	Experte	66,6	21,1	67,5	20,0	100,0
			Novize	50,7	21,7	46,3	17,5	95,0
RO: Joysticks (diskret)		Experte	75,5	14,5	76,3	35,0	100,0	
		Novize	70,8	21,0	73,8	10,0	100,0	
RO: Joysticks (kontinuierlich)		Experte	72,3	19,8	75,0	20,0	100,0	
		Novize	73,1	18,5	76,3	27,5	100,0	
MZ: Tablet-App		Experte	73,9	18,3	75,0	35,0	100,0	
		Novize	72,6	18,3	73,8	32,5	100,0	
RO: Tablet-App		Experte	72,0	20,7	67,5	32,5	100,0	
		Novize	71,4	17,8	70,0	37,5	100,0	

Tabelle 10-2: Aufgabenzeiten (Mediane) für die explorative Untersuchung des Verlaufeffekts (MZ: maschinenzentriertes HMI; RO: richtungsorientiertes HMI)

HMI	MZ: Joysticks		RO: Joysticks (diskret)		RO: Joysticks (kontinuierlich)		MZ: Tablet-App		RO: Tablet-App	
	Exp.	Nov.	Exp.	Nov.	Exp.	Nov.	Exp.	Nov.	Exp.	Nov.
Aufgabe 1	46,0 s	51,5 s	54,0 s	42,5 s	58,5 s	41,5 s	55,5 s	59,0 s	61,5 s	57,5 s
Aufgabe 2	42,5 s	47,5 s	43,0 s	41,5 s	50,0 s	39,0 s	53,5 s	46,0 s	50,0 s	56,5 s
Aufgabe 3	41,0 s	40,5 s	43,0 s	36,5 s	45,0 s	38,0 s	57,0 s	37,5 s	57,0 s	44,5 s

Die Ergebnisse zeichnen folgendes Bild:

- Die Experten sind im Mittel mit den maschinenzentrierten HMIs am schnellsten (Joystick vor Tablet), gefolgt von der diskreten Joystick-Steuerung. Mit dem richtungsorientierten Tablet-HMI benötigen Experten am längsten. Die Novizen sind mit den beiden richtungsorientierten Joystick-HMIs im Mittel am schnellsten, mit einem minimalen Vorteil für das kontinuierliche richtungsorientierte Joystick-HMI. Anschließend folgen bei den Novizen eng aufeinander die beiden maschinenzentrierten HMIs (Tablet schneller als Joystick), und zum Schluss das richtungsorientierte Tablet-HMI. Bei Betrachtung des Medians sind die Novizen in allen Modi im Mittel schneller als die Experten. Bei Betrachtung des arithmetischen Mittelwerts ergibt sich nur für das maschinenzentrierte Joystick-HMI ein Vorteil der Experten gegenüber den Novizen. Die Zeiten für beide Tablet-HMIs streuen in beiden Gruppen deutlich weniger breit als die Zeiten der Joystick-HMIs.
- Die Experten machen im Mittel mit den Tablet-HMIs am wenigsten Fehler, gefolgt vom richtungsorientierten diskreten Joystick-HMI und dem kontinuierlichen Joystick-HMI. Die meisten Fehler machen Experten im Mittel mit dem maschinenzentrierten Joystick-HMI. Die Novizen machen im Mittel ähnlich wenig Fehler mit den beiden Tablet-HMIs und dem richtungsorientierten kontinuierlichen Joystick-HMI. Die meisten Fehler machen Novizen im Mittel mit dem diskreten Joystick-HMI. In allen Modi außer dem diskreten Joystick-HMI machen Novizen im Mittel weniger Fehler als Experten.
- Die Experten erreichen die beste Ablagegenauigkeit (d. h. die geringsten Werte) im Mittel mit dem maschinenzentrierten Joystick-HMI, gefolgt von den dann eng beieinander liegenden richtungsorientierten Joystick-HMIs sowie dem maschinenzentrierten Tablet-HMI. Die schlechteste mittlere Ablagegenauigkeit erreichen Experten mit dem richtungsorientierten Tablet-HMI. Novizen erreichen mit dem richtungsorientierten Tablet-HMI die beste mittlere Ablagegenauigkeit, gefolgt vom richtungsorientierten kontinuierlichen Joystick-HMI sowie dem maschinenzentrierten Tablet-HMI. Am schlechtesten schneiden bei den Novizen im Mittel das maschinenzentrierte Joystick-HMI und das richtungsorientierte diskrete Joystick-HMI ab. Die Streubreite der Ablagegenauigkeiten ist für beide Gruppen und alle Modi ähnlich groß.

- In beiden Gruppen schneidet das maschinenzentrierte Joystick-HMI im Hinblick auf den mittleren SUS am schlechtesten ab. Sowohl bei den Experten als auch bei den Novizen liegen die anderen vier HMIs fast gleichauf und vor dem maschinenzentrierten Joystick-HMI. Die Unterschiede in den Mittelwerten zwischen diesen vier HMIs liegen in beiden Gruppen innerhalb der Auflösungsbreite des SUS, so dass keine eindeutige Priorisierung angegeben werden kann. Auffällig ist, dass das maschinenzentrierte Joystick-HMI von den Novizen im Mittel deutlich schlechter bewertet wird als von den Experten, bei vergleichbarer Streubreite der Einzelwerte. Basierend auf der Einstufung nach Bangor, Kortum und Miller [Ban-2008] auf einer Absolutskala entsprechen die mittleren SUS-Werte beider Gruppen der Note *gerade noch akzeptabel: ok* für das maschinenzentrierte Joystick-HMI und der Note *akzeptabel: gut* für die vier anderen HMIs.
- Für den Verlaufseffekt werden die Mediane miteinander verglichen, da Mittelwerte durch die Streubreite der Daten, die sich aus den unterschiedlich langen Einzelaufgaben ergibt, stärker verzerrt werden. Ein Verlaufseffekt (sinkende mittlere Zeit zur Aufgabenerfüllung über die drei Aufgaben je HMI) ist bei allen HMIs in beiden Gruppen zwischen der ersten und zweiten Aufgabe zu erkennen. Bei den Experten verliert sich der Verlaufseffekt sowohl beim richtungsorientierten diskreten Joystick-HMI als auch bei den beiden Tablet-HMIs nach der zweiten Aufgabe: Im Mittel findet keine weitere Zeitreduktion zwischen zweiter und dritter Aufgabe statt. Zudem fällt auf, dass beim richtungsorientierten kontinuierlichen Joystick-HMI in der ersten Aufgabe zwei deutliche Zeitausreißer nach oben auftreten, weil zwei Experten in der ersten Aufgabe mit diesem HMI erhebliche Schwierigkeiten bei der Bedienung hatten. Bei den Novizen ist bei allen HMIs ein Verlaufseffekt über alle drei Aufgaben zu beobachten.

Im Unterschied zur Laborstudie aus Kapitel 6 zeigt sich allgemein, dass die Ergebnisse der Realstudie stärker streuen und eine klare und deutliche Abgrenzung der HMIs weniger offensichtlich ist.

10.3.4 Auswertung: Inferenzstatistik

Tabelle 10-3 zeigt für alle Hypothesen den Vergleich zwischen dem Baseline-Modell (LMM ohne Faktor HMI) sowie dem erweiterten Modell (LMM mit Fixed Effect HMI; bei Zeit zur Aufgabenerfüllung, Fehlerzahl, Ablagegenauigkeit zusätzlich mit Interaktion Gruppe · HMI). Zur Überprüfung, ob die Voraussetzung für LMM erfüllt sind (Linearität, Homoskedastizität, normalverteilte Residuen, Auswahl der zufälligen Effekte, Abwesenheit von Ausreißern) werden Diagnoseplots angefertigt. Diese sind im Anhang C.1.2 aufgeführt.

Insgesamt zeigt sich für die ersten beiden Hypothesen, dass der Faktor HMI sowie die Interaktion Gruppe · HMI die Modellqualität verbessern (AIC sinkt, LogLike steigt). Das Modell zur Ablagegenauigkeit lässt sich durch den Faktor HMI sowie die Interaktion nicht wesentlich verbessern (AIC steigt obwohl LogLike steigt). Eine weitere Untersuchung zeigt, dass

bereits das Baseline-Modell der Ablagegenauigkeit in der Lage ist, fast 90 % der Datenvarianz abzubilden ($R^2 = 0,8977$), was für eine Untersuchung der Effekte ausreichend scheint, vor allem wenn man betrachtet, dass das erweiterte Modell mit $R^2 = 0,9019$ eine nahezu identische Abbildungsqualität aufweist. Im Hinblick auf die Ablagegenauigkeit ist es daher unerheblich, ob das Baseline-Modell oder das erweiterte Modell für die Untersuchungen verwendet werden. Bei der Modellierung der SUS-Werte führt allein der Faktor HMI zu einer Verbesserung der Modellqualität (AIC sinkt, LogLike steigt). Im Hinblick auf Hypothese H_4 hat die Interaktion Gruppe · HMI keinen verbessernden Einfluss, weshalb hier nur der Faktor HMI für die Erweiterung des Baseline-Modells verwendet wird. Bei den Modellen zu den Hypothesen H_1 , H_2 und H_4 wird ein signifikanter Einfluss der Modellerweiterungen gegenüber dem Baseline-Modell auf die jeweilige abhängige Variable beobachtet.

Tabelle 10-3: Zusammenfassung der Modellparameter für alle Hypothesen (Modellart: LMM, außer Verlaufseffekt: ANOVA)

Hypothese bzw. abhängige Variable	Modell	AIC	LogLike	χ^2	p
H_1 Zeit zur Aufgabenerfüllung	Baseline	63,98	-25,99	33,22	<0,001
	Baseline + HMI + Gruppe · HMI	46,75	-9,38		
H_2 Fehlerzahl	Baseline	391,64	-189,82	25,61	0,0012
	Baseline + HMI + Gruppe · HMI	382,03	-177,02		
H_3 Ablagegenauigkeit	Baseline	1652,24	-820,12	12,14	0,1449
	Baseline + HMI + Gruppe · HMI	1656,09	-814,05		
H_4 SUS	Baseline	-31 222,85	15 617,42	17,58	0,0015
	Baseline + HMI	-31 232,43	15 626,21		
expl.	Verlaufseffekt, bezogen auf die Zeit zur Aufgabenerfüllung über 3 Aufgaben je HMI	ANOVA mit AV: Zeit zur Erfüllung einer Aufgabe; Zwischensubjektfaktor: Gruppe; Innersubjektfaktoren: HMI, Aufgabennummer			

Für die explorative Analyse des Verlaufseffekts wird statt eines LMM aus oben beschriebenen Gründen eine Mixed ANOVA verwendet. Folglich werden für den Verlaufseffekt keine Modellparameter angegeben.

Einfluss auf die Zeit zur Aufgabenerfüllung (H_1)

Die beiden Modelle für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (Baseline sowie Baseline + HMI + Gruppe · HMI) basieren auf der log-transformierten Zeit zur Aufgabenerfüllung. Ohne Log-Transformation verletzt das LMM die Voraussetzungen der normalverteilten Residuen,

der Homoskedastizität sowie der korrekten Auswahl der zufälligen Effekte. Das untersuchte erweiterte log-transformierte Modell erfüllt die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.2).

Tabelle 10-4 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für die abhängige Variable „Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert)“.

Tabelle 10-4: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert)

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>e^b</i>
Intercept	5,16	0,06	88,58	<0,0001		174,86
Fixed Effects: Gruppe und quadrierte mentale Rotationsfähigkeit						
Gruppe: Novize	0,22	0,07	2,91	0,0053	0,37	1,24
Mentale Rotationsfähigkeit (quadriert)	-0,01	0,01	-8,54	<0,0001	0,76	1,00
Fixed Effect: HMI						
RO: Joysticks (diskret)	0,14	0,06	2,20	0,0287	0,15	1,15
RO: Joysticks (kontinuierlich)	0,21	0,06	3,45	0,0007	0,23	1,24
MZ: Tablet-App	0,13	0,06	2,15	0,0323	0,15	1,14
RO: Tablet-App	0,22	0,06	3,50	0,0006	0,23	1,24
Fixed Effect: Interaktion Gruppe · HMI						
Novize · RO: Joysticks (diskret)	-0,25	0,09	-2,85	0,0048	0,19	0,78
Novize · RO: Joysticks (kontinuierlich)	-0,33	0,09	-3,82	0,0002	0,25	0,72
Novize · MZ: Tablet-App	-0,11	0,09	-1,29	0,1967	0,09	0,89
Novize · RO: Tablet-App	-0,12	0,09	-1,34	0,1830	0,09	0,89

Es zeigt sich, dass die Gruppe einen signifikanten Einfluss auf die Zeit zur Aufgabenerfüllung hat ($p < 0,05$, $b > 0$: Zeitaufschlag für die Novizen). Der Faktor HMI ist für alle Ausprägungen signifikant und führt zu höheren Zeiten bei allen HMI im Vergleich zur Baseline ($b > 0$). Wenn die Novizen eines der beiden richtungsorientierten Joystick-HMIs verwenden, sorgt der Interaktionseffekt jedoch für eine zusätzliche, signifikante Zeitreduktion. Es zeigt sich, dass die Unterschiede in der Zeit zur Aufgabenerfüllung durch die verschiedenen HMIs zwar signifikant, aber insgesamt gering sind, was auch durch die geringen bis mittleren Effektstärken im LMM deutlich wird. Insgesamt wird Hypothese H_1 akzeptiert.

Zum direkten paarweisen Vergleich der HMIs innerhalb der Gruppen wird ein post-hoc Tukey-Test durchgeführt. Der Typ-I-Fehler wird mit Hilfe von Tukey-adjustierten p-Werten kontrolliert, so dass nach wie vor das Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ gilt. Die Voraussetzung der Varianzhomogenität (Levène-Test) ist zwar verletzt, kann aufgrund der identischen Gruppengrößen jedoch gelockert werden [Gol-2013, S. 390]. Die paarweisen Vergleiche ergeben im Hinblick auf die Hypothesen folgendes Bild:

Novizen sind mit dem richtungsorientierten, diskreten Joystick-HMI signifikant schneller als mit dem richtungsorientierten Tablet-HMI. Weitere signifikante Kontraste, insbesondere zu den beiden maschinenzentrierten HMIs, ergeben sich nicht, was auch bedeutet, dass sich der zeiterhöhende Effekt des HMI und der zeitverringende Interaktionseffekt gegenseitig kompensieren.

Experten sind mit dem maschinenzentrierten Joystick-HMI signifikant schneller als mit dem richtungsorientierten, kontinuierlichen Joystick-HMI sowie dem richtungsorientierten Tablet-HMI. Es sind keine weiteren Kontraste signifikant.

In beiden Gruppen ist zu beobachten, dass der Effekt der HMIs im LMM zwar signifikant ist, aufgrund der geringen Effektstärken jedoch nur in den genannten Sonderfällen (signifikante paarweise Vergleiche) eine eindeutige Abgrenzung zwischen den HMIs im Bezug zur AV Zeit zur Aufgabenerfüllung möglich wird.

Einfluss auf die Fehlerzahl (H_2)

Die beiden Modelle für die Fehlerzahl (Baseline sowie Baseline + HMI + Gruppe · HMI) basieren auf der log-transformierten Fehlerzahl. Ohne Log-Transformation verletzt das LMM die Voraussetzungen der normalverteilten Residuen, der Homoskedastizität sowie der korrekten Auswahl der zufälligen Effekte. Das untersuchte erweiterte log-transformierte Modell erfüllt die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.2).

Tabelle 10-5 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für die abhängige Variable „Fehlerzahl (log-transformiert)“.

Es zeigt sich, dass die Gruppe keinen signifikanten Einfluss auf die Fehlerzahl hat. Der Faktor HMI ist für alle Ausprägungen – außer dem richtungsorientierten, kontinuierlichen Joystick-HMI signifikant und führt zu geringeren Fehlerzahlen ($b < 0$), jedoch nur mit kleiner Effektstärke. Wenn die Novizen das richtungsorientierte, diskrete Joystick-HMI verwenden, sorgt der Interaktionseffekt jedoch für eine zusätzliche, signifikante Fehlererhöhung. Es zeigt sich, dass die Unterschiede in der Fehlerzahl zwischen den verschiedenen HMIs insgesamt gering sind, was auch durch die geringen bis mittleren Effektstärken im LMM deutlich wird. Hypothese H_2 kann für alle HMIs bis auf das richtungsorientierte, kontinuierliche Joystick-HMI akzeptiert werden. Da im letztgenannten Fall der Faktor HMI nicht signifikant ist, muss H_2 insgesamt verworfen werden.

Zum direkten Vergleich der HMIs innerhalb der Gruppen wird erneut ein post-hoc Tukey-Test mit Tukey-adjustierten p-Werten durchgeführt. Die Voraussetzung der Varianzhomogenität (Levène-Test) ist zwar verletzt, kann aufgrund der identischen Gruppengrößen jedoch gelockert werden [Gol-2013, S. 390]. Die paarweisen Vergleiche ergeben im Hinblick auf die Hypothesen folgendes Bild:

Tabelle 10-5: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für die Fehlerzahl (log-transformiert)

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>e^b</i>
Intercept	2,51	0,10	24,25	<0,0001		12,26
Fixed Effects: Gruppe und quadrierte mentale Rotationsfähigkeit						
Gruppe: Novize	-0,10	0,13	-0,78	0,4385	0,11	0,90
Mentale Rotationsfähigkeit (quadriert)	-0,01	0,01	-2,92	0,0051	0,37	1,00
Fixed Effect: HMI						
RO: Joysticks (diskret)	-0,25	0,11	-2,18	0,0304	0,15	0,78
RO: Joysticks (kontinuierlich)	-0,15	0,11	-1,33	0,1822	0,09	0,86
MZ: Tablet-App	-0,25	0,11	-2,22	0,0272	0,15	0,78
RO: Tablet-App	-0,30	0,11	-2,63	0,0092	0,18	0,74
Fixed Effect: Interaktion Gruppe · HMI						
Novize · RO: Joysticks (diskret)	0,34	0,16	2,13	0,0342	0,14	1,41
Novize · RO: Joysticks (kontinuierlich)	-0,10	0,16	-0,62	0,5371	0,04	0,90
Novize · MZ: Tablet-App	0,12	0,16	0,72	0,4708	0,05	1,12
Novize · RO: Tablet-App	-0,01	0,16	-0,03	0,9792	0,01	1,00

Novizen machen mit dem richtungsorientierten, diskreten Joystick-HMI signifikant mehr Fehler als mit den beiden anderen richtungsorientierten HMIs (Joysticks kontinuierlich, Tablet). Weitere signifikante Kontraste, insbesondere zu den beiden maschinenzentrierten HMIs, ergeben sich nicht: Die positiven Effekte durch die Variation des HMI sind nicht stark genug für einen signifikanten globalen Effekt.

Bei den **Experten** sind keine Kontraste signifikant. Auch hier sind die positiven Effekte durch die Variation des HMI im LMM zwar signifikant vorhanden, aber nicht stark genug für einen globalen Effekt.

In beiden Gruppen ist zu beobachten, dass der Effekt der HMIs im LMM zwar für fast alle HMIs signifikant ist, aufgrund der geringen Effektstärken jedoch nur in den genannten Sonderfällen (signifikante paarweise Vergleiche) eine eindeutige Abgrenzung zwischen den HMIs im Bezug zur AV Fehlerzahl möglich wird.

Einfluss auf die Ablagegenauigkeit (H₃)

Die beiden Modelle für die Ablagegenauigkeit (Baseline sowie Baseline + HMI + Gruppe · HMI) basieren auf der untransformierten Ablagegenauigkeit. Aus Gründen der Konsistenz zu den vorhergehenden und nachfolgenden Abschnitten wird auch für die Untersuchung der Ablagegenauigkeit das erweiterte Modell verwendet, obwohl die Modellqualität des (kleine-

ren) Baseline-Modells gleich groß ist. Das untersuchte erweiterte Modell erfüllt die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.2).

Tabelle 10-6 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für die abhängige Variable „Ablagegenauigkeit“.

Tabelle 10-6: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für die Ablagegenauigkeit

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Intercept	15,95	1,02	15,71	<0,0001	
Fixed Effects: Gruppe und quadrierte mentale Rotationsfähigkeit					
Gruppe: Novize	2,57	1,30	1,98	0,0530	0,26
Mentale Rotationsfähigkeit (quadriert)	0,01	0,01	0,61	0,5415	0,08
Fixed Effect: HMI					
RO: Joysticks (diskret)	1,32	1,16	1,20	0,2331	0,08
RO: Joysticks (kontinuierlich)	1,93	1,11	1,75	0,0824	0,12
MZ: Tablet-App	1,29	1,11	1,16	0,2460	0,08
RO: Tablet-App	3,04	1,11	2,75	0,0065	0,18
Fixed Effect: Interaktion Gruppe · HMI					
Novize · RO: Joysticks (diskret)	-1,07	1,56	-0,69	0,4937	0,05
Novize · RO: Joysticks (kontinuierlich)	-2,96	1,56	-1,90	0,0592	0,13
Novize · MZ: Tablet-App	-1,43	1,56	-0,91	0,3617	0,06
Novize · RO: Tablet-App	-4,64	1,56	-2,97	0,0033	0,20

Es zeigt sich, dass die Gruppe keinen signifikanten Einfluss auf die Fehlerzahl hat. Im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen hat auch die Kontrollvariable der mentalen Rotationsfähigkeit keinen signifikanten Einfluss. Im Bezug auf die HMIs kann ein signifikanter Einfluss auf die Ablagegenauigkeit nur beim richtungsorientierten Tablet-HMI sowie bei der Interaktion Novize · richtungsorientiertes Tablet-HMI beobachtet werden. Die Effektstärken sind klein bis mittelgroß. Alle anderen Faktoren sind nicht signifikant. Hypothese H₃ kann für das richtungsorientierte, kontinuierliche Joystick-HMI sowie das richtungsorientierte Tablet-HMI akzeptiert werden. Da für die beiden anderen HMIs der Faktor HMI nicht signifikant ist, wird H₃ insgesamt verworfen.

Es ergibt sich im paarweisen Vergleich mit Hilfe des post-hoc Tukey-Tests kein einziger signifikanter Kontrast. In beiden Gruppen ist zu beobachten, dass der Effekt der HMIs im LMM nicht stark genug ist, um global im Bezug zur AV Ablagegenauigkeit zu einem signifikanten Kontrast zu führen.

Einfluss auf den SUS (H₄)

Die beiden Modelle für den SUS (Baseline sowie Baseline + HMI) basieren auf dem untransformierten SUS. Das untersuchte erweiterte Modell erfüllt die Voraussetzungen für LMM (vgl. Anhang C.1.2).

Tabelle 10-7 zeigt die Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die abhängige Variable „SUS“.

Tabelle 10-7: Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für den SUS

	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Intercept	46,33	3,4	13,43	<0,0001	
Fixed Effects: Gruppe und quadrierte mentale Rotationsfähigkeit					
Gruppe: Novize	-14,48	2,77	-5,22	<0,0001	0,58
Mentale Rotationsfähigkeit (quadriert)	0,09	0,01	12,46	<0,0001	0,86
Fixed Effect: HMI					
RO: Joysticks (diskret)	14,51	4,19	3,46	0,0006	0,23
RO: Joysticks (kontinuierlich)	14,06	4,19	3,35	0,0009	0,22
MZ: Tablet-App	14,60	4,19	3,48	0,0006	0,23
RO: Tablet-App	13,08	4,19	3,12	0,0021	0,21

Das verwendete HMI hat in jedem Fall einen signifikanten Einfluss auf den SUS. Die Effektstärken der HMIs liegen im mittleren Bereich, die der Gruppe und der mentalen Rotationsfähigkeit im hohen Bereich. Die positive Geradensteigung *b* bei den HMIs zeigt, dass alle HMIs zu einem signifikant höheren SUS im Vergleich zum maschinenzentrierten Joystick-HMI (Baseline) führen. Hypothese H₄ wird folglich akzeptiert.

Zum direkten Vergleich der HMIs innerhalb der Gruppen wird erneut ein post-hoc Tukey-Test mit Tukey-adjustierten *p*-Werten durchgeführt. Die Voraussetzung der Varianzhomogenität (Levène-Test) ist für das richtungsorientierte, diskrete Joystick-HMI sowie für das richtungsorientierte Tablet-HMI erfüllt. Für die anderen drei HMIs ist die Varianzhomogenität verletzt. Diese Voraussetzung kann aufgrund der identischen Gruppengrößen jedoch gelockert werden [Gol-2013, S. 390]. Die paarweisen Vergleiche ergeben im Hinblick auf die Hypothesen folgendes Bild:

Bei den **Novizen** ergibt sich bezogen auf den SUS kein signifikanter Unterschied der HMIs zum maschinenzentrierten Joystick-HMI, wie auch schon aus den ungefähr betragsgleichen Geradensteigungen *b* für die Gruppe sowie die HMIs im LMM gefolgert werden kann. Es ergibt sich zwar je ein signifikanter Kontrast zwischen den richtungsorientierten Joystick-HMIs und dem richtungsorientierten Tablet-HMI, jedoch ist der Unterschied in den SUS-

Mittelwerten kleiner als die Auflösungsgenauigkeit des SUS, so dass diese Kontraste insgesamt kaum ins Gewicht fallen.

Bei den **Experten** existieren zwei signifikante Kontraste bezüglich des maschinenzentrierten Joystick-HMI: Sowohl das richtungsorientierte kontinuierliche Joystick-HMI als auch das richtungsorientierte Tablet-HMI erreichen signifikant höhere SUS-Werte. Innerhalb der richtungsorientierten HMIs bzw. zum maschinenzentrierten Tablet-HMI ergeben sich keine signifikanten Kontraste, wie bereits auf Basis der deskriptiven Statistik zu vermuten war.

Einfluss auf den Verlaufseffekt (explorativ)

Der Verlaufseffekt wird anhand der Variable „Zeit zur Aufgabenerfüllung“ je Aufgabe mit Hilfe einer Mixed ANOVA untersucht. Zur Überprüfung, ob die Daten die Voraussetzungen für eine Mixed ANOVA erfüllen, werden die Daten auf Ausreißer, Normalverteilung, Varianzhomogenität und Sphärizität untersucht. Die Untersuchung ist in Anhang C.2 dokumentiert. Die Daten erfüllen die Voraussetzungen.

Die multifaktorielle Mixed ANOVA zeigt keinen signifikanten Effekt der Gruppe ($F(1, 54) = 2,509$, $p = 0,119$, $\eta^2 = 0,013$) auf die Zeit zur Aufgabenerfüllung je Aufgabe. Der Einfluss des Zwischensubjektfaktors ist somit nicht signifikant.

Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der beiden Innersubjektfaktoren HMI ($F(2,92, 157,70) = 2,840$, $p = 0,041$, $\eta^2 = 0,010$) und Aufgabennummer ($F(1,29, 69,64) = 6,486$, $p = 0,008$, $\eta^2 = 0,015$) signifikant. Darüber hinaus ist die Interaktion Gruppe · HMI signifikant ($F(2,92, 157,70) = 3,937$, $p = 0,010$, $\eta^2 = 0,014$). Die Aufgabennummer kann somit als Haupteffekt identifiziert werden. Die Mixed ANOVA ergibt keine signifikanten Interaktionseffekte zwischen der Aufgabennummer und den anderen UV. Somit gilt der Haupteffekt der Aufgabennummer als global.

Ein paarweiser Vergleich zwischen den Aufgabennummern zeigt auch bei adjustiertem Signifikanz-Niveau (Bonferroni-Korrektur: $\alpha = 0.05/3 = 0.017$) eine signifikante Differenz zwischen der ersten und der zweiten Aufgabe ($p = 0,004$, $Diff = 6,63$) sowie der ersten und dritten Aufgabe ($p = 0,002$, $Diff = 7,30$). Das positive Vorzeichen der Differenz zwischen den beiden Aufgabennummern bestätigt, dass der Verlaufseffekt zu einer Zeitreduktion führt. Die Differenz zwischen zweiter und dritter Aufgabe ist mit $p = 0,296$ nicht signifikant.

Der Verlaufseffekt kann somit bei Betrachtung der Zeitunterschiede zwischen erster und zweiter bzw. erster und dritter Aufgabe inferenzstatistisch für alle HMIs nachgewiesen werden.

10.4 Diskussion der Evaluationsergebnisse am realen Kran

10.4.1 Einfluss der HMIs auf die Gebrauchstauglichkeit

Der Vergleich der fünf untersuchten HMIs fällt weniger eindeutig aus als es in der Laborstudie der Fall war. Die drei Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit werden durch die HMIs unterschiedlich beeinflusst.

Obwohl Hypothese H_1 akzeptiert wird, äußern sich die unterschiedlichen HMIs nicht in einer umfassend veränderten **Zeit zur Aufgabenerfüllung**. Bei den Novizen fällt auf, dass die beiden richtungsorientierten Joystick-HMIs zu niedrigeren mittleren Zeiten führen als die beiden maschinenzentrierten HMIs. Betrachtet man zusätzlich, dass die maximale Bewegungsgeschwindigkeit der richtungsorientierten HMIs langsamer ist als die der maschinenzentrierten HMIs, spricht dies eindeutig für die richtungsorientierten Joystick-HMIs, auch wenn der Effekt insgesamt zu schwach ist, um sich in der Inferenzstatistik global zu zeigen. Nichtsdestotrotz lässt dieser Umstand insgesamt auf eine aus Bedienerseite günstigere Bedienung durch die vier neuen HMIs schließen, was sich in einer geringeren mentalen Beanspruchung als Folge erhöhter Intuitivität niederschlägt. Bei den Experten ergeben sich leichte Vorteile für die beiden maschinenzentrierten HMIs, was darauf zurückzuführen ist, dass die Experten bereits ein mentales Modell für die Steuerung der Lastbewegung durch die Vorgabe der Freiheitsgrad-Bewegungen besitzen. Für Experten wirken sich die richtungsorientierten HMIs daher zunächst nicht positiv aus. Die Untersuchung des Verlaufeffekts ergibt jedoch für die Experten und die richtungsorientierten HMIs einen größeren Lerneffekt als für die maschinenzentrierten HMIs, so dass es sein kann, dass der Wissensvorsprung, den Experten im Hinblick auf die maschinenzentrierten HMIs besitzen, mit zunehmender Dauer kleiner wird, was sich bei weiterer Benutzung der richtungsorientierten HMIs positiv auf die Zeit zur Aufgabenerfüllung auswirken könnte. Insgesamt lässt sich also festhalten, dass die richtungsorientierten Joystick-HMIs bei den Novizen zu einer Verbesserung der Gebrauchstauglichkeits-Dimension **Effizienz: Zeit** führen, während bei den Experten mit in diesem Fall lediglich drei Aufgaben je HMI kein solcher Effekt zu beobachten ist. Das richtungsorientierte Tablet-HMI kann weder bei den Experten noch bei den Novizen überzeugen. Es wird vermutet, dass das vor allem mit der fehlenden haptischen Rückmeldung bei der Eingabe auf einem Touchbildschirm zusammenhängt, was zu einem insgesamt schlechteren Gefühl für die Steuerungseingaben führt. Dies muss durch entsprechende zeitliche Ressourcen bei der Eingabe kompensiert werden.

Im Hinblick auf Hypothese H_2 , die sich mit der **Fehlerzahl** befasst, müssen die Ergebnisse ebenfalls differenziert betrachtet werden. Erfreulich ist, dass für beide Bedienergruppen die Fehlerzahl durch die beiden Tablet-HMIs im Vergleich zum Benchmark-HMI (maschinenzentriert: Joysticks) signifikant sinkt, weshalb für diese beiden HMIs H_2 akzeptiert wird. Bei den Novizen sorgt zudem ein Interaktionseffekt für eine signifikante Reduktion der Fehlerzahl mit dem kontinuierlichen Joystick-HMI (H_2 nur akzeptiert für Novizen), wäh-

rend sich das diskrete Joystick-HMI nur für die Experten signifikant positiv auswirkt (H_2 nur akzeptiert für Experten). Eindeutig ist, dass für die Novizen unter allen richtungsorientierten HMIs das diskrete Joystick-HMI am schlechtesten abschneidet. Die trotz dieser Ausnahme insgesamt geringere Fehlerzahl der Novizen im Vergleich zu den Experten ist ein wesentliches Indiz dafür, dass die neuen HMIs die Bildung von Task-Action-Mappings im Vergleich zum richtungsorientierten Joystick-HMI deutlich vereinfachen, was sich auch in einer niedrigeren mentalen Beanspruchung und einer folglich erhöhten Intuitivität niederschlägt. Ein weiterer Grund für die niedrigere Fehlerzahl der Novizen könnte sein, dass die Experten Fehler gewohnt sind und wissen, dass die meisten Fehler keine gravierenden Auswirkungen haben, weil sie schnell erkannt und kompensiert werden können. Dies könnte zu einer geringeren Motivation bei den Experten führen, Fehler vorn vornherein zu vermeiden. Beide Bedienergruppen machen außerdem im Mittel mit dem maschinenzentrierten Joystick-HMI am meisten Fehler, was für die Vorteile der neuen HMIs spricht. Betrachtet man die Gebrauchstauglichkeits-Dimension **Effizienz: Fehler**, können für beide Bedienergruppen die beiden Tablet-HMIs am meisten empfohlen werden. Für die Novizen zeigt sich zusätzlich das kontinuierliche Joystick-HMI als vorteilhaft, während bei den Experten eher das diskrete Joystick-HMI leichte Vorteile aufweist. Das maschinenzentrierte Joystick-HMI schneidet am schlechtesten ab.

Betrachtet man den Einfluss der HMIs auf die Ablagegenauigkeit (Hypothese H_3), die zur Operationalisierung der **Effektivität** verwendet wird, zeigt sich, dass nur das richtungsorientierte Tablet-HMI einen signifikanten Einfluss hat, der jedoch für beide Bedienergruppen unterschiedlich ausfällt: Die Novizen erreichen mit diesem HMI eindeutig eine bessere Ablagegenauigkeit als mit dem maschinenzentrierten Joystick-HMI, während sich bei den Experten die Ablagegenauigkeit signifikant verschlechtert. Für die Experten kann daher bei Betrachtung der Effektivität am ehesten das maschinenzentrierte Joystick-HMI empfohlen werden, während für die Novizen das richtungsorientierte Tablet-HMI die größten Vorteile aufweist. Auch dies spricht erneut dafür, dass die Bildung von Task-Action-Mappings bei maschinenzentrierten Joystick-HMI unnötig erschwert ist. Ähnlich wie bei der Zeit zur Aufgabenerfüllung sollte durch zukünftige Untersuchungen geklärt werden, ob sich der Vorteil des maschinenzentrierten Joystick-HMI bei den Experten mit zunehmender Gewöhnung an die richtungsorientierten HMIs verringert, da der Status Quo auch ein Ergebnis der Vorerfahrung mit der maschinenzentrierten Standard-Steuerung sein kann. Insgesamt zeigt die Untersuchung der Ablagegenauigkeit nur schwache Unterschiede zwischen den HMI und damit die unklarsten Ergebnisse, was sich jedoch auch wie folgt zusammenfassen lässt: Die Ablagegenauigkeit durch die neuen HMIs ist in den allermeisten Fällen mindestens so gut wie durch das maschinenzentrierte Joystick-HMI. Insgesamt muss H_3 jedoch verworfen werden.

Am eindeutigsten fallen die Ergebnisse zu Hypothese H_4 aus, die sich mit dem SUS beschäftigt und vollumfänglich akzeptiert wird: Alle untersuchten Steuerungen sind dem

maschinenzentrierten Joystick-HMI signifikant überlegen, wobei der Kontrast für die Novizen noch stärker ausfällt als für die Experten, da letztere dem maschinenzentrierten Joystick-HMI einen niedrigeren Ausgangswert zuweisen. Im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeits-Dimension der **Zufriedenstellung** können also alle Steuerungen – außer dem maschinenzentrierten Joystick-HMI – für alle Bediener empfohlen werden. Da die SUS-Werte für die vier favorisierten HMIs alle in einem Band von 5 Punkten 70,8 – 75,5 und damit innerhalb der Auflösungsbreite des SUS liegen, kann keine weitere Priorisierung vorgenommen werden.

Im Gesamten ergibt sich, dass die Auswahl des optimalen HMI sowohl von der Vorerfahrung des Teilnehmers als auch vom Hauptoptimierungskriterium, also der aus subjektiver Sicht priorisierten Dimension der Gebrauchstauglichkeit, abhängt. Je nachdem, welche Dimension vom jeweiligen Bediener (oder Kranbesitzer) als am wichtigsten beurteilt wird, fällt die Empfehlung zum optimalen HMI anders aus. Tabelle 10-8 fasst für alle Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit die HMI-Empfehlung zusammen.

Tabelle 10-8: HMI-Empfehlung für alle Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit und beide Bedienergruppen (MZ: maschinenzentriertes HMI; RO: richtungsorientiertes HMI)

Dimension	AV	Empfehlung: Novize	Empfehlung: Experte
Effizienz	Zeit	RO: Joysticks (beide)	MZ: Joysticks
	Fehler	MZ/RO: Tablet-App (beide) oder RO: Joysticks (kontinuierlich)	RO: Joysticks (diskret) oder MZ/RO: Tablet-App (beide)
Effektivität	Ablagegenauigkeit	RO: Tablet-App	MZ: Joysticks
Zufriedenstellung	SUS	RO: Joysticks (beide), MZ/RO: Tablet-App (beide)	

Zusammenfassend empfehlen sich für Novizen am ehesten das richtungsorientierte, kontinuierliche Joystick-HMI oder das richtungsorientierte Tablet-HMI. Bei den Experten ist keine sinnvolle Empfehlung möglich, da sich die Empfehlungen der Einzeldimensionen widersprechen. Schließt man bei den Experten jedoch das maschinenzentrierte Joystick-HMI aus, da es bei der Zufriedenstellung deutlich hinter die anderen HMIs zurückfällt, scheint die Verwendung eines der drei richtungsorientierten HMIs für die Experten in Zukunft auch vielversprechend. Im Hinblick auf den Verlaufseffekt und den damit verbundenen Einfluss auf die Zeit sowie die Ablagegenauigkeit sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

Insgesamt zeigt sich, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten HMIs im Gesamtbild mindestens gleich gut, insbesondere (aber nicht nur) bei den Novizen teilweise sogar erheblich besser als das maschinenzentrierte Joystick-HMI abschneiden. Die auf Basis des Gestaltungsrahmens entwickelten richtungsorientierten HMIs haben somit das Potenzial, den Status Quo auch bei einer Umsetzung an einem Kran im realen Nutzungskontext positiv zu beeinflussen. Hinweise auf mentale Unterbeanspruchung durch die richtungsorientierten HMIs finden sich auch in der Realstudie nicht.

Kernaussagen: Gebrauchstauglichkeit der richtungsorientierten HMIs

1. Die Vorteile der richtungsorientierten HMIs treten bei den Novizen deutlicher hervor als bei den Experten. Dies unterstützt die These, dass die richtungsorientierten HMIs zu einer einfacheren mentalen Modellbildung in Form von Task-Action-Mappings beitragen.
2. Die richtungsorientierten HMIs erhöhen die zeitliche Effizienz der Novizen.
3. Bei den Experten treten die meisten Fehler mit dem traditionellen maschinenzentrierten Joystick-HMI auf. Die richtungsorientierten HMIs haben somit einen positiven Einfluss auf die Fehlerzahl und damit die Effizienz. Die Novizen machen mit den beiden Tablet-HMI sowie dem richtungsorientierten Joystick-HMI am wenigsten Fehler.
4. Die Ablagegenauigkeit als Maß der Effektivität ist durch die neuen HMIs mindestens so gut wie durch das traditionelle maschinenzentrierte Joystick-HMI.
5. Die Zufriedenstellung verbessert sich durch alle vorgestellten HMIs im Vergleich zum maschinenzentrierten Joystick-HMI deutlich.
6. Zusammenfassend existiert keine offensichtliche HMI-Empfehlung. Für die Novizen ergeben sich das richtungsorientierte, kontinuierliche Joystick-HMI oder das richtungsorientierte Tablet-HMI als vorteilhaft. Bei den Experten sind weitere Untersuchungen notwendig. Im Hinblick auf die deutlichen Unterschiede in der Bedienerzufriedenheit können auch für die Experten richtungsorientierte HMIs gegenüber dem maschinenzentrierten Joystick-HMI empfohlen werden.
7. Aus den Unterschieden zwischen den Experten und Novizen ergeben sich eine Reihe von Hinweisen, dass die richtungsorientierten HMIs die Bildung von mentalen Modellen ohne Vorwissen vereinfachen, tiefere Ebenen im Kontinuum des Wissens ansprechen und somit eine höhere Intuitivität implizieren.

10.4.2 Gegenüberstellung ausgewählter Gestaltungsparameter

Direkte und indirekt wirkende Interaktionselemente im Vergleich

Bei der Konzeption der richtungsorientierten HMIs wurde jeweils ein direktes (Tablet-Touchscreen) und indirektes Interaktionselement (Joystick) als Eingabeelement ausgewählt. Vergleicht man die richtungsorientierten HMIs mit den beiden verschiedenen Eingabelementen auf Basis der Mittelwerte und Mediane, ergeben sich folgende Unterschiede:

- In beiden Bedienergruppen wird die im Mittel und im Median schnellste Zeit mit einem Joystick-HMI erreicht.
- Die im Mittel geringste Fehlerzahl erreichen beide Bedienergruppen mit dem Tablet. Betrachtet man den Median, ergibt sich bei den Experten im Hinblick auf die geringste Fehlerzahl ein Tablet-HMI.

lerzahl kein Unterschied zwischen den Eingabeelementen, während bei den Novizen die HMIs mit Joysticks am besten abschneiden.

- Die im Mittel und Median beste Ablagegenauigkeit erreichen die Experten mit den Joysticks und die Novizen mit dem Tablet.
- Die SUS-Werte liegen im Mittel und Median für beide Elemente auf ähnlichem Niveau.

Welches der beiden Eingabeelemente für ein richtungsorientiertes HMI besser abschneidet, hängt von der Bedienergruppe und dem betrachteten Kennwert ab. Insgesamt sind die Unterschiede jedoch klein. Es lässt sich also schlussfolgern, dass sich direkte als auch indirekte Eingabeelemente für die richtungsorientierten HMIs eignen.

Vergleicht man zum Abschluss die beiden maschinenzentrierten HMIs, zeigen sich für beide Bedienergruppen eindeutige Vorteile der Joysticks gegenüber dem Tablet bei der mittleren Zeit zur Aufgabenerfüllung (mit den Joysticks sind leicht mehrere DOFs gleichzeitig bedienbar) sowie der Ablagegenauigkeit. Vergleicht man die Fehlerzahl und den SUS der beiden maschinenzentrierten HMIs miteinander, schneidet das Tablet besser ab.

Diskrete und kontinuierliche Orientierungsmessung im Vergleich

Wenn man die beiden richtungsorientierten Joystick-HMIs qualitativ miteinander vergleicht, ergibt sich ein eindeutiges Bild: Bei allen vier untersuchten AVs schneidet das diskrete Joystick-HMI bei den Experten besser ab, während es bei den Novizen genau umgekehrt ist. Berücksichtigt man, dass Experten durch ihr Vorwissen bereits ein vorgefertigtes mentales Modell für die Steuerung einer Last besitzen, das den Novizen fehlt, kann geschlussfolgert werden, dass das kontinuierliche Joystick-HMI am ehesten zur „natürlichen“ Erwartung des Systemverhaltens passt, was gleichzeitig damit zusammenfällt, dass kein Vorwissen vorhanden ist. In diesem Sinne ist anzunehmen, dass eine kontinuierliche Anpassung der Orientierungsmessung weniger Vorerfahrung und eine geringere kognitive Leistung voraussetzt, was für eine erhöhte Intuitivität spricht, da eine niedrigere Ebene im Kontinuum des Wissens angesprochen wird. Quantitativ kann dieser Effekt jedoch nicht eindeutig und inferenzstatistisch belegt werden, und kann daher nur als Trend betrachtet werden.

Kernaussagen: Gestaltungsparameter für richtungsorientierte HMIs

1. Sowohl indirekte (Joysticks) als auch direkt wirkende Eingabeelemente (Tablet-Touchscreen) eignen sich für richtungsorientierte HMIs. Es konnten keine Unterschiede durch verschiedene Eingabeelemente belegt werden.
2. Die kontinuierliche Orientierungsmessung unterstützt – verglichen mit der diskreten Messung – tendenziell die Bildung eines mentalen Modells, wenn noch kein Vorwissen vorhanden ist. Der Effekt sollte weiter untersucht werden.

10.4.3 Limitationen

Die Studie untersucht, wie sich verschiedene HMIs auf die gewählten Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit auswirken und nicht, ob dieser Effekt tatsächlich durch Unterschiede im mentalen Modell oder der Intuitivität verursacht wird. Die sich insbesondere aus den Unterschieden zwischen Novizen und Experten ergebende Schlussfolgerung, dass die neuen HMIs die Interaktion kognitiv effizienter machen, scheint jedoch plausibel, da die HMIs mit identischen Eingabegeräten und Aufgabenbedingungen verglichen werden. Wenn man weiter davon ausgeht, dass sich eine erhöhte kognitive Effizienz in einer geringeren mentalen Beanspruchung und schlussendlich einer erhöhten Intuitivität niederschlägt, liefert die Studie hierzu valide Ergebnisse und belegt den positiven Einfluss der richtungsorientierten HMIs auf die Gebrauchstauglichkeit der Steuerungen. Insgesamt ist die Stärke der beobachteten Effekte jedoch klein und erfordert insbesondere bei den Experten weitere Untersuchungen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse nicht die auf Basis der Laborstudie erwartete Klarheit, vor allem im Bezug auf die Effizienzvorteile. Für diese Beobachtung gibt es mehrere mögliche Ursachen: Erstens kann es sein, dass die mangelnde Eindeutigkeit darauf zurückzuführen ist, dass die geringe Schwierigkeit der Aufgaben in Kombination mit einer ausgedehnten Explorationsphase aller HMIs vor der Aufgabendurchführung zu einer insgesamt geringen mentalen Beanspruchung führt. Bei der Konzeption des Experiments wurden die Aufgaben so gewählt, dass sie dem tatsächlichen Kranbetrieb nahe kommen, aber nicht besonders schwierig sind. Der Grund hierfür ist, dass es das Hauptziel der Studie war, die Interaktion der Teilnehmer mit dem System und nicht ihre Problemlösungskapazität zu bewerten. Folglich boten die gewählten realitätsnahen Aufgaben sowohl Experten als auch Anfängern die Möglichkeit, sie zügig und richtig auszuführen. Dies hat zur Folge, dass der mentale Umkodierungsaufwand keinen Engpass für die Leistung darstellt und sich der Umkodierungsaufwand daher weder in der Zeit noch in der Fehlerzahl signifikant niederschlägt. Die Teilnehmer hatten genügend kognitive Kapazität, um alle Bewegungen adäquat auszuführen. Für zukünftige Studien wird daher eine Anpassung der Steuerungsaufgaben sowie eine extrinsische Motivation der Probanden, die Aufgaben möglichst schnell durchzuführen, um ein gewisses Level an Stress zu induzieren, empfohlen.

Zweitens besteht Grund zu der Annahme, dass die unerwartet geringen Unterschiede in den Ausführungszeiten zwischen den maschinenzentrierten und richtungsorientierten HMIs in der maximalen Hakengeschwindigkeit begründet sind. Es war zu erwarten, dass die automatisierten (d. h. richtungsorientierten) HMIs etwas langsamer sind als die maschinenzentrierten Modi. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache würden die Ergebnisse einen gewissen Beweis zugunsten der automatisierten Modi liefern, da ein solcher Unterschied nicht beobachtet wurde. Es sollte daher weiter untersucht werden, ob der Leistungsunterschied zwischen den drei Steuerungssystemen mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad

und Zeitdruck zunimmt und welche Rolle unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten hier spielen.

Drittens müssen die Ergebnisse zur Ablagegenauigkeit differenziert betrachtet werden, da es möglich ist, dass eine möglichst kurze Zeit zur Aufgabenerfüllung in einer schlechteren Ablagegenauigkeit resultiert. Die Probanden wurden gebeten, die Aufgaben so zügig wie möglich durchzuführen und im Zweifelsfall eine kürzere Zeit der höheren Genauigkeit vorzuziehen. Diese Abwägung ist üblich und bei der Steuerung jedes Maschinensystems vom Bediener durchzuführen. Nichtsdestotrotz kann es sein, dass sich viel deutlichere Unterschiede in der Ablagegenauigkeit ergeben hätten, wenn die Bediener aufgefordert gewesen wären, die Zeit weniger prioritär zu behandeln.

Viertens zeigen sich in der Studie in beiden Bedienergruppen Verlaufseffekte bei der Verwendung der HMIs. Die Stärke und Dauer der Verlaufseffekte kann – bedingt durch die geringe Aufgabenzahl je HMI – jedoch nicht abschließend bewertet werden. Hier wäre es vorteilhaft gewesen, jeden Probanden mehr Aufgaben mit den HMIs durchführen zu lassen, ähnlich wie es in der Laborstudie der Fall war.

Fünftens könnte sich die Probandenstichprobe – insbesondere die zwei unterschiedlichen Gruppen von Experten und Novizen – als nicht repräsentativ für die allgemeine Bedienerpopulation erweisen. Die Probanden wurden zur Klassifizierung nur um eine Selbstabschätzung gebeten, die nicht geprüft wurde. Insbesondere fand auch keine Abstufung der Experten nach ihrer Vorerfahrung nach Erfahrungswert und Kran- bzw. Steuerungstyp statt. Darüber hinaus waren die Experten signifikant älter als die Novizen²⁰, was darauf hindeutet, dass die kognitiven Fähigkeiten – und damit die Leistung – zu Gunsten der Novizen verzerrt sein könnten, da diese insgesamt mit zunehmendem Alter abnehmen. Diese Tatsache wird durch die Ergebnisse des mentalen Rotationstests unterstützt, die insgesamt zeigen, dass Novizen im Vergleich zu den Experten signifikant besser abschneiden²¹. Dies würde bedeuten, dass die Experten ihre Fähigkeiten im Umgang mit der maschinenzentrierten Steuerung bereits eher voll ausgeschöpft haben, während die Novizen noch mehr Spielraum für Verbesserungen haben.

Abschließend ist zu berücksichtigen, dass die untersuchten richtungsorientierten HMIs zwar möglichst generisch und allgemeingültig aus dem Gestaltungsrahmen und den verfügbaren Gestaltungsgrößen abgeleitet wurden, es aber nicht ausgeschlossen werden kann, dass andere HMI-Gestaltungen oder ein anderer Nutzungskontext zu anderen Studienergebnissen führen. Nichtsdestotrotz sind die positiven Trends durch alle untersuchten richtungsorientierten HMIs konsistent, so dass plausibel ist, dass dieser Effekt von untergeordneter Stärke ist und auch bei anderen Gestaltungslösungen und in einem abgewandelten Nutzungskontext ähnliche Ergebnisse erzielt werden können.

²⁰ $MV_E = 40,5$, $SD_E = 12,2$; $MV_N = 30,4$, $SD_N = 10,1$; $t(52,21) = 3,35$, $p = 0,001$

²¹ $MV_E = 11,9$, $SD_E = 4,75$; $MV_N = 16,0$, $SD_N = 4,67$; $t(53,99) = -3,26$, $p = 0,002$

10.5 Beantwortung der Forschungsfrage 4

Mit Hilfe der Evaluationsstudie sollte untersucht werden, welche Effekte sich durch den Einsatz von nutzerzentrierten (hier: richtungsorientierten) Mensch-Maschine-Schnittstellen im Vergleich zu herkömmlichen Kransteuerungen bei einem Einsatz an einem realen Kran ergeben (Forschungsfrage 4).

Die Effekte lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen:

1. Effekte auf die Gebrauchstauglichkeit
2. Sekundäreffekte auf die mentale Beanspruchung und Intuitivität
3. Effekte auf den Prozess der Lastbewegung (Prozessgrößeneffekte)

Effekte auf die Gebrauchstauglichkeit

Der Einfluss der richtungsorientierten HMIs auf die Gebrauchstauglichkeit ist in den drei Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit unterschiedlich stark ausgeprägt. Der Effekt der richtungsorientierten HMIs auf die Zufriedenstellung ist eindeutig: Alle HMIs sind aus Bediener-sicht signifikant und deutlich zufriedenstellender in der Verwendung. Im Bezug auf die Effizienz erlauben die richtungsorientierten HMIs mindestens die gleiche Genauigkeit und Vollständigkeit im Verhältnis zum eingesetzten Aufwand wie das traditionelle maschinen-zentrierte HMI. Bei den Novizen ergeben sich sogar leichte Vorteile der richtungsorientierten HMIs, was insgesamt auch für eine vereinfachte mentale Modellbildung bei Menschen ohne Vorwissen spricht. Die Effekte der richtungsorientierten Steuerung auf die Dimension der Effektivität, also die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der das Ziel überhaupt erreicht werden kann, sind sehr klein. Es gilt jedoch: Die richtungsorientierten HMIs erlauben mindestens die gleiche Effektivität wie das traditionelle maschinenzentrierte HMI.

Insgesamt haben die richtungsorientierten HMIs einen positiven Einfluss auf die Zufriedenstellung, die zeitliche Effizienz sowie den Verlaufseffekt, wobei die Effekte generell bei den Novizen stärker ausfallen als bei den Experten. Die Effekte der Bedienerstudie bestätigen die Ergebnisse der Laborstudie im Grundsatz, wenn auch mit deutlich schwächeren Effektstärken. Nutzerzentrierte HMIs bieten ein großes Potenzial für die Gestaltung gebrauchstauglicherer Schnittstellen zur Laststeuerung.

Sekundäreffekte auf die mentale Beanspruchung und Intuitivität

Eine Reihe von Indizien gibt wertvolle Hinweise auf die mentale Beanspruchung und Intuitivität der neuen HMIs: Es scheint für die richtungsorientierten HMIs vorteilhaft zu sein, noch kein mentales Modell für die Bedienung eines Krans zu besitzen (Novizen), was insgesamt für eine vereinfachte kognitive Beherrschbarkeit der Schnittstelle spricht. Dies lässt

auch in der Realstudie eine geringere mentale Beanspruchung vermuten, wie es in der Laborstudie bereits eindeutig nachgewiesen werden konnte. Die Novizen (d. h. Bediener ohne Vorerfahrung) sind mit den richtungsorientierten HMIs in der Lage, die Last schneller, sicherer und zufriedenstellender zu bewegen als mit dem maschinenzentrierten HMI, was darauf hindeutet, dass das Vorwissen der Novizen nicht kranstpezifisch sein muss, um die Schnittstelle zu beherrschen. Im Kontinuum des Wissens ist dies gleichbedeutend mit einer niedrigeren Wissens Ebene, da kein Expertenwissen vorhanden sein muss. Folglich deutet auch die Bedienerstudie im realen Nutzungskontext auf eine höhere Intuitivität der richtungsorientierten HMIs hin.

Zusammenfassend erlauben die Ergebnisse der Bedienerstudie die gleichen Schlüsse wie die Ergebnisse der Laborstudie: Die richtungsorientierten HMIs reduzieren die Gefahr mentaler Überbeanspruchung, lassen keine Anzeichen mentaler Unterbeanspruchung bei den Bedienern erkennen und deuten auf eine vereinfachte mentale Modellbildung (kompatible Task-Action-Mappings) sowie weniger notwendiges Vorwissen hin. Gepaart mit den aus der Automatisierung von Prozessgrößen bekannten Konsequenzen sind dies starke Hinweise auf eine erhöhte Intuitivität der Schnittstellen: Es werden tiefere Ebenen im Kontinuum des Wissens angesprochen und dadurch gleichzeitig regel- und fertigkeitbasiertes Verhalten gefördert.

Effekte auf den Prozess der Lastbewegung (Prozessgrößeneffekte)

Über die bedienerspezifischen Effekte hinaus deuten die richtungsorientierten HMIs auch eine Reihe von potenziell positiven Effekten auf den Prozess der Lastbewegung an, insbesondere wenn man davon ausgeht, dass der Anteil an Kranbedienern mit wenig oder keiner Vorerfahrung eher zu- als abnimmt. Novizen sind mit den richtungsorientierten HMIs schneller (geringere Zeit) und sicherer (weniger Fehler), was nicht nur aus Bediener-, sondern auch aus Unternehmersicht erhebliche Vorteile bietet, da sich beides unmittelbar in geringeren Kosten durch Zeitaufwand und potenzielle Schäden niederschlägt.

Die Effekte der richtungsorientierten HMIs auf die Laststeuerung sind vielfältig und überwiegend positiver Natur. Der Umstand, dass die Effektstärken in der vorliegenden Bedienerstudie hinter den Erwartungen zurückbleiben, ändert nichts an der grundsätzlichen Stoßrichtung der Ergebnisse. Forschungsfrage 4 gilt damit als beantwortet.

10.6 Konsequenzen für die Validität des Gestaltungsrahmens

Durch einen Vergleich der nutzerzentrierten HMIs mit den Prinzipien des Gestaltungsrahmens (vgl. Tabelle 5-1 auf Seite 76) wurden für richtungsorientierte HMIs eine Verringerung der mentalen Beanspruchung sowie eine erhöhte Gebrauchstauglichkeit antizipiert. Diese

Annahmen werden durch die Probandenstudie zum Großteil unterstützt. Insbesondere bei den Novizen tritt eine Verbesserung der Bedienerleistung in Form von gesteigerter Effizienz (gleiche Zeit bei geringerer maximaler Hakengeschwindigkeit, geringere Fehlerzahl) sowie eine höhere Zufriedenstellung auf. Daraus folgt unmittelbar, dass der Status Quo im Bereich Kransteuerungen durch die Nutzung richtungsorientierter Steuerungskonzepte verbessert werden kann. Bei den Experten sind die erzielten Ergebnisse weniger eindeutig. Auch hier lässt sich jedoch eine gesteigerte Effizienz vermuten (ausgeprägter Verlaufseffekt, geringere Fehlerzahl) sowie eine mindestens gleichbleibende Effektivität nachweisen, während sich die Zufriedenstellung leicht verbessert, was ebenfalls für eine erhöhte Gebrauchstauglichkeit und reduzierte mentale Beanspruchung spricht.

Basierend auf der Analyse und den Ergebnissen der durchgeführten Probandenstudie wird die Anwendung der richtungsorientierten HMIs anstelle des traditionellen maschinenzentrierten HMI empfohlen.

Da die Verbesserung der Bedienleistung mit einer steigenden Gebrauchstauglichkeit sowie einer Verringerung der mentalen Beanspruchung in Verbindung gebracht werden kann, wird gefolgert, dass die beobachteten Ergebnisse auf eine höhere Intuitivität der richtungsorientierten HMIs im Vergleich zum traditionellen maschinenzentrierten Joystick-HMI schließen lassen. Die bei der Entwicklung des Gestaltungsrahmens dargestellten Sekundäreffekte durch eine erhöhte Intuitivität können folglich auch auf Basis der Probandenstudie angenommen werden:

- Aktivierung niedrigerer Ebenen im Kontinuum des Wissens, Förderung von regel- und fertigkeitbasiertem Verhalten: Effekte bei Novizen ausgeprägter als bei Experten
- Vereinfachtes Erlernen der Interaktion, Fokus auf Aufgabe statt auf HMI: signifikanter Verlaufseffekt bei Novizen und Experten, Effekte bei Novizen ausgeprägter als bei Experten

In weiterer Folge stützen die Ergebnisse der Probandenstudie – wie schon die Laborstudie – die drei entwickelten Gestaltungsrichtlinien, welche die Grundlage für den Gestaltungsrahmen bilden:

1. Aufgabenorientierte (d. h. lastorientierte) Steuerung: direkte Vorgabe der gewünschten Lastbewegung durch den Bediener zur Unterstützung von Task-Action-Mappings als mentalem Modell
2. Kompatibilität zwischen Bedienereingabe (gewünschte Lastbewegung) und Systemausgabe (tatsächliche Lastbewegung), um die Bildung *kompatibler* Task-Action-Mappings zu fördern
3. Gezielte Automatisierung mit Hilfe von rechnergestützten Assistenzfunktionen

Die Studie belegt somit nicht nur die messbaren Effekte einer erhöhten Intuitivität, sondern liefert gleichzeitig weitere Belege für die Validität des entwickelten Gestaltungsrahmens.

Folglich können nicht nur die richtungsorientierten HMIs für die weitere Verwendung empfohlen werden, sondern weiterhin auch die entwickelten Gestaltungsrichtlinien sowie der Gestaltungsrahmen für nutzerzentrierte HMIs.

11 Diskussion

11.1 Reflektion der erreichten Ziele und der Forschungsfragen

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, einen Beitrag zur Entwicklung und Evaluation von nutzerzentrierten Steuerungskonzepten zur Laststeuerung an Kranen zu leisten, in dem aus den Defiziten bisheriger HMIs sowie den Grundprinzipien der nutzerzentrierten Gestaltung ein strukturierter Gestaltungsrahmen zur Entwicklung nutzerzentrierter und aufgabenorientierter Laststeuerungen abgeleitet wird. Basierend auf dem Gestaltungsrahmen sollen nutzerzentrierte Steuerungskonzepte abgeleitet und untersucht werden. Die entwickelten Lösungen sollen dazu beitragen, die Gebrauchstauglichkeit der Schnittstellen zu verbessern, die mentale Beanspruchung zu senken und folglich zu einer erhöhten Intuitivität der Schnittstelle beizutragen. Zum Erreichen dieser Ziele wurden vier Forschungsfragen definiert. Darüber hinaus wurden die Anforderungen an das praxistaugliche, universelle Proof of Concept in Form von acht Basisanforderungen formuliert.

Basierend auf etablierten psychologischen Zusammenhängen im Bereich der mentalen Modelle sowie der Kompatibilität in Kombination mit Automatisierungseffekten wurde zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 („Wie sieht ein systematischer Gestaltungsrahmen zur Entwicklung von nutzerzentrierten Mensch-Maschine-Schnittstellen für Krane aus und welche Gestaltungsrichtlinien bzw. Werkzeuge sollten hierfür berücksichtigt werden?“) ein Gestaltungsrahmen für nutzerzentrierte HMIs entwickelt. Der Gestaltungsrahmen kann direkt für die Gestaltung innovativer HMIs verwendet werden. Dies wurde durch die systematische Ableitung zweier neuartiger Interaktionsparadigmen demonstriert, dem zielorientierten und dem richtungsorientierten Interaktionskonzept. Im Vergleich der Interaktionsparadigmen mit dem vorher entwickelten Gestaltungsrahmen wird deutlich, dass beide Konzepte eine geringere mentale Beanspruchung des Bedieners sowie eine höhere Gebrauchstauglichkeit erwarten lassen, was als direkte Auswirkungen einer erhöhten Schnittstellenintuitivität gesehen werden kann.

Eine anschließende Laborstudie zur Beantwortung von Forschungsfrage 2 („Welche Auswirkungen haben nutzerzentrierte Mensch-Maschine-Schnittstellen?“) mit 48 Probanden zeigt die positiven Effekte der nutzerzentrierten HMIs auf die mentale Beanspruchung und die Gebrauchstauglichkeit eindeutig auf, mit nur geringen Unterschieden zwischen dem ziel- und dem richtungsorientierten HMI. Dies zeigt nicht nur die Potenziale der beiden HMI-Ausprägungen im Hinblick auf die Schnittstellenintuitivität, sondern belegt in einem ersten Evaluationsschritt die Validität der Gestaltungsregeln und des resultierenden Gestaltungsrahmens. Die Ergänzung der deskriptiven Analysen durch inferenzstatistische Auswertungen und die zumeist eindeutige Signifikanz der Effekte lässt erwarten, dass die be-

obachteten Zusammenhänge auch in der Gesamtpopulation der Kranbediener auftreten, was ebenfalls für die zukünftige Anwendung des Gestaltungsrahmens spricht.

Bei der Umsetzung des zielorientierten Steuerungskonzepts in zwei Ausprägungen ergaben sich unvorhergesehene technische Limitierungen, die mit aktuell verfügbarer Technik nicht zufriedenstellend beseitigt werden konnten. Aus diesem Grund verbleiben die beiden zielorientierten HMIs über diese Arbeit hinaus im Konzeptstatus, auch wenn die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der beiden Implementierungen gezeigt werden konnte und alle Gestaltungsregeln erfüllt werden. Beispielsweise ist es möglich, über die beiden HMI-Konzepte und bei Verwendung des vorgestellten Steuerungs- und Regelungskonzepts inkl. inverser Kinematik die Bedieneringabe (Bewegungswunsch) in eine entsprechende Hakenbewegung (Ausgabe) umzurechnen sowie die Kranantriebe entsprechend anzusteuern. Eine Evaluation im realen Nutzungskontext muss jedoch Gegenstand zukünftiger Forschungstätigkeiten sein, wenn die technischen Limitationen aufgelöst werden können. Die zielorientierten HMIs bleiben den letzten Teil der dritten Forschungsfrage (praxistaugliches Proof of Concept) schuldig und werden folglich auch nicht für die Beantwortung von Forschungsfrage 4 herangezogen.

Das richtungsorientierte Interaktionsparadigma kann zur vollständigen Beantwortung von Forschungsfrage 3 („Wie können nutzerzentrierte Steuerungskonzepte für Krane mit bewegtem Bediener im realistischen Nutzungskontext aussehen und wie lassen sie sich umsetzen?“) in drei Ausprägungen umgesetzt werden. Als Eingabeelemente eignen sich sowohl Joysticks als auch ein Tablet-Touchscreen. Die Bedienerausrichtung kann über integrierte MEMS-Sensorik zuverlässig erfasst werden. Mit Hilfe des entwickelten Steuerungs- und Regelungskonzepts inkl. inverser Kinematik können sowohl die Bedieneringabe (Bewegungswunsch) in eine entsprechende Hakenbewegung (Ausgabe) umgerechnet als auch die Kranantriebe entsprechend angesteuert werden. Das Proof of Concept im realen Nutzungskontext an einem Ladekran zeigt, dass alle Basisanforderungen an nutzerzentrierte HMIs erfüllt werden können. Darüber hinaus sind alle Richtlinien des Gestaltungsrahmens erfüllt.

In einem abschließenden Schritt wurden die richtungsorientierten HMIs in einer Probandenstudie mit 56 Teilnehmern in zwei Bedienergruppen am Ladekran auf ihre Gebrauchstauglichkeit untersucht. Die Effekte des Konzepts auf die mentale Beanspruchung waren in der Laborstudie so eindeutig, dass auf eine erneute Beanspruchungsmessung verzichtet wurde, zumal dies außerhalb der Laborumgebungen ohnehin mit großen Unsicherheiten behaftet wäre. Die Ergebnisse der Probandenstudie beantworten die vierte Forschungsfrage: „Welche Effekte und Verbesserungen ergeben sich durch den Einsatz von nutzerzentrierten Mensch-Maschine-Schnittstellen im Vergleich zu herkömmlichen Kransteuerungen bei einem Einsatz an einem realen Kran?“. Zwar bleiben die gemessenen Effektstärken hinter den Erwartungen zurück, jedoch sind die beobachteten Trends eindeutig und sprechen für eine erhöhte Gebrauchstauglichkeit der nutzerzentrierten HMIs. Es ergeben sich keine

Widersprüche zu den Ergebnissen der Laborstudie, und die Trends weisen allesamt in eine die Laborergebnisse unterstützende Richtung, insbesondere wenn man die unterschiedlichen Ergebnisse in den beiden Nutzergruppen betrachtet. Somit stützen die Ergebnisse nicht nur die antizipierten Effekte von richtungsorientierten HMIs auf die Gebrauchstauglichkeit, mentale Beanspruchung und folglich die Intuitivität, sondern auch die Validität des Gestaltungsrahmens.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit leisten somit einen Beitrag

- zur Abkehr von der maschinenzentrierten Designperspektive mit Hilfe eines nutzerzentrierten Gestaltungsansatzes,
- zur systematischen Gestaltung von nutzerzentrierten Laststeuerungen,
- zur Vereinbarkeit von Auslegerspitzensteuerung mit den Vorteilen eines bewegten Bedieners (Funksteuerung), so dass grundlegende Kompatibilitätsprinzipien konsequent berücksichtigt werden sowie
- zur praxistauglichen und universellen Einsetzbarkeit von nutzerzentrierten Laststeuerungen außerhalb der Laborumgebung an unterschiedlichen Hebemitteln.

Die angestrebten Ergebnisse der Arbeit wurden erreicht. Im nachfolgenden Abschlusskapitel wird sich aus dieser Arbeit ergebendes weiteres Forschungspotenzial in einem ausführlichen Ausblick aufgegriffen.

11.2 Grenzen der Konzepte

Die nutzerzentrierten HMIs zur Laststeuerung eignen sich grundsätzlich für den Einsatz an allen Krantypen im industriellen Umfeld, die von einer Kabine aus gesteuert werden oder bei denen Funksteuerungen zum Einsatz kommen. Im Rahmen der Forschungstätigkeiten wurden jedoch auch einige Grenzen deutlich, die nicht unerwähnt bleiben sollen.

Grenzen der HMIs durch Verwendung aktuell verfügbarer Technologie

Sowohl bei den ziel- als auch bei den richtungsorientierten Steuerungskonzepten wird deutlich, dass sich die Steuerungen und insbesondere die benötigte Sensorik am Rand dessen bewegen, was derzeit technologisch unter den Randbedingungen eines industrienahen Umfelds (u. a. witterungsunabhängig, robuste und wiederholgenaue Ortung, ...) technisch möglich ist, wenn gleichzeitig grundlegende ergonomische Prinzipien (Tragbarkeit der Komponenten etc.) sowie eine gewisse Wirtschaftlichkeit der verwendeten Systemelemente vorausgesetzt werden. Die Schwierigkeiten, die sich bei der Umsetzung der Steuerungskonzepte aus der verwendeten Technologie ergeben, wurden ausführlich in den Abschnitten 8.3 und 9.3 dargelegt. Die Überwindung der genannten Limitationen ist in den wichtigsten

Bereichen absehbar, da sich die entsprechenden Technologien zügig weiterentwickeln. Daher ist davon auszugehen, dass sich die vorgestellten Steuerungskonzepte in naher Zukunft praxisnah und robust für einen Einsatz an beliebigen Hebmitteln implementieren lassen werden.

Auswahl der Interaktionselemente

Die Interaktionselemente für die ziel- und richtungsorientierten HMIs wurden systematisch nach dem Ausschlussprinzip ausgewählt. Es ist nicht auszuschließen, dass sich unter anderen Randbedingungen auch andere Eingabeelemente für die Realisierung innovativer nutzerzentrierter Steuerungskonzepte eignen oder dass sich durch ein abgewandeltes Vorgehen nutzerzentrierte Steuerungskonzepte ergeben, die von den in dieser Arbeit vorgestellten HMIs wesentlich abweichen. Dies kann dann auch zu veränderten Ergebnissen bei der Untersuchung durch Probandenstudien führen. Nichtsdestotrotz bildet der Gestaltungsrahmen für nutzerzentrierte Steuerungskonzepte eine Grundlage, die von der konkreten Auswahl der Interaktionselemente unabhängig bleibt. Bei konsequenter Anwendung des Gestaltungsrahmens für die Konzeptionierung von nutzerzentrierten HMIs zur Laststeuerung (d. h. Gewährleistung von Kompatibilität, Task-Action-Mappings und Automatisierungsgrad) ist somit – unabhängig von der Art der Eingabeelemente – gewährleistet, dass die zugrunde liegenden ergonomischen Messgrößen (Gebrauchstauglichkeit, mentale Beanspruchung) positiv beeinflusst werden, was in Summe zu einer intuitiveren Schnittstellengestaltung führt.

Begrenzte Aussagekraft der Evaluationsergebnisse

Nach ausführlicher Untersuchung der entwickelten nutzerzentrierten HMIs durch zwei Probandenstudien lässt sich festhalten, dass die Laborstudie ein enormes Potenzial aufzeigt, das in der abschließenden Realstudie nur zum Teil und mit deutlich schwächeren Effektstärken bestätigt werden konnte. Während in der Laborstudie signifikante Verbesserungen der Bediener hinsichtlich der mentalen Beanspruchung (objektiv und subjektiv), den Leistungsmessgrößen (Zeit zur Aufgabenerfüllung, Gesamtdistanz der TCP-Bewegung, TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung) sowie der subjektiven Zufriedenheit (SUS) aufgezeigt werden konnte, sind die Resultate der finalen Evaluation differenzierter. Die in ihrer Deutlichkeit hinter den Erwartungen zurückbleibenden Ergebnisse der Realstudie sind jedoch bei genauerer Analyse durchaus aussagekräftig und in ihrer Tendenz schlüssig zur Laborstudie und die Limitationen der Studie konnten in Abschnitt 10.4.3 identifiziert und den Ergebnissen gegenübergestellt werden. Für zukünftige und weiterführende Untersuchungen sollte das Studiendesign entsprechend angepasst werden.

Ironies of Automation

Der Bediener wird durch die nutzerzentrierten HMIs in seinen Steuerungs- und Regelungsaufgaben wesentlich entlastet. Auf der einen Seite führt dies dazu, dass der Bediener insgesamt unerfahrener in der maschinenzentrierten (d. h. freiheitsgradbasierten) Steuerung wird. Vor allem bei selten auftretenden Sonderfällen in der Kranbedienung, wenn die manuelle Freiheitsgrad-Steuerung die einzig sinnvolle Steuerungsmöglichkeit ist²², ist es jedoch von entscheidender Bedeutung, dass der Bediener so routiniert in der Anwendung der maschinenzentrierten Steuerung ist, dass er den Kran fehlerfrei bedienen kann. Leider führt eine generelle Entlastung des Bedieners zu einer Verschlechterung der Routine in genau den Situationen, in denen es auf die Routine ankommt. Ein Lösungsansatz wäre, ein weiteres Assistenzsystem zu entwickeln, das auch einem nicht-routinierten Bediener das Lasthandling in solchen Sonderfällen sicher ermöglicht. Ein Assistenzsystem hat so zur Folge, dass weitere Assistenzsysteme notwendig werden können (Ironie of Automation 1).

Auf der anderen Seite wird der Bediener durch die nutzerzentrierten HMIs nur bei seinen Steuerungs- und Regelungsaufgaben entlastet. Seine Sicherheits- und Überwachungsaufgaben bleiben unverändert. Dies stellt eine Gefahr dar, da bei den Steuerungs- und Regelungsaufgaben somit tendenziell weniger Konzentration gefordert ist und gleichzeitig das Konzentrationsniveau für die Sicherheitsaufgaben unverändert hoch sein soll. Mit solchen unterschiedlichen Konzentrationsniveaus können Menschen grundsätzlich nicht gut umgehen und es besteht die Gefahr, dass durch die verminderte Konzentration auf die Steuerung des Krans auch die Sicherheitsaufgaben weniger fokussiert ausgeführt werden. Dieses Problem ließe sich lösen, wenn zusätzlich zum Assistenzsystem für die Steuerungs- und Regelungsaufgaben auch Sicherheitsaufgaben von der Kransteuerung übernommen werden. Auch in diesem Fall führt daher ein Assistenzsystem dazu, dass tendenziell weitere Assistenzsysteme notwendig sind (Ironie of Automation 2).

Dieses Phänomen ist bei der Kranbedienung und der Gestaltung von Kran- bzw. Laststeuerungen auch in Zukunft zu berücksichtigen. Kranbediener müssen entweder in der Lage sein, auch auf spezielle Situationen und insbesondere sicherheitskritische Ereignisse korrekt und sicher zu reagieren, oder sie müssen durch zusätzliche Assistenzsysteme weiter unterstützt werden, um den gesamten Bedienungskontext konsequent nutzerzentriert zu gestalten.

²²Ein Beispiel hierfür ist das Heben einer Last durch ein geöffnetes Fenster in ein Gebäude hinein, wie es immer wieder mit Ladekränen durchgeführt wird. In diesem Fall kann sich der Bediener aufgrund des engen Fensters nicht auf die inverse Kinematik verlassen, sondern ist gezwungen mit Hilfe der manuellen Steuerung sicherzustellen, dass nur der Teleskopausschub bewegt wird, um Fassade, Kran und Last nicht zu beschädigen.

Umgebungsüberwachung

Die Verwendung einer inversen Kinematik für die nutzerzentrierten HMIs führt dazu, dass der Kranbediener nicht mehr unmittelbar Einfluss auf die Bewegung des Kranauslegers hat, da die Auslegerbewegung als Überlagerung der Gelenkbewegungen vom Steuergerät vorgegeben wird. Befinden sich beim Lasthandling Gebäude oder Gegenstände in der Nähe des Auslegers, besteht somit erhöhte Kollisionsgefahr. Dieser Effekt wird zusätzlich verstärkt, wenn der Bediener bei Verwendung der nutzerzentrierten HMIs nicht mehr auf den Kran, sondern auf die Last fokussiert ist und er somit gegebenenfalls weniger auf Auslegerbewegungen achtet. Deshalb wäre es wünschenswert, zusätzlich zu den nutzerzentrierten HMIs ein Anti-Kollisions-System für den gesamten Kranausleger zu implementieren. Hier stößt jedoch aufgrund der großen räumlichen Ausdehnung von Auslegerstrukturen selbst moderne Sensorik schnell an ihre Grenzen. Im Rahmen zukünftiger Forschungstätigkeiten sollte hier nach einer Lösung gesucht werden, um so das Potenzial der nutzerzentrierten Steuerungskonzepte noch besser erschließen zu können und die Sicherheit für Mensch und Maschine weiter zu verbessern.

11.3 Übertragbarkeit der Steuerungskonzepte auf andere Anwendungsfälle

In allen Anwendungsfällen, wo der Haken bzw. die Auslegerspitze als Endeffektor den für die Arbeitsaufgabe maßgeblich zu steuernden Punkt darstellt, ist eine sinnvolle Verwendung der nutzerzentrierten Steuerungskonzepte denkbar. Eine nicht abschließende Aufzählung findet sich bei der Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes in Abschnitt 3.1. Die nutzerzentrierten HMIs bieten somit bei allen Krantypen, aber auch über die Anwendung an Kranen hinaus, ein erhebliches Anwendungspotenzial. Einige beispielhafte Anwendungsmöglichkeiten werden im Folgenden erläutert.

11.3.1 Übertragbarkeit auf andere Krantypen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die HMIs demonstratorisch an einem LKW-Ladekran implementiert und untersucht. Der ausgewählte Nutzungskontext (siehe Kapitel 7) wurde dabei primär von äußeren Randbedingungen an der Forschungsstelle beeinflusst. Alle Krantypen (vgl. Abschnitt 2.3) besitzen einen Endeffektor zur Lastmanipulation mit dem Zweck, eine Last zu heben, senken oder in einer oder mehreren horizontalen Richtungen zu bewegen. Die nutzerzentrierten HMIs ermöglichen genau diese Funktionalität, bei gleichzeitig erheblich veränderter Benutzerschnittstelle. Aus diesem Grund lassen sich die nutzerzentrierten HMIs grundsätzlich auf alle anderen Krantypen übertragen, unabhängig von der

Bauart oder dem Anwendungsfall. Voraussetzung ist, dass die verwendete inverse Kinematik so viele DOFs verarbeiten kann, wie der Kran besitzt. Die in Abschnitt 7.3 vorgestellte Kinematik zeigt sich in der Simulation bei bis zu 10 DOFs robust und performant deckt damit alle Anwendungsfälle ab. Besonders hohes Potenzial bieten die vorgestellten HMIs bei der Funkbedienung durch einen Bediener, der sich im Umfeld der Hebeaufgabe viel bewegt.

11.3.2 Übertragbarkeit auf ähnliche Maschinensysteme

Auch bei Maschinen, die nicht primär die Lastmanipulation mit Hilfe eines Hakens zum Zweck haben, bieten sich sinnvolle Anwendungsfälle für die intuitive Laststeuerung an.

Autobetonpumpen

Autobetonpumpen werden fast ausschließlich mit Hilfe von Funksteuerungen gesteuert. Der Bediener befindet sich häufig weit weg vom Fahrzeug in der Nähe der Auslegerspitze, an dem der sog. Endschlauch zum Betonaustritt angebracht ist. Im Lauf des Betoniervorgangs ist es notwendig, den Endschlauch über die gesamte Betonierfläche zu bewegen. Bei den allermeisten Aufgaben geschieht dies über das Abfahren eines Streifenmusters, also in geraden Linien über das Betonierfeld hinweg. Herkömmliche Funksteuerungen haben dabei den Nachteil, dass sich der Endschlauch zwar in geraden Linien bewegen soll, die Auslegergelenke aber lediglich rotatorische Bewegungen zulassen. Ferner besitzen die meisten Autobetonpumpen 5 oder mehr DOFs. Die vom Bediener während der Bedienung geforderte Umrechnung der gewünschten Endschlauchbewegung auf die einzelnen Freiheitsgrad-Bewegungen ist somit noch komplexer als es bei Kranen der Fall ist. Zusätzlich muss der Bediener seine eigene Position zum Gerät bei der Umkodierung berücksichtigen, um die richtigen Bewegungsrichtungen der Gelenke zu identifizieren.

Die nutzerzentrierten richtungsorientierten HMIs hingegen ermöglichen einem Bediener das Abfahren gerader Linien ohne weitere Umkodierung, unabhängig von der Anzahl der DOFs. Daher ist davon auszugehen, dass die positiven Effekte der richtungsorientierten HMIs bei der Anwendung an Autobetonpumpen ebenfalls zu beobachten sind und die Bedienung somit vereinfachen können.

Arbeits- und Hebebühnen

Bei Gelenk-Teleskoparbeitsbühnen, wie sie häufig als LKW- oder Anhänger Aufbau zu finden sind, gelten die gleichen Voraussetzungen wie bei Autobetonpumpen: Viele rotatorische DOFs und einige wenige Teleskop-Bewegungen sollen zu einer insgesamt geradlinigen Bewegung (z. B. entlang einer Gebäudefassade) zusammengesetzt werden. Die

Steuerung erfolgt entweder mit Hilfe einer Funksteuerung oder direkt vom Fahrkorb aus. Insbesondere bei Fassadenarbeiten ist eine hohe Präzision der Fahrkorbbewegung gefordert, um Schäden an Fassade, Maschine und Bediener zu vermeiden. Bei Arbeitsbühnen wird besonders deutlich, dass aus Bedienerperspektive letztendlich vor allem die Bewegung des Arbeitskorbs von Interesse ist und weniger die einzelnen Gelenkbewegungen, die zur Arbeitskorbbewegung führen. Verbunden mit der hohen Gelenkzahl sowie den meist geradlinig gewünschten Bewegungen liegt hier ein weiterer möglicher Anwendungsfall für die richtungsorientierten HMIs vor.

Weitere Lastmanipulatoren

Es existieren viele weitere Anwendungsfälle von Lastmanipulatoren, die häufig mit Hilfe einer Funksteuerung oder von einem entfernten, festen Arbeitsplatz aus teleoperiert werden. Abhängig von der Komplexität des Manipulators, der Anzahl der DOFs sowie den möglichen Bedienerperspektiven lassen sich - ohne Anspruch auf Vollständigkeit - weitere mögliche Anwendungsfälle für die nutzerzentrierten HMIs identifizieren:

- Kranähnliche Forstgeräte (Rückezüge, Harvester): Ausleger mit typischerweise > 4 DOFs, häufige Wiederholung ähnlicher Bewegungen (Auf- oder Abladen eines Holzstapels in mehreren Hubspielen)
- Industrieroboter: hochdynamische Bewegungen, typischerweise > 6 DOFs, TCP-Steuerung, zielorientiertes Anfahren vorab eingeteachter Punkte und inverse Kinematik (schon viele Jahre Standard), bisher noch keine Anpassung der TCP-Steuerung auf die Perspektive des Bedieners
- Roboterarme, Schwerlast-Manipulatoren (z. B. im Kernkraftbereich oder der Raumfahrt): langsame Bewegungen, häufig eingesetzt für große Lasten und entsprechende große räumliche Dimensionen, bisher selten mit TCP-Steuerung

Perspektivisch eignen sich sowohl das ziel- als auch das richtungsorientierte Steuerungskonzept für die Umsetzung an weiteren Lastmanipulatoren.

Sonstige Geräte

Darüber hinaus existieren einige Maschinen, die in der Regel nicht zur Manipulation von Stückgütern verwendet werden, die jedoch trotzdem eine Art Endeffektor besitzen, zu dessen Steuerung mehrere DOFs berücksichtigt werden müssen. Dieser Umstand resultiert auch bei diesen Geräten in einem erhöhten Regelungsaufwand, der anstatt vom Bediener auch (teilweise) von einem Rechner übernommen werden kann. Auch in den folgenden Fällen kann daher von einem Potenzial für nutzerzentrierte HMIs zur Manipulation von Lasten bzw. einem TCP gesprochen werden:

- Hydraulikbagger, Radlader
- Straßenhobel, Planierdrauben
- Kameradrohnen

Abhängig vom konkreten Anwendungsfall lassen sich sowohl das richtungsorientierte als auch das zielorientierte Steuerungskonzept für diese Geräte adaptieren.

Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Gestaltungsrahmen sowie die daraus resultierenden Steuerungen bieten somit erhebliches Potenzial, weitere Geräte und Anwendungsfälle perspektivisch zu erschließen.

11.4 Nutzen der Ergebnisse für ausgewählte Personengruppen

Von den Ergebnissen dieser Arbeit können Hersteller, Betreiber und Bediener von Maschinen zum Lasthandling sowie ähnlicher Maschinensysteme profitieren.

Bediener profitieren unmittelbar von den im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigten Effekten auf die Gebrauchstauglichkeit, mentale Beanspruchung und Intuitivität der zur Steuerung verwendeten HMIs. Dies gilt sowohl für Experten als auch für Novizen. Außerdem ergeben sich aus der intuitiveren und damit leichter zu erlernenden Interaktion geringere Einlernzeiten, was den zahlenmäßig großen Kreis der Novizen als mögliche Kranbediener erschließt. Zusätzlich profitieren alle Bediener – unabhängig von ihrer Vorerfahrung – von den geringeren Fehlerwahrscheinlichkeiten durch die nutzerzentrierten HMIs und damit von einem geringeren Unfallrisiko.

Betreiber profitieren von den neuen Steuerungskonzepten aufgrund der erhöhten Effizienz (Fehler) und dem damit verbundenen Sicherheitsgewinn im Vergleich zu aktuell etablierten Steuerungsansätzen, da die Wahrscheinlichkeit von Fehlbedienungen und folglich die Wahrscheinlichkeit von Schäden an Mensch und Material reduziert werden. Gleichzeitig sinkt die Schulungszeit für neue Mitarbeiter (Lerneffekt), was sich ebenfalls positiv auswirkt, da Schulungen einfacher und breiter aufgestellt werden können und somit mehr Nutzern zugute kommen. Zudem ist eine mögliche Zeiteinsparung bei der Lastmanipulation (Effizienz: Zeit) und damit ein potenzieller wirtschaftlicher Vorteil zu erkennen, was sich ebenfalls positiv auswirkt. Die nutzerzentrierten Steuerungskonzepte haben somit das Potenzial, sich direkt auf die Wettbewerbsfähigkeit der Betreiber (Anwender-Unternehmen) auszuwirken.

Geräte- und Komponentenhersteller profitieren sowohl durch mögliche Marktvorteile, die sich aus der Implementierung der innovativen und intuitiven Bedienkonzepte ergeben, als auch durch ein erweitertes Bedienerkollektiv, da die Bedienung von Geräten zur Lastmanipulation mit Endeffektor (Krane und ähnliche Maschinen) mit Hilfe der nutzerzentrierten

Steuerungskonzepte auch für Novizen schnell und leicht zu erlernen ist. Ferner unterstützen die Forschungsergebnisse Steuerungsanbieter direkt bei ihren eigenen Entwicklungen, indem sie Ideen für neue Produkte aufzeigen und die Praxistauglichkeit der entwickelten Konzepte untersuchen.

Es lässt sich feststellen, dass die Entwicklung des Gestaltungsrahmens für nutzerzentrierte Steuerungskonzepte sowie die Ableitung konkreter HMI-Implementierungen in Kombination mit den durchgeführten Evaluationsstudien das Potenzial für einen großen branchenübergreifenden Anwenderkreis untermauert.

12 Zusammenfassung und Ausblick

12.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Krane sind unverzichtbare Werkzeuge in zahlreichen Industriezweigen, die überall dort eingesetzt werden, wo schwere oder sperrige Lasten bewegt werden müssen. Dem Bediener kommt bei der Steuerung des Krans eine Schlüsselrolle zu: Er muss erstens den Kran, die Last und Umgebung überwachen, zweitens dafür sorgen, dass gefährliche Situationen und Schäden vermieden werden und drittens die Kranantriebe so steuern, dass sich die Last sicher vom Start- zum Zielpunkt bewegt. Heute existierende maschinenzentrierte Kransteuerungen sind entweder als achsbasierte (d. h. freiheitsgradbasierte) oder – weit weniger üblich – als Auslegerspitzensteuerungen ausgeführt. Hierfür kommen üblicherweise HMIs mit Joysticks, Linearhebeln oder Tastern zum Einsatz, mit deren Hilfe der Bediener die einzelnen Kranantriebe oder die Bewegung der Auslegerspitze so ansteuert, dass als Bewegungssumme die gewünschte Hakenbewegung resultiert. Bisherige Kransteuerungen folgen einem maschinenzentrierten Gestaltungsansatz: Die Art und Anzahl der Eingaben ergeben sich aus der Gestaltung der Maschine, auch wenn eigentlich das Ziel jedes Bedieners ist, die Position einer Last, die am Haken hängt, im dreidimensionalen Raum zu verändern (aufgabenorientierte Betrachtung). Die mentale Umkodierung der gewünschten Hakenbewegung in die dafür notwendigen Benutzereingaben ist mit einem mentalen Aufwand verbunden und stellt deshalb eine potenzielle Ermüdungs-, Frustrations- und Fehlerquelle dar, was einer einfachen und effizienten Kransteuerung entgegen steht.

In Industrie und Forschung existieren zahlreiche Vorschläge, wie sich das bisherige maschinenzentrierte HMI anpassen oder verbessern lässt. Es existiert jedoch kein systematischer Gestaltungsansatz für die Entwicklung nutzerzentrierter HMI-Konzepte. Darüber hinaus ergeben sich bei den existierenden Insellösungen bisher ungelöste Probleme im Bereich der Kompatibilität, insbesondere bei der Verwendung von Funksteuerungen sowie bei der Praxis-tauglichkeit.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass alle bisher vorhandenen Steuerungskonzepte mindestens eines oder mehrere der folgenden Defizite aufweisen:

1. Die Kransteuerung basiert auf einer maschinenzentrierten Designperspektive. Dies führt zu einer großen mentalen Beanspruchung, weil mentale Umkodierungen notwendig sind.
2. Zur nutzerzentrierten Gestaltung von Kransteuerungen existiert bisher kein systematischer Gestaltungsrahmen.

3. Auslegerspitzensteuerungen sind bei in der Praxis etablierten Stellteilen nicht mit bewegten Bedienern und der Kransteuerung per Funk so vereinbar, dass grundlegende Kompatibilitätsprinzipien berücksichtigt werden.
4. Bisher vorgestellte Ideen für die kompatible Eingabe der gewünschten Lastbewegung mit Hilfe einer Funksteuerung und Auslegerspitzensteuerung sind bisher nur in kontrollierter (Labor-)Umgebung oder für ganz spezifische Krane bzw. Freiheitsgrad-Zahlen erprobt und nicht praxistauglich und universell einsetzbar.

Um diesen Defiziten systematisch zu begegnen, wurden zunächst auf Basis grundlegender ergonomischer Zusammenhänge sowie einem nutzerzentrierten Gestaltungsansatz drei Gestaltungsrichtlinien entwickelt:

1. Aufgabenorientierte (d. h. lastorientierte) Steuerung durch Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung: direkte Vorgabe der gewünschten Lastbewegung durch den Bediener zur Unterstützung von Task-Action-Mappings als mentalem Modell
2. Sicherstellung von Kompatibilität zwischen Bedienereingabe (gewünschte Lastbewegung) und Systemausgabe (tatsächliche Lastbewegung), um die Bildung *kompatibler* Task-Action-Mappings zu fördern.
3. Gezielte Automatisierung mit Hilfe von rechnergestützten Assistenzfunktionen

Diese Gestaltungsrichtlinien wurden anschließend zu einem gemeinsamen Gestaltungsrahmen zusammengeführt. Es wurde gezeigt, dass die Berücksichtigung der Gestaltungsrichtlinien eine erhöhte Gebrauchstauglichkeit der HMIs sowie eine verringerte mentale Beanspruchung beim Bediener erwarten lässt, was beides als direkte Hinweise auf eine höhere Intuitivität verstanden werden kann. Der Gestaltungsrahmen bietet erstmals eine allgemeine systematische Grundlage zur Ableitung nutzerzentrierter HMIs zur Laststeuerung. Gleichzeitig kann er während des HMI-Entwicklungsprozesses zum Vergleich verschiedener HMI-Konzepte herangezogen werden. Mit Hilfe des Gestaltungsrahmens wurden zwei neuartige Interaktionsparadigmen abgeleitet: das richtungsorientierte und zielorientierte Steuerungskonzept. Es wurde gezeigt, dass die beiden Interaktionsparadigmen die Gestaltungsrichtlinien erfüllen und so die genannten Einflüsse auf die Gebrauchstauglichkeit, mentale Beanspruchung und Intuitivität erwartet werden können.

In einer Laborstudie wurden die beiden Interaktionsparadigmen mit dem maschinenzentrierten HMI verglichen. Hierfür mussten 48 Probanden ohne Vorerfahrung im Bereich Kransteuerung in einer VR-Umgebung mit allen drei HMIs je zehn Hebeaufgaben lösen. Sowohl die gemessene mentale Beanspruchung (Leistungsmaße, Pupillendurchmesser, RTLX) als auch alle drei Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit (Leistungsmaße zur Messung der Effizienz und Effektivität, SUS zur Messung der Zufriedenstellung) zeigen hochsignifikant (Verwendung von deskriptiven Analysen und inferenzstatistischen LMM) den Einfluss der innovativen HMIs: Während das maschinenzentrierte HMI zu mentaler Überbeanspruchung führt, reduzieren die beiden nutzerzentrierten HMIs die Beanspruchung und führen zu einer

verbesserten Leistung, erhöhter Gebrauchstauglichkeit und im Ergebnis höherer Intuitivität. Dies belegt einerseits die Qualität der nutzerzentrierten Interaktion und unterstreicht andererseits die Validität des entwickelten Gestaltungsrahmens, denn die bei Berücksichtigung des Gestaltungsrahmens zu erwartenden Effekte konnten in der Laborstudie nachgewiesen werden. Welches der beiden nutzerzentrierten Interaktionskonzepte besser abschneidet, konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Beide HMIs bieten großes Potenzial.

Zur weiteren Untersuchung wurden beide Interaktionskonzepte im realen Nutzungskontext eines Ladekrans umgesetzt. Hierfür wurde zunächst ein Ladekran mit vier DOFs mit einem Steuerungs- und Regelungskonzept inkl. inverser Kinematik sowie einem Steuergerät ausgestattet, das die Applikation der nutzerzentrierten HMIs ermöglicht. Der Ladekran befindet sich in einer realitätsnahen Umgebung und ermöglicht so die praxistaugliche Untersuchung der HMIs außerhalb des Labors.

Es wurden zwei verschiedene zielorientierte HMIs umgesetzt: Beim ersten HMI erfolgt die Vorgabe des Zielpunkts in Form eines Lichtpunkts mit Hilfe einer starken Taschenlampe. Die Position des Lichtpunkts wird über eine Tiefenkamera und Bildverarbeitung erfasst. Das zweite HMI verwendet die AR-Brille Microsoft HoloLens und ermöglicht die Spezifikation des Zielpunkts und aller notwendigen Bedienereingaben über Holografien im Sichtfeld des Bedieners. Beide HMIs sind funktionsfähig. Es zeigen sich jedoch erhebliche Limitationen, weil die verwendeten Komponenten an den Grenzen ihrer technischen Leistungsfähigkeit betrieben werden. Es konnte keine Alternativhardware gefunden werden, mit der die Probleme zufriedenstellend beseitigt werden konnten. Zwar ist zu erwarten, dass die Limitationen durch weiteren technischen Fortschritt kleiner werden und so zu einer praxistauglichen Anwendbarkeit der zielorientierten HMIs in Zukunft führen; im Rahmen dieser Arbeit konnte das Proof of Concept im realen Nutzungskontext jedoch nur bedingt erbracht werden. Als Konsequenz der technischen Limitierungen wurden die umgesetzten zielorientierten HMIs nicht in einer weiteren Probandenstudie untersucht und verbleiben im Konzeptstatus.

Darüber hinaus wurden zwei richtungsorientierte HMIs konzipiert und am Ladekran umgesetzt. Beim ersten HMI gibt der Bediener die gewünschte Bewegungsrichtung des Hakens über Joysticks auf einer Funksteuerung vor. Durch eine in die Funksteuerung integrierte Ortung (MEMS-Sensorik) ist zu jedem Zeitpunkt die Orientierung des Steuerungskoordinatensystems (und damit der Bedienerorientierung) bekannt, so dass die Eingabe in einem Steuergerät in das Krankoordinatensystem umgerechnet werden kann. Es resultiert eine Hakenbewegung, die immer parallel zur Joystick-Bewegung an der Funksteuerung ist. Das zweite richtungsorientierte HMI arbeitet ähnlich, die Eingabe der gewünschten Bewegungsrichtung erfolgt jedoch nicht durch Joysticks, sondern auf einem touchfähigen Tablet in einem Live-Bild, das von einer am Kranausleger angebrachten Kamera (Draufsicht auf die Hakenumgebung) aufgenommen wird. Durch Wischbewegungen im Kamerabild wird die gewünschte Hakenbewegung vorgegeben. Es konnte gezeigt werden, dass die beiden richtungsorientierten HMIs funktionieren und alle Basisanforderungen an nutzerzentrierte HMIs

sowie die Gestaltungsrichtlinien erfüllen. Das Proof of Concept im Hinblick auf eine praxistaugliche und universell einsetzbare, nutzerzentrierte Laststeuerung wurde erbracht.

In der abschließenden Evaluationsstudie mit 56 Probanden in zwei Bedienergruppen (je 28 Novizen und Experten) wurden die richtungsorientierten Steuerungskonzepte mit zwei verschiedenen maschinenzentrierten Steuerungskonzepten (Joystick und Tablet) verglichen. Hierfür mussten alle Probanden mit jedem HMI drei Aufgaben unterschiedlicher Schwierigkeit lösen. Insbesondere die gemessenen Effizienzmaße (Zeit und Fehler) sowie die über den SUS erfasste Zufriedenstellung bestätigt die Ergebnisse der Laborstudie im Grundsatz, auch wenn die Effekte in der Realstudie insgesamt schwächer ausfallen: In der inferenzstatistischen Untersuchung (LMM) ist der Effekt des HMI meist signifikant, jedoch so schwach, dass nur ausgewählte paarweise Vergleiche zwischen den HMIs signifikante Unterschiede ergeben. Es zeigt sich jedoch, dass insbesondere Novizen – also Bediener ohne bereits vorhandenes mentales Modell zur Kranbedienung – von den richtungsorientierten HMIs in Form einer höheren Gebrauchstauglichkeit profitieren. Besonders deutlich tritt dies bei den Novizen im Hinblick auf die Effizienz sowie die Zufriedenstellung zutage. Bei den Experten ergeben sich weniger signifikante Unterschiede zwischen den richtungsorientierten und den maschinenzentrierten HMIs. Es lässt sich jedoch ein positiver Einfluss auf die Fehlerzahl, den Verlaufseffekt (d. h. Zeitreduktion bei mehrmaliger Verwendung der HMIs) sowie die Zufriedenstellung zeigen. Es gibt sowohl bei den Experten als auch bei den Novizen keine Messgröße, in der die richtungsorientierten HMIs signifikant hinter die maschinenzentrierten HMIs zurückfallen, was in Kombination mit der deutlich verbesserten Zufriedenstellung und der etwas weniger deutlichen Verbesserung der Effizienz für die richtungsorientierten HMIs spricht. Sowohl die beobachteten signifikanten Effekte als auch die deskriptiv sichtbaren Trends weisen in die gleiche Richtung wie die Ergebnisse der Laborstudie. Dies liefert weitere Belege für die Validität des Gestaltungsrahmens und stützt gleichzeitig die Erwartung, dass die richtungsorientierten HMIs zu einer höheren Schnittstellenintuitivität führen.

In der abschließenden Diskussion wurden die gesteckten Ziele sowie die erreichten Ergebnisse reflektiert. Das Ziel, einen Beitrag zur Entwicklung, Implementierung und Evaluation von nutzerzentrierten Steuerungskonzepten zur Laststeuerung an Kranen zu leisten, wurde erreicht. Die Ergebnisse helfen einerseits dabei, die Grundprinzipien der nutzerzentrierten Gestaltung zur Entwicklung nutzerzentrierter und aufgabenorientierter Laststeuerungen anzuwenden, und andererseits geben sie bereits Hinweise bezüglich konkreter Lösungsalternativen und ihrer Effekte auf die Interaktionsqualität. Im Rahmen der Diskussion wurden auch die Limitationen der nutzerzentrierten HMIs aufgezeigt, u. a. im Hinblick auf die Einsatzgrenzen, die Aussagekraft der Evaluationsergebnisse, eine perspektivisch notwendige Umgebungsüberwachung und die Konsequenzen aus fortschreitender Automatisierung (Ironies of Automation). Abschließend wurden weitere potenzielle Anwendungsfälle für die nutzerzentrierten HMIs bei Lasthebemitteln und ähnlichen Maschinensystemen identifiziert

und dargestellt, welche Personengruppen von den präsentierten Forschungsergebnissen profitieren können.

12.2 Ausblick und Ableitung von weiterem Forschungsbedarf

Ebenso wichtig wie die durchgeführten Untersuchungen und die Ergebnisse dieser Arbeit sind die Anhaltspunkte, die sich für weiteren Forschungsbedarf ergeben. Weitere Forschungstätigkeiten werden dringend empfohlen:

Im Bezug auf den Gestaltungsrahmen und die Gestaltungsregeln sollte untersucht werden, ob es weitere Gestaltungsparameter für die Entwicklung von nutzerzentrierten Laststeuerungen gibt, die im Rahmen dieser Arbeit nicht identifiziert und bearbeitet wurden. Nachdem diese Arbeit explizit von den Defiziten der traditionellen maschinenzentrierten Kransteuerungen ausgeht und daraus Verbesserungspotenzial ableitet, sollten zukünftige Untersuchungen darüber hinaus die Schwächen der nutzerzentrierten Steuerungen in die Betrachtung miteinbeziehen. Hierfür können die Probandenstudien der vorliegenden Arbeit einen ersten Angriffspunkt bieten. Es ist empfehlenswert, die Limitationen der dargestellten Studien aufzugreifen und die beobachteten Effekte durch weitere Probandenstudien zu schärfen. Je nach Art und Ausprägung der Effekte in weiteren Studien ergeben sich dann weitere Anhaltspunkte für die Verbesserung oder Erweiterung des Gestaltungsrahmens.

Weiterführend sollte in Zukunft untersucht werden, wie sich unbekannte Situationen (z. B. Fehlfunktionen des Systems) bei den richtungs- und zielorientierten Konzepten auf die situationsspezifische Leistung der Bediener (z. B. Problemlösekapazität) auswirken und ob die im Rahmen dieser Arbeit propagierten Task-Action-Mappings auch in solchen Situationen das präferierte mentale Modell sein können. Falls das nicht der Fall ist, sollte bei der Gestaltung zukünftiger Steuerungen berücksichtigt werden, dass sie nicht nur zur Bildung kompatibler Task-Action-Mappings im Normalbetrieb beitragen, sondern auch für Sonder-situationen eine entsprechende mentale Modellbildung (z. B. Glass Box, Surrogate-Modell) durch die Gestaltung der Steuerung angeregt wird.

Ferner verbleibt insbesondere im Blick auf die dritte Gestaltungsregel (Automatisierung) erhebliches Potenzial: Die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze bewegen sich auf den Automatisierungsebenen 1 - 3 der zehnstufigen Skala von [End-1999]. Es ist anzunehmen, dass höhere Automatisierungsebenen – über die Effekte dieser Arbeit hinaus – einen erheblichen Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit und mentale Beanspruchung des Bedieners haben, und dies sollte untersucht werden. Hierfür sind einerseits technische Konzepte zu entwickeln, die einer höheren Automatisierungsebene entsprechen und andererseits weitere Probandenstudien durchzuführen. In diesem Zusammenhang sollte auch die Frage untersucht werden, ob und in welchen Situationen auf einen Bediener in Zukunft vollständig verzichtet werden kann.

Im Hinblick auf die vorgestellten Steuerungskonzepte ergibt sich ebenfalls weiterer Forschungsbedarf. Die zielorientierten HMIs verbleiben auch am Ende dieser Arbeit im Konzeptstatus und sollten in Zukunft (sofern die geschilderten Limitationen durch technischen Fortschritt kleiner werden) mit weiterentwickelter Technologie erneut aufgegriffen werden. Wenn in diesem Zusammenhang das Proof of Concept auch im realen Nutzungskontext erbracht werden kann, sind anschließend Probandenstudien notwendig, um die Einflüsse der zielorientierten HMIs auf die Gebrauchstauglichkeit und mentale Beanspruchung im realen Nutzungskontext zu untersuchen. In diesem Zusammenhang sollte zudem untersucht werden, wie groß die Gefahr der mentalen Unterbeanspruchung beim zielorientierten Konzept (insbesondere bei langen Lastbewegungen ist), da sich in der Laborstudie der vorliegenden Arbeit die Gefahr der Unterbeanspruchung gezeigt hat.

Sowohl für die ziel- als auch für die richtungsorientierten HMIs werden darüber hinaus weitere Studien empfohlen. Diese Studien sollten

- den Limitationen der Probandenstudien der vorliegenden Arbeit durch geeignete Konzepte entgegentreten (z. B. mehr und schwierigere Aufgaben, andere Stichprobenzusammensetzung, mehr Differenzierung bei der Vorerfahrung, Untersuchung von Langzeit- und Verlaufseffekten),
- die Übertragbarkeit der HMI-Konzepte auf andere Anwendungsfälle validieren,
- Raum für die Untersuchung weiterer HMI-Konzepte haben, die sich aus dem Gestaltungsrahmen ableiten lassen (z. B. andere Interaktionselemente), und
- untersuchen, welche Gestaltungsparameter der Interaktionsparadigmen den größten Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit und mentale Beanspruchung haben.

Abschließend werden für die Zukunft weitere Entwicklungstätigkeiten empfohlen, um Bediener von Hebemitteln und ähnlichen Maschinensystemen weiter zu entlasten und ihnen zu ermöglichen, sich ausschließlich auf die Handhabung der Last zu konzentrieren. Zunächst sollte die Übertragung der nutzerzentrierten Steuerungskonzepte auf kranähnliche und sonstige Maschinensysteme im Rahmen zukünftiger Entwicklungsarbeit untersucht werden. Darüber hinaus sind für alle Einsatzbereiche einerseits Konzepte zur Umgebungserkennung und zur Anti-Kollisions-Überwachung notwendig, die sich dem automatischen Schutz der Maschine (Ausleger etc.) sowie der Umgebung vor Kollisionen widmen, während der Bediener ausschließlich auf die Bewegung des Endeffektors fokussiert ist. Aktuelle technologische Entwicklungen (z. B. Computer Vision, Machine Learning) lassen hier großes Potenzial erkennen. Andererseits existieren eine Fülle von Ideen für weiterführende Assistenzsysteme, z. B. zur Automatisierung repetitiver Arbeitsvorgänge, zum automatischen Anfahren von wichtigen Punkten im Umfeld des Endeffektors (z. B. Anschlagmittel) etc., die in Zukunft weiteres Potenzial bieten, den Prozess des Lasthandlings zu verbessern und aus Bediener-sicht weiter zu vereinfachen. Auch hier sind Einflüsse auf die Gebrauchstauglichkeit, mentale Beanspruchung und letztlich die Intuitivität der Maschinenbedienung zu erwarten, die Gegenstand weiterer Untersuchungen sein sollten.

Literaturverzeichnis

- [3D-2021] 3D Systems, Inc.: Touch. 2021. Url: <https://de.3dsystems.com/haptics-devices/touch> (besucht am 07.01.2021).
- [Abb-2012] Abbink, D. A.; Mulder, M.; Boer, E. R.: Haptic shared control: smoothly shifting control authority? In: *Cognition, Technology & Work* 14.1 (2012), S. 19–28.
- [Abd-2003] Abdel-Rahman, E. M.; Nayfeh, A. H.; Masoud, Z. N.: Dynamics and Control of Cranes: A Review. In: *Journal of Vibration and Control* 9.7 (2003), S. 863–908.
- [Als-2019] Alsuraykh, N. H.; Wilson, M. L.; Tennent, P.; Sharples, S.: How Stress and Mental Workload are Connected. In: Mayora, O.; Forti, S. (Hrsg.): *Proceedings of the 13th EAI International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*. ICPS: ACM international conference proceeding series. ACM, New York, NY, 2019, S. 371–376.
- [Ama-1999] Amat, J.; Casals, A.; Frigola, M.; Pagès J.: Possibilities of man-machine interaction through the perception of human gestures. In: *Contributions to Science* 1.2 (1999), S. 159–173.
- [App-2019] Apple Inc.: Human Interface Guidelines. 2019. Url: <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/> (besucht am 30.08.2019).
- [Ara-2007] Aracil, R.; Buss, M.; Cobos, S.; Ferre, M.; Hirche, S.; Kuschel, M.; Peer, A.: The Human Role in Telerobotics. In: *Advances in Telerobotics* 31 (2007), S. 11–24.
- [Bai-1978] Bainbridge, L.: Forgotten alternatives in skill and work-load. In: *Ergonomics* 21.3 (1978), S. 169–185.
- [Bai-1983] Bainbridge, L.: Ironies of Automation. In: *Automatica* 19.6 (1983), S. 775–779.
- [Bai-2018] Bai, X.; Li, C.; Chen, K.; Feng, Y.; Yu, Z.; Xu, M.: Kinect-Based Hand Tracking for First-Person-Perspective Robotic Arm Teleoperation. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): *2018 IEEE International Conference on Information and Automation*. IEEE, Piscataway, NJ, 2018, S. 684–691.
- [Bak-2011] Bak, M. K.; Hansen, M. R.; Karimi, H. R.: Robust Tool Point Control for Offshore Knuckle Boom Crane. In: Bittanti, S. (Hrsg.): *18th IFAC World Congress 2011*. Bd. 44. Curran, Red Hook, NY, 2011, S. 4594–4599.

- [Ban-2008] Bangor, A.; Kortum, P. T.; Miller, J. T.: An Empirical Evaluation of the System Usability Scale. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 24.6 (2008), S. 574–594.
- [Bau-2008] Bauer, A.; Wollherr, D.; Buss, M.: Human-Robot Collaboration: A Survey. In: *International Journal of Humanoid Robotics* 5.1 (2008), S. 47–66.
- [Bau-2018] Baumgartner, A.: Analyse und Bewertung verschiedener Ansätze zur Lastpendeldämpfung an Kranen. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Bea-2006] Beavers, J.; Moore, J.; Rinehart, R.; Schriver, W.: Crane-Related Fatalities in the Construction Industry. In: *Journal of Construction Engineering and Management* 132.9 (2006), S. 901–910.
- [Bee-2014] Beer, J. M.; Fisk, A. D.; Rogers, W. A.: Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction. In: *Journal of human-robot interaction* 3.2 (2014), S. 74–99.
- [Ben-2012] Bengler, K.; Zimmermann, M.; Bortot, D.; Kienle, M.; Damböck, D.: Interaction Principles for Cooperative Human-Machine Systems. In: *Information Technology* 54.4 (2012), S. 157–164.
- [Ber-2008] Berold, U.: Entwurf und Implementierung digitaler Funkfernsteuersysteme: Untersuchungen am Anwendungsbeispiel eines modernen Fernsteuersystems für Modellflugzeuge. Bd. 18. Erlanger Berichte aus Informations- und Kommunikationstechnik. Shaker, Aachen, 2008.
- [Bes-2006] Bessière, K.; Newhagen, J. E.; Robinson, J. P.; Shneiderman, B.: A model for computer frustration: the role of instrumental and dispositional factors on incident, session, and post-session frustration and mood. In: *Computers in Human Behavior* 22.6 (2006), S. 941–961.
- [Bia-2008] Biagiotti, L.; Melchiorri, C.: Trajectory planning for automatic machines and robots. Springer, Berlin u. a., 2008.
- [Bil-1997] Billings, C. E.: Aviation automation: The search for a human-centered approach. Human factors in transportation. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Mahwah, 1997.
- [Bil-2008] Billard, A.; Calinon, S.; Dillmann, R.; Schaal, S.: Robot Programming by Demonstration. In: Siciliano, B.; Khatib, O. (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008, S. 1371–1394.
- [Bla-2003a] Blackler, A.; Popovic, V.; Mahar, D.: Designing for Intuitive Use of Products. In: Harada, A. (Hrsg.): *Journal of the Asian Design International Conference*. 6th Asian Design Conference. Tsukuba, 2003, S. 1–16.

-
- [Bla-2003b] Blackler, A.; Popovic, V.; Mahar, D.: The nature of intuitive use of products: an experimental approach. In: *Design Studies* 24.6 (2003), S. 491–506.
- [Bla-2007] Blackler, A.; Hurtienne, J.: Towards a unified view of intuitive interaction: definitions, models and tools across the world. In: *MMI-Interaktiv* 13 (2007), S. 36–54.
- [Bla-2010] Blackler, A.; Popovic, V.; Mahar, D.: Investigating users' intuitive interaction with complex artefacts. In: *Applied Ergonomics* 41.1 (2010), S. 72–92.
- [Bla-2015] Blackler, A.; Popovic, V.: Towards Intuitive Interaction Theory. In: *Interacting with Computers* 27.3 (2015), S. 203–209.
- [Bla-2018] Blankemeyer, S.; Wiemann, R.; Posniak, L.; Pregizer, C.; Raatz, A.: Intuitive Robot Programming Using Augmented Reality. In: *Procedia CIRP* 76 (2018), S. 155–160.
- [Boc-2012] Bock, T.; Linner, T.; Ikeda, W.: Exoskeleton and Humanoid Robotic Technology in Construction and Built Environment. In: Zaier, R. (Hrsg.): *The Future of Humanoid Robots*. InTech Europe, 2012, S. 111–146.
- [Bor-2014] Bortot, D.: Ergonomic human-robot coexistence in the branch of production. Dissertation. München: Technische Universität München, 2014.
- [Bre-2015] Brendel, F.: Funksteuersysteme für die Industrie: Sicherheit und Effizienz bei der drahtlosen Maschinenführung. Bd. 375. Die Bibliothek der Technik. Verlag Moderne Industrie, München, 2015.
- [Bro-1996] Brooke, J.: SUS: a quick and dirty usability scale. In: Jordan, P. W.; Thomas, B.; McClelland, I. L. (Hrsg.): *Usability evaluation in industry*. Taylor & Francis, London u. a., 1996, S. 4–7.
- [Bub-1993] Bubb, H.: Systemergonomische Gestaltung. In: Schmidtke, H.; Bernotat, R. (Hrsg.): *Ergonomie*. Hanser, München, 1993, S. 390–420.
- [Bub-2015] Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M.: *Automobilergonomie*. ATZ / MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [Bun-1986] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV-Regel 109-014: Richtlinien für Funkfernsteuerungen von Kranen. 1986.
- [Bun-1993] Bundesverband der Unfallkassen: Unfallverhütungsvorschrift Kraftbetriebene Arbeitsmittel: vom Februar 1985, in der Fassung vom Januar 1993. 1993.
- [Bun-1995] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV Regel 103-006: Einrichtungen zur drahtlosen Übertragung von Steuerbefehlen. 1995.
- [Bun-1997a] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV Vorschrift 54: Winden, Hub- und Zuggeräte. 1997.

- [Bun-1997b] Bundesverband der Unfallkassen: Unfallverhütungsvorschrift Lastaufnahmeeinrichtungen im Hebezeugbetrieb: vom 1. April 1991, in der Fassung vom 1. Januar 1997. 1997.
- [Bun-2008] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV Regel 100-500: Betreiben von Arbeitsmitteln. 2008.
- [Bun-2013a] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV Vorschrift 1: Grundsätze der Prävention Grundsätze der Prävention. 2013.
- [Bun-2013b] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV Vorschrift 52: Krane. 2013.
- [Bye-1988] Byers, J. C.; Bittner, A. C.; Hill, S. G.; Zaklad, A. L.; Christ, R. E.: Workload Assessment of a Remotely Piloted Vehicle (RPV) System. In: Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting. Bd. 32. 1988, S. 1145–1149.
- [Cai-2007] Cain, B.: A Review of the Mental Workload Literature. In: Defence Research and Development Canada Toronto - Human System Integration Section (2007), S. 1–34.
- [Cam-2016] Campeau-Lecours, A.; Foucault, S.; Laliberté, T.; Mayer-St-Onge, B.; Gosselin, B.: A cable-suspended intelligent crane assist device for the intuitive manipulation of large payloads. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 21.4 (2016), S. 2073–2084.
- [Car-1987] Carroll, J. M.; Olson, J. R.: Mental Models in Human Computer Interaction. National academy Press, Washington D.C., 1987.
- [Car-2013] Carlos Parga, Xiaou Li, Wen Yu: Tele-manipulation of Robot Arm with Smartphone. In: 6th International Symposium on Resilient Control Systems (ISRCS) (2013), S. 60–65.
- [Cha-1995] Chan, T.; Dubey, R.: A weighted least-norm solution based scheme for avoiding joint limits for redundant joint manipulators. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation 11.2 (1995), S. 286–292.
- [Cha-2016] Chakraborty, S.; Meena, R.: Saving Time by Tip Control & Automation of Knuckle and Boom Hydraulic Crane. In: International Journal of Hybrid Information Technology 9.4 (2016), S. 235–254.
- [Cha-2019a] Chacko, S. M.; Kapila, V.: An Augmented Reality Interface for Human-Robot Interaction in Unconstrained Environments. In: 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2019), S. 3222–3228.
- [Cha-2019b] Charles, R. L.; Nixon, J.: Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. In: Applied Ergonomics 74 (2019), S. 221–232.

-
- [Cha-2020] Chacon-Quesada, R.; Demir, Y.: Augmented Reality User Interfaces for Heterogeneous Multirobot Control. In: 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2020), S. 11439–11444.
- [Che-2007] Chen, J. Y. C.; Haas, E. C.; Barnes, M. J.: Human Performance Issues and User Interface Design for Teleoperated Robots. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews) 37.6 (2007), S. 1231–1245.
- [Coh-2013] Cohen, J.: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2nd ed. Taylor and Francis, Hoboken, 2013.
- [Col-2003] Colgate, J. E.; Peshkin, M.; Klostermeyer, S.: Intelligent assist devices in industrial applications: a review. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, Piscataway, NJ, 2003, S. 2516–2521.
- [Cra-2003] Crandall, J.; Nielsen, C.; Goodrich, M. A.: Towards Predicting Robot Team Performance. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Proceedings. IEEE, Piscataway, NJ, 2003, S. 906–911.
- [Dan-2019] Daniel Delang / TUM: Fotoaufnahmen im Rahmen der TUM-Pressearbeit. 2019.
- [DeJ-2004] DeJong, B. P.; Colgate, J. E.; Peshkin, M. A.: Improving teleoperation: reducing mental rotations and translations. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. IEEE, Piscataway, NJ, 2004, S. 3708–3714.
- [Dem-2019] Demag: E-Balancer. 2019. Url: <https://www.demagcranes.de/produkte/hebezeuge/kompakthebezeuge/e-balancer> (besucht am 31. 03. 2020).
- [Dem-2020] Demag: Kettenzug DCBS: Intuitiv steuern. Präzise positionieren. 2020. Url: <https://www.demagcranes.de/produkte/hebezeuge/kettenzuege/kettenzug-dcbs> (besucht am 01. 12. 2020).
- [Deu-2019] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Arbeitsunfallgeschehen 2018: Statistik. DGUV, Berlin, 2019.
- [Dha-2019] Dhalmahapatra, K.; Singh, K.; Jain, Y.; Maiti, J.: Exploring Causes of Crane Accidents from Incident Reports Using Decision Tree. In: Satapathy, S. C.; Joshi, A. (Hrsg.): Information and Communication Technology for Intelligent Systems. Bd. 106. Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer Singapore, Singapore, 2019, S. 175–183.

- [DIN-10075-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe. Berlin, 2018.
- [DIN-10075-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 2: Gestaltungsgrundsätze. Berlin, 2000.
- [DIN-10075-3] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 3: Grundsätze und Anforderungen an Verfahren zur Messung und Erfassung psychischer Arbeitsbelastung. Berlin, 2004.
- [DIN-12100] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung. Berlin, 2011.
- [DIN-12999] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Ladekrane. Berlin, 2013.
- [DIN-13000] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane – Fahrzeugkrane. Berlin, 2014.
- [DIN-13135] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Sicherheit - Konstruktion - Anforderungen an die Ausrüstung. Berlin, 2013.
- [DIN-13557] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Stellteile und Steuerstände. Berlin, 2009.
- [DIN-13849-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze. Berlin, 2016.
- [DIN-13850] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Not-Halt-Funktion – Gestaltungsleitsätze. Berlin, 2016.
- [DIN-14439] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Sicherheit - Turmdrehkrane. Berlin, 2010.
- [DIN-15001-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Begriffe, Einteilung nach der Bauart. Berlin, 1973.
- [DIN-15001-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Begriffe, Einteilung nach der Verwendung. Berlin, 1975.
- [DIN-15011] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane – Brücken- und Portalkrane. Berlin, 2014.
- [DIN-15025] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane: Betätigungssinn und Anordnung von Stellteilen in Krankabinen. Berlin, 1978.

-
- [DIN-26800] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie – Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte. Berlin, 2011.
- [DIN-60204-32] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 32: Anforderungen für Hebezeuge. Berlin, 2009.
- [DIN-61310-3] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen - Anzeigen, Kennzeichen und Bedienen - Teil 3: Anforderungen an die Anordnung und den Betrieb von Bedienteilen (Stellteilen). Berlin, 2008.
- [DIN-614-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze. Berlin, 2009.
- [DIN-614-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 2: Wechselwirkungen zwischen der Gestaltung von Maschinen und den Arbeitsaufgaben. Berlin, 2008.
- [DIN-61508] Deutsches Institut für Normung e.V.: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme. Berlin, 2011.
- [DIN-6385] Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin, 2016.
- [DIN-894-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen. Berlin, 2009.
- [DIN-894-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 2: Anzeigen. Berlin, 2009.
- [DIN-894-3] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 3: Stellteile. Berlin, 2010.
- [DIN-894-4] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 4: Lage und Anordnung von Anzeigen und Stellteilen. Berlin, 2010.
- [DIN-9241-11] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte. Berlin, 2016.
- [DIN-9241-110] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung. Berlin, 2006.

- [DIN-9241-210] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-Maschine-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. Berlin, 2011.
- [DIN-92419] Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundsätze der ergonomischen Gestaltung assistiver Systeme. Berlin, 2020.
- [Du-2010] Du, G.-L.; Zhang, P.; Yang, L.-Y.; Su, Y.-B.: Robot teleoperation using a vision-based manipulation method. In: Wan, W. (Hrsg.): International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP), 2010. IEEE, Piscataway, NJ, 2010, S. 945–949.
- [Du-2014] Du, G.; Zhang, P.: Markerless human–robot interface for dual robot manipulators using Kinect sensor. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 30.2 (2014), S. 150–159.
- [End-1999] Endsley, M. R.; Kaber, D. B.: Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. In: Ergonomics 42.3 (1999), S. 462–492.
- [Eps-2018] Epsilon Kran: Epsilon Highlights 2018: Smart Control. 2018. Url: https://www.palfingerepsilon.com/de_DE/EPSILON-Interforst/EPSILON-Highlights (besucht am 31.03.2020).
- [EU-2006] Europäische Kommission, Europäisches Parlament: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG. 2006.
- [Fah-2009] Fahimi, F.: Autonomous Robots: Modeling, Path Planning, and Control. Springer Science+Business Media LLC, Boston, MA, 2009.
- [Fal-2015] Fall, C. L.; Turgeon, P.; Campeau-Lecours, A.; Maheu, V.; Boukadoum, M.; Roy, S.; Massicotte, D.; Gosselin, C.; Gosselin, B.: Intuitive Wireless Control of a Robotic Arm for people living with an upper body Disability. In: Cerutti, S.; Patton, J. (Hrsg.): 2015 37th annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). IEEE, Piscataway, NJ, 2015, S. 4399–4402.
- [Fan-2009] Fang, H.; Ong, S. K.; Nee, A. Y.-C.: Robot Programming Using Augmented Reality. In: Ugail, H. (Hrsg.): 2009 International Conference on Cyber-Worlds. IEEE, Piscataway, NJ, 2009, S. 13–20.
- [Fan-2018] Fang, Y.; Cho, Y. K.; Durso, F.; Seo, J.: Assessment of operator’s situation awareness for smart operation of mobile cranes. In: Automation in Construction 85 (2018), S. 65–75.
- [Fin-2006] Finstad, K.: The System Usability Scale and Non-Native English Speakers. In: Journal of Usability Studies 1.4 (2006), S. 185–188.

-
- [Fin-2018] Fingerle, R.; Krause, L.; Tausch, H.; Wittenberg, C.: User-Centered Design and Evaluation of Smartphone-Controls for the Movement Control of Mobile Platforms. In: Chen, J. (Hrsg.): *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, Cham, 2018, S. 87–98.
- [Fit-1953] Fitts, P. M.; Seeger, C. M.: S-R Compatibility: Spatial Characteristics of Stimulus and Response Codes. In: *Journal of Experimental Psychology* 46.3 (1953), S. 199–210.
- [Fit-1954] Fitts, P. M.; Deininger, R. L.: S-R Compatibility: Correspondence Among Paired Elements within Stimulus and Response Codes. In: *Journal of Experimental Psychology* 48.6 (1954), S. 483–492.
- [Fod-2016] Fodor, S.; Vázquez, C.; Freidovich, L.: Interactive On-line Trajectories for Semi-automation: Case Study of a Forwarder Crane. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, Piscataway, NJ, 2016, S. 928–933.
- [Föl-2017] Földes, N.; Philipp, A. M.; Badets, A.; Koch, I.: Exploring Modality Compatibility in the Response-Effect Compatibility Paradigm. In: *Advances in cognitive psychology* 13.1 (2017), S. 97–104.
- [Fon-2001] Fong, T.; Thorpe, C.: Vehicle Teleoperation Interfaces. In: *Autonomous Robots* 11 (2001), S. 9–18.
- [Fot-2020] Fottner, J.; Bengler, K.; Top, F.; Prasch, L.: Entwicklung eines intuitiven Steuerungskonzepts für Lasthebemaschinen: Forschungsbericht. Technische Universität München, München, 2020.
- [Fra-2016] Frank, J. A.; Kapila, V.: Towards Teleoperation-based Interactive Learning of Robot Kinematics using a Mobile Augmented Reality Interface on a Tablet. In: *2016 Indian Control Conference (ICC) (2016)*, S. 385–392.
- [Fri-2003] Frigola, M.; Fernández, J.; Aranda, J.: Visual human machine interface by gestures. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, Piscataway, N.J, 2003, S. 386–391.
- [Fro-2000] Frokjaer, E.; Hertzum, M.; Hornbaek K.: Measuring Usability: Are Effectiveness, Efficiency, and Satisfaction Really Correlated? In: Turner, T. (Hrsg.): *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*. Bd. 2. ACM, New York, NY, 2000, S. 345–352.
- [Gal-2013] Galecki, A.; Burzykowski, T.: *Linear Mixed-Effects Models Using R: A Step-by-Step Approach*. Springer Texts in Statistics. Springer, New York, NY, 2013.

- [Gar-1970] Garner, W.; Felfoldy, G. L.: Integrality of stimulus dimensions in various types of information processing. In: *Cognitive Psychology* 1.3 (1970), S. 225–241.
- [Gol-2013] Gollwitzer, M.; Eid, M.; Schmitt, M.: *Statistik und Forschungsmethoden: Lehrbuch. Mit Online-Materialien. Deutsche Erstausgabe, 3., korrigierte Aufl.* Beltz Verlagsgruppe, Weinheim und Basel, 2013.
- [Goo-2007] Goodrich, M. A.; Schultz, A. C.: Human-Robot Interaction: A Survey. In: *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction* 1.3 (2007), S. 203–275.
- [Goo-2019] Google Inc.: *Material Design*. 2019. Url: <https://material.io> (besucht am 01.04.2020).
- [Gos-2013] Gosselin, C.; Laliberté, T.; Mayer-St-Onge, B.; Foucault, S.; Lecours, A.; Duchaine, V.; Paradis, N.; Menassa, R.: A Friendly Beast of Burden: A Human-Assistive Robot for Handling Large Payloads. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 20.4 (2013), S. 139–147.
- [Göt-2007] Götz, M.: *Die Gestaltung von Bedienelementen unter dem Aspekt ihrer kommunikativen Funktion*. Dissertation. München: Technische Universität München, 2007.
- [Gre-2000] Greca, I. M.; Moreira, M. A.: Mental models, conceptual models, and modelling. In: *International Journal of Science Education* 22.1 (2000), S. 1–11.
- [Gre-2009] Grech, M. R.; Neal, A.; Yeo, G.; Smith, S.; Humphreys, M.: An examination of the relationship between workload and fatigue within and across consecutive days of work: is the relationship static or dynamic? In: *Journal of occupational health psychology* 14.3 (2009), S. 231–242.
- [Gro-2011] Groten, R.: *Haptic Human-Robot Collaboration: How to Learn from Human Dyads*. Dissertation. München: Technische Universität München, 2011.
- [Gro-2018] Gromer, J.: *Entwicklung und Implementierung einer intuitiven Kransteuerung und zugehöriger App für ein touchfähiges Eingabegerät*. Semesterarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Gru-1992] Gruber, R.: *Handsteuersystem für die Bewegungsführung*. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1992.
- [Haa-2018] Haag, S.: *Weiterentwicklung eines MEMS-Messkonzepts zur Bestimmung der rotatorischen Ausrichtung eines Kranbedieners*. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2018.

-
- [Hac-2019] Hachaj, T.: Head Motion – Based Robot’s Controlling System Using Virtual Reality Glasses. In: Choraś, M.; Choraś, R. S. (Hrsg.): Image processing and communications. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019, S. 6–13.
- [Had-2016] Haddadin, S.; Croft, S.: Physical Human–Robot Interaction. In: Siciliano, B.; Khatib, O. (Hrsg.): Springer Handbook of Robotics. Springer International Publishing, Cham, 2016, S. 1835–1874.
- [Hai-2019] Haid, C.: Entwicklung und Evaluation von standortabhängigen und intuitiven Steuerungskonzepten für Ladekrane. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2019.
- [Han-2017] Hancock, P. A.; Szalma, J. L. (Hrsg.): Performance under stress. Ashgate Publishing, Aldershot, 2017.
- [Han-2019] Hancock, P. A.: Stress, Workload, and Fatigue. CRC Press, Boca Raton, FL, 2019.
- [Har-1988] Hart, S. G.; Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Hancock, P. A.; Meshkati, N. (Hrsg.): Human Mental Workload. Bd. 52. Advances in Psychology. Elsevier textbooks, Amsterdam, 1988, S. 139–183.
- [Hay-2012] Hayn, H.: Entwicklung eines haptisch unterstützten Bedienkonzepts für Hydraulikbagger. Dissertation. Siegen: Universität Siegen, 2012.
- [HBC-2017a] HBC-radiomatic GmbH: FSE 727 radiobus. Betriebsanleitung. Crailsheim, 2017.
- [HBC-2017b] HBC-radiomatic GmbH: technos A. Betriebsanleitung. Crailsheim, 2017.
- [HBC-2019a] HBC-radiomatic GmbH: HBC pilot. 2019. Url: <https://www.hbc-radiomatic.com/de/produkte/funksender/pilot.html?kranapp=1> (besucht am 01.04.2020).
- [HBC-2019b] HBC-radiomatic GmbH: HBC-Funksender in der Übersicht. 2019. Url: <https://www.hbc-radiomatic.com/de/produkte/funksender/ueberblick.html> (besucht am 16.09.2019).
- [Hel-2018] Helling, I.: Funktionenanalyse einer Kransteuerung mit Funkbedienung und Erarbeitung eines neuartigen Steuerungskonzeptes. Semesterarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Hen-2016] Henikl, J.: Regelungsstrategien für den Ausleger einer Autobetonpumpe: Zugl.: Dissertation. Wien: TU Wien, 2016. Bd. 30. Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme. Shaker Verlag, Aachen, 2016.

- [Her-2013] Herbst, U.; Rühl, S.; Hermann, A.; Xue, Z.; Bengler, K.: Ergonomic 6D interaction technologies for a flexible and transportable robot system: a Comparison. In: Narayanan, S. (Hrsg.): 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems HMS 2013. Bd. 46. 2013, S. 58–63.
- [Her-2019] Hermann, N.: Interaktionskonzept für ortsabhängige Teleoperation von Robotern. Eine Evaluation in virtueller Realität. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2019.
- [Her-2020] Herrera, K. A.; Rocha, J. A.; Silva, F. M.; Andaluz, V. H.: Training Systems for Control of Mobile Manipulator Robots in Augmented Reality. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). IEEE, Piscataway, NJ, 2020, S. 1–7.
- [Hes-1964] Hess, E. H.; Polt, J. M.: Pupil Size in Relation to Mental Activity during Simple Problem-Solving. In: Science (New York, NY) 143.3611 (1964), S. 1190–1192.
- [HIA-2018] HIAB: CTC - Crane Tip Control. 2018. Url: <https://www.hiab.com/en/company/newsroom/news/hiab-crane-tip-control/> (besucht am 01.04.2020).
- [Hir-2012] Hirche, S.; Buss, M.: Human-Oriented Control for Haptic Teleoperation. In: Proceedings of the IEEE 100.3 (2012), S. 623–647.
- [Hof-2004] Hoffmann, G.; Breazeal, C.: Collaboration in Human-Robot Teams. In: AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference (2004).
- [Hor-2006] Hornbæk, K.: Current practice in measuring usability: Challenges to usability studies and research. In: International Journal of Human-Computer Studies 64.2 (2006), S. 79–102.
- [Int-2020] Intel Corporation: Depth Camera D435: Tech Specs. 2020. Url: <https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2020/06/Intel-Real-Sense-D400-Series-Datasheet-June-2020.pdf> (besucht am 27.02.2021).
- [ISO-7752-1] International Organization for Standardization: Cranes - Control layout and characteristics - Part 1: General Principles. Berlin, 2010.
- [Joh-1983] Johnson-Laird, P. N.: Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness. Bd. 6. Cognitive science series. Harvard Univ. Press, Cambridge, MA, 1983.
- [Joh-2013] John Deere: Intelligente Kransteuerung IBC. 2013. Url: <https://www.deere.de/de/forstmaschinen/ibc/> (besucht am 01.04.2020).

-
- [Kab-2000] Kaber, D.; Onal, E.; Endsley, M.: Design of automation for telerobots and the effect on performance, operator situation awareness, and subjective workload. In: *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing 10.4* (2000), S. 409–430.
- [Kah-1966] Kahneman, D.; Beatty, J.: Pupil diameter and load on memory. In: *Science* (New York, NY) 154.3756 (1966), S. 1583–1585.
- [Kam-2019] Kammerloher, S.: Evaluation eines inertialen Messkonzepts zur Bestimmung der Ausrichtung einer Kran-Funksteuerung. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2019.
- [Kar-2003] Karwowski, W.; Siemionow, W.; Gielo-Perczak, K.: Physical neuroergonomics: The human brain in control of physical work activities. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science 4.1-2* (2003), S. 175–199.
- [Kas-2020] Kassambara, A.: Mixed ANOVA in R. 2020. Url: <https://www-datanovia.com/en/lessons/mixed-anova-in-r/#three-way-bww-b> (besucht am 24.03.2021).
- [Kaz-2004] Kazerooni, H.; Fairbanks, D.; Chen, A.; Shin, G.: The Magic Glove. In: *IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004*. IEEE, Piscataway, NJ, 2004, S. 757–763.
- [Kaz-2008] Kazerooni, H.: A Review of the Exoskeleton and Human Augmentation Technology. In: *Proceedings of DSCC2008 2008 ASME Dynamic Systems and Control Conference* (2008).
- [Kem-2008] Kemp, C. C.; Anderson, C. D.; Nguyen, H.; Trevor, A. J.; Xu, Z.: A point-and-click interface for the real world. In: *Fong, T. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd ACMIEEE international conference on Human robot interaction*. ACM, New York, NY, 2008, S. 241–248.
- [Kie-1984] Kieras, D. E.; Bovair, S.: The Role of a Mental Model in Learning to Operate a Device. In: *Cognitive Science 8* (1984), S. 255–273.
- [Kig-2001] Kiguchi, K.; Kariya, S.; Watanabe, K.; Izumi, K.; Fukuda, T.: An exoskeletal robot for human elbow motion support-sensor fusion, adaptation, and control. In: *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics : a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society 31.3* (2001), S. 353–361.
- [Kim-2006] Kim, K. K.; Kwak, K. C.; Ch, S. Y.: Gesture analysis for human-robot interaction. In: *IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): The 8th International Conference Advanced Communication Technology, 2006, ICACT 2006*. IEEE Technical Activities, Piscataway, NJ, 2006, S. 1824–1827.

- [Kim-2009] Kim, D.; Kim, J.; Lee, K.; Park, C.; Song, J.; Kang, D.: Excavator teleoperation system using a human arm. In: *Automation in Construction* 18.2 (2009), S. 173–182.
- [Kin-2012] King, R. A.: *Analysis of Crane and Lifting Accidents in North America from 2004 to 2010*. Masterarbeit. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2012. Url: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/73792> (besucht am 21.04.2020).
- [Kir-1993] Kirakowski, J.; Corbett, M.: SUMI: the Software Usability Measurement Inventory. In: *British Journal of Educational Technology* 24.3 (1993), S. 210–212.
- [Kiv-2013a] Kivila, A.: *Touchscreen Interfaces for Machine Control and Education*. Master's Thesis. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2013.
- [Kiv-2013b] Kivila, A.; Porter, C.; Singhose, W.: Human operator studies of portable touchscreen crane control interfaces. In: *IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2013. IEEE, Piscataway, NJ, 2013, S. 88–93.
- [Kiv-2014] Kivila, A.; Singhose, W.: The Effect of Operator Orientation in Crane Control. In: *Berg, J. M. (Hrsg.): Proceedings of the ASME 7th Annual Dynamic Systems and Control Conference - 2014*. ASME, New York, NY, 2014, S. 1–7.
- [Kof-2005] Kofman, J.; Wu, X.; Luu, T. J.; Verma, S.: Teleoperation of a robot manipulator using a vision-based human-robot interface. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 52.5 (2005), S. 1206–1219.
- [Koo-2011] Koop, J.; Hesse, W.: *Sicherheit bei Kranen*. 10., vollst. bearb. und erw. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg, 2011.
- [Kor-1990] Kornblum, S.; Hasbroucq, T.; Osman, A.: Dimensional Overlap: Cognitive Basis for Stimulus-Response Compatibility - A Model and Taxonomy. In: *Psychological Review* 97.2 (1990), S. 253–270.
- [Kre-2019] Kret, M. E.; Sjak-Shie, E. E.: Preprocessing pupil size data: Guidelines and code. In: *Behavior research methods* 51.3 (2019), S. 1336–1342.
- [Kro-1997] Kroemer, K. H. E.: *Ergonomic design of material handling systems*. Lewis Publ, Boca Raton, FL, 1997.
- [Kro-2019] Krottenthaler, J.: *Evaluation einer intuitiven Tabletsteuerung für Ladekrane durch eine Probandenstudie*. Semesterarbeit. München: Technische Universität München, 2019.

-
- [Kru-1992] Krus, P.; Palmberg, J.-O.: Vector Control of a Hydraulic Crane. In: SAE International (Hrsg.): SAE Technical Paper Series. SAE Technical Paper Series. SAE International, Warrendale, PA, 1992.
- [Krü-2009] Krüger, J.; Lien, T. K.; Verl, A.: Cooperation of human and machines in assembly lines. In: CIRP-Annals - Manufacturing Technology 58.2 (2009), S. 628–664.
- [Kru-2018] Krupke, D.; Steinicke, F.; Lubos, P.; Jonetzko Y.; Görner, M.; Zhang, J.: Comparison of Multimodal Heading and Pointing Gestures for Co-Located Mixed Reality Human-Robot Interaction. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2018), S. 5003–5009.
- [KUK-2021] KUKA AG: Das KUKA smartPAD: einfach mehr Freiheit. 2021. Url: <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme-/robotersteuerungen/smartpad> (besucht am 07.01.2021).
- [Kun-2001] Kunde, W.: Response-Effect Compatibility in Manual Choice Reaction Tasks. In: Journal of Experimental Psychology 27.2 (2001), S. 387–394.
- [Kun-2003] Kunde, W.: Temporal response-effect compatibility. In: Psychological research 67.3 (2003), S. 153–159.
- [Le-2020] Le, D. T.; Sutjipto, S.; Lai, Y.; Paul, G.: Intuitive Virtual Reality based Control of a Real-world Mobile Manipulator. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). Proceedings. IEEE, 2020, S. 767–772.
- [Lee-2020] Lee, H. J.; Brell-Cokcan, S.; Schmitz, K.: A General Approach for Automating Teleoperated Construction Machines. In: Berns, K.; Görge, D. (Hrsg.): Advances in Service and Industrial Robotics. Bd. 980. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer International Publishing, Cham, 2020, S. 210–219.
- [Leh-2019] Lehnert Regelungstechnik GmbH: LENNIX Pro for Slewing Cranes. 2019. Url: <https://www.antisway-lehnert.com/en/products/slewing-cranes.html> (besucht am 17.09.2019).
- [Lew-1995] Lewis, J. R.: IBM computer usability satisfaction questionnaires: Psychometric evaluation and instructions for use. In: International Journal of Human-Computer Interaction 7.1 (1995), S. 57–78.
- [Lew-2009] Lewis, J. R.; Sauro, J.: The Factor Structure of the System Usability Scale. In: Jacko, J. A. (Hrsg.): HCI International 2009. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.

- [Lew-2017] Lewis, J. R.: Revisiting the Factor Structure of the System Usability Scale. In: *Journal of Usability Studies* 12.4 (2017), S. 183–192.
- [Lew-2018] Lewis, J. R.: The System Usability Scale: Past, Present, and Future. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 34.7 (2018), S. 577–590.
- [Löf-2009] Löfgren, B.: Kinematic Control of Redundant Knuckle Booms with Automatic Path-Following Functions. Dissertation. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2009.
- [Lon-2014] Longo, L.: Formalising Human Mental Workload as a Defeasible Computational Concept. Dissertation. Dublin: Trinity College Dublin, 2014.
- [Lov-1962] Loveless, N. E.: Direction-of-motion stereotypes: a review. In: *Ergonomics* 5.2 (1962), S. 357–383.
- [Maj-2016] Majewski, M.; Kacalak, W.: Building Innovative Speech Interfaces Using Patterns and Antipatterns of Commands for Controlling Loader Cranes. In: *2016 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence. Proceedings.* (2016), S. 525–540.
- [Maj-2017] Majewski, M.; Kacalak, W.: Innovative Intelligent Interaction Systems of Loader Cranes and Their Human Operators. In: Silhavy, R.; Senkerik, R.; Kominkova Oplatkova, Z.; Prokopova, Z.; Silhavy, P. (Hrsg.): *Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems*. Bd. 573. Springer International Publishing, Cham, 2017, S. 474–485.
- [Maj-2018] Majewski, M.; Kacalak, W.; Budniak, Z.; Pajor, M.: Interactive Control Systems for Mobile Cranes. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing* 661 (2018), S. 10–19.
- [Man-2017] Manner, J.; Gelin, O.; Mörk, A.; Englund, M.: Forwarder crane’s boom tip control system and beginner-level operators. In: *Silva Fennica* 51.2 (2017).
- [Man-2019] Manner, J.; Mörk, A.; Englund, M.: Comparing forwarder boom-control systems based on an automatically recorded follow-up dataset. In: *Silva Fennica* 53.2 (2019).
- [Mee-2018] Meeker, C.; Rasmussen, T.; Ciocarlie, M.: Intuitive Hand Teleoperation by Novice Operators Using a Continuous Teleoperation Subspace. New York NY, 2018. Url: <http://arxiv.org/pdf/1802.04349v1> (besucht am 22.04.2020).
- [Meu-2018] Meuer, F.: Infrastrukturaufbau mit Inbetriebnahme eines LKW-Ladekrans und Durchführung einer Studie zur Positionsgenauigkeit. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2018.

-
- [Mia-2015] Miadlicki, K.; Pajor, M.: Overview of user interfaces used in load lifting devices. In: *International Journal of Scientific & Engineering Research* 6.9 (2015), S. 1215–1220.
- [Mic-2019] Microsoft Corporation: Designgrundlagen für UWP-Apps. 2019. [Url: https://docs.microsoft.com/de-de/windows/uwp/design/basics/](https://docs.microsoft.com/de-de/windows/uwp/design/basics/) (besucht am 30.08.2019).
- [Mic-2021] Microsoft Corp.: Hololens-Hardware (1. Generation). 2021. [Url: https://docs.microsoft.com/de-de/hololens/hololens1-hardware](https://docs.microsoft.com/de-de/hololens/hololens1-hardware) (besucht am 05.03.2021).
- [Mil-1995] Milgram, P.; Rastogi, A.; Grodski, J.: Telerobotic Control Using Augmented Reality. In: *4th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication* (1995), S. 21–29.
- [Moh-2006] Mohs, C.; Hurtienne, J.; Israel, J.; Naumann, A.; Kindsmüller, M.; Meyer, H.; Pohlmeyer, A.: IUUI – Intuitive Use of User Interfaces. In: *Usability Professionals 2006* (2006), S. 130–133.
- [Mor-2014] Morales, D. O.; Westerberg, S.; La Hera, P. X.; Mettin, U.; Freidovich, L.; Shiriaev, A. S.: Increasing the Level of Automation in the Forestry Logging Process with Crane Trajectory Planning and Control. In: *Journal of Field Robotics* 31.3 (2014), S. 343–363.
- [Nac-1995] Nachreiner, F.: Standards for ergonomics principles relating to the design of work systems and to mental workload. In: *Applied Ergonomics* 26.4 (1995), S. 249–263.
- [Nau-2007] Naumann A; Hurtienne, J.; Israel, J. H.; Mohs, C.; Kindsmüller, M. C.; Meyer, H. A.; Hußlein, S.: Intuitive Use of User Interfaces: Defining a Vague Concept. In: Harris, D. (Hrsg.): *Engineering psychology and cognitive ergonomics. Lecture notes in computer science, Lecture notes in artificial intelligence*. Springer, Berlin, 2007, S. 128–136.
- [Nau-2010] Naumann, A.; Hurtienne, J.: Benchmarks for Intuitive Interaction with Mobile Devices. In: Sá, M. de (Hrsg.): *Proceedings of the 12th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*. ACM, New York, NY, 2010, S. 401–402.
- [Nav-1979] Navon, D.; Gopher, D.: On the economy of the human-processing system. In: *Psychological Review* 86.3 (1979), S. 214–255.
- [Nei-2001] Neitzel, R. L.; Seixas, N. S.; Ren, K. K.: A review of crane safety in the construction industry. In: *Applied occupational and environmental hygiene* 16.12 (2001), S. 1106–1117.
- [Nem-2004] Nemeth, C. P.: *Human factors methods for design: Making systems human-centered*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2004.

- [Nie-1994a] Nielsen, J.: Enhancing the Explanatory Power of Usability Heuristics. In: Adelson, B. (Hrsg.): Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, New York, NY, 1994, S. 152–158.
- [Nie-1994b] Nielsen, J. (Hrsg.): Usability inspection methods. Wiley, New York, 1994.
- [Nie-2010] Nielsen, J.: Usability engineering. Nachdruck. Kaufmann, Amsterdam, 2010.
- [Nit-2011] Nitsch, V.: Haptic Human-Machine Interaction in Teleoperation Systems and its Implications for the Design and Effective Use of Haptic Interfaces. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, 2011.
- [Nor-1983] Norman, D. A.: Design rules based on analyses of human error. In: Communications of the ACM 26.4 (1983), S. 254–258.
- [Nor-2007] Norman, D. A.: The design of future things. Basic Books, New York, 2007.
- [Nor-2013] Norman, D. A.: The design of everyday things. Revised and expanded ed. Basic Books, New York, 2013.
- [Nyg-1991] Nygren, T. E.: Psychometric Properties of Subjective Workload Measurement Techniques: Implications for Their Use in the Assessment of Perceived Mental Workload. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 33.1 (1991), S. 17–33.
- [Oki-2019] Okishiba, S.; Fukui, R.; Takagi, M.; Azumi, H.; Warisawa, S.; Togashi, R.; Kitaoka, H.; Ooi, T.: Tablet interface for direct vision teleoperation of an excavator for urban construction work. In: Automation in Construction 102 (2019), S. 17–26.
- [Ong-2020] Ong, S. K.; Yew, A. W. W.; Thanigaivel, N. K.; Nee, A. Y. C.: Augmented reality-assisted robot programming system for industrial applications. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 61 (2020), S. 1–7.
- [Ost-2018] Ostanin, M.; Klimchik, A.: Interactive Robot Programming Using Mixed Reality. In: IFAC PapersOnLine 51.22 (2018), S. 50–55.
- [Pal-2019] Palfinger AG: Smart Boom Control. 2019. Url: <https://www.palfinger.com/de-de/ueber-palfinger/digitalisierung> (besucht am 17. 09. 2019).
- [Par-2011] Parasuraman, R.: Neuroergonomics: Brain, Cognition, and Performance at Work. In: Current Directions in Psychological Science 20.3 (2011), S. 181–186.
- [Par-2018] Park, S.; Jung, Y.; Bae, J.: An interactive and intuitive control interface for a tele-operated robot (AVATAR) system. In: Mechatronics 55 (2018), S. 54–62.

-
- [Par-2021] Parrot SA: AR.Drone 2.0: User guide. 2021. Url: https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/ar.drone2_user-guide_uk.pdf (besucht am 13. 01. 2022).
- [Ped-2010] Pedersen, M.; Hansen, M.; Ballebye, M.: Developing a Tool Point Control Scheme for a Hydraulic Crane Using Interactive Real-time Dynamic Simulation. In: Modeling, Identification and Control 31.4 (2010), S. 133–143.
- [Pen-2009a] Peng, K.: Interfaces and Control Systems for Intuitive Crane Control. Master's Thesis. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2009.
- [Pen-2009b] Peng, K.; Singhose, W.: Crane Control Using Machine Vision and Wand Following. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): IEEE International Conference on Mechatronics, 2009. IEEE, Piscataway, NJ, 2009.
- [Pen-2009c] Peng, K.; Singhose, W.; Gessesse, S.; Frakes, D.: Crane Operation Using Hand-Motion and RFID Tags: Radio Frequency Identification. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): IEEE International Conference on Control and Automation, 2009. IEEE, Piscataway, NJ, 2009, S. 1110–1115.
- [Pen-2012a] Peng, K.; Singhose, W.; Frakes, D. H.: Hand-Motion Crane Control Using Radio-Frequency Real-Time Location Systems. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 17.3 (2012), S. 464–471.
- [Pen-2012b] Peng, K. C. C.; Singhose, W.; Bhaumik, P.: Using Machine Vision and Hand-Motion Control to Improve Crane Operator Performance. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans 42.6 (2012), S. 1496–1503.
- [Pen-2013] Peng, K.: Methods for Improving Crane Performance and Ease of Use. Dissertation. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2013.
- [Pet-1995] Peters, M.; Laeng, B.; Latham, K.; Jackson, M.; Zaiyouna, R.; Richardson, C.: A redrawn Vandenberg and Kuse mental rotations test: different versions and factors that affect performance. In: Brain and cognition 28.1 (1995), S. 39–58.
- [Pie-2020] Pietrusewicz, K.; Miadlicki, K.: Gestures can control cranes. 2020. Url: <https://www.controleng.com/articles/gestures-can-control-cranes/> (besucht am 21. 04. 2020).
- [Pil-2013] Pillajo, C.; Sierra, J. E.: Human Machine Interface HMI using Kinect sensor to control a SCARA Robot. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 2013 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM). IEEE, 2013, S. 1–5.

- [Plo-1964] Plowman, E. G.: Lectures on elements of business logistics. Stanford University, Graduate School of Business, Stanford, 1964. Url: <https://logish.egeb.de/wp-content/uploads/PlowmanBuch.pdf>.
- [poc-2014] pocketnavigation.de: Parrot Bebop Drone kommt im Dezember. 2014. Url: <https://www.pocketnavigation.de/2014/11/parrot-bebop-drone-dezember/> (besucht am 12. 01. 2021).
- [Pra-2022] Prasch, L.; Top, F.; Schmidler, J.; Bengler, K.; Fottner, J.: User-Centered Interface Design and Evaluation for Teleoperated Cranes with Boom-Tip Control. In: Harris, D.; Li, W.-C. (Hrsg.): HCI 2022 - Conference Proceedings. Lecture Notes in Artificial Intelligence. SPRINGER NATURE, Cham, 2022.
- [Pre-2019] Preis, S.: Konzeption, Entwicklung und prototypische Umsetzung eines Anti-Kollisions-Systems für einen Ladekran. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2019.
- [Pro-1990] Proctor, R. W. (Hrsg.): Stimulus response compatibility: An integrated perspective. Bd. 65. Advances in Psychology. North Holland, Amsterdam, 1990.
- [Pro-1997] Proctor, R. W.; Wang, H.: Differentiating Types of Set-Level Compatibility. In: Hommel, B.; Prinz, W. (Hrsg.): Theoretical issues in stimulus-response compatibility. Advances in Psychology. Elsevier, Amsterdam und New York, NY, 1997, S. 11–37.
- [Pro-2003] Prorok, K.: Crane-Tip Control of a Hydraulic Crane: A New Approach: Student Paper. Umea, 2003.
- [PTB-2020] PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Die gesetzlichen Einheiten in Deutschland. 2. Auflage. Braunschweig, 2020. Url: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/presse_aktuelles/broschueren/intern_einheitensystem/Die_gesetzlichen_Einheiten.pdf (besucht am 13. 01. 2022).
- [Püt-2020] Pütz, S.: Untersuchung der mentalen Beanspruchung durch menschenzentrierte und maschinenzentrierte Interaktionskonzepte für die Teleoperation von Kranen. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2020.
- [Ras-1983a] Rasmussen, J.: Mental Models and the Control of Action in Complex Environments. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 13.3 (1983), S. 257–266.
- [Ras-1983b] Rasmussen, J.: Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 13.3 (1983), S. 257–266.

-
- [Rav-2017] Raviv, G.; Fishbain, B.; Shapira, A.: Analyzing risk factors in crane-related near-miss and accident reports. In: *Safety Science* 91 (2017), S. 192–205.
- [Rod-2019] Rodríguez-Sedano, F. J.; Conde, M. A.; Ponsa, P.; Muñoz, L. M.; Fernández-Llamas, C.: Design and evaluation of a graphical user interface for facilitating expert knowledge transfer: a teleoperation case study. In: *Universal Access in the Information Society* 18.3 (2019), S. 431–442.
- [Rog-2002] Rogalla, O.; Ehrenmann, M.; Zöllner, R.; Becher, R.; Dillmann, R.: Using Gesture and Speech Control for Commanding a Robot Assistant. In: *11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. Proceedings* (2002), S. 454–459.
- [Rog-2005] Rogers, W. A.; Fisk, A. D.; McLaughlin, A. C.; Pak, R.: Touch a Screen or Turn a Knob: Choosing the Best Device for the Job. In: *Human Factors* 47.2 (2005), S. 271–288.
- [Ros-2019] Rosen, E.; Whitney, D.; Phillips, E.; Chien, G.; Tompkin, J.; Konidaris, G.; Tellex, S.: Communicating and controlling robot arm motion intent through mixed-reality head-mounted displays. In: *The International Journal of Robotics Research* 38.12-13 (2019), S. 1513–1526.
- [Rüh-1981] Rühmann, P.; Bubb, H.: Belastung und Ermüdung. In F. Stoll (Hrsg): *Die Psychologie des 20. Jahrhunderts: Band XIII - Anwendungen im Berufsleben*. Kindler, Zürich, 1981.
- [Rus-2018] Rusnock, C. F.; Borghetti, B. J.: Workload profiles: A continuous measure of mental workload. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 63 (2018), S. 49–64.
- [Sac-1994] Sachs, S.; Teichert, H.-J.; Rentzsch, M.: *Ergonomische Gestaltung mobiler Maschinen: Handbuch für Konstrukteure, Planer, Ergonomen, Designer und Sicherheitsfachkräfte*. 1. Aufl. ecomed, Landsberg/Lech, 1994.
- [Sal-2006] Salter, T.; Dautenhahn, K.; Boekhorst, R. t.: Learning about natural human–robot interaction styles. In: *Robotics and Autonomous Systems* 54.2 (2006), S. 127–134.
- [Sch-1993] Schmidtke, H.; Bernotat, R. (Hrsg.): *Ergonomie*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Hanser, München, 1993.
- [Sch-2009] Schwalm, M.: *Pupillometrie als Methode zur Erfassung mentaler Beanspruchungen im automotiven Kontext*. Dissertation. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, 2009.
- [Sch-2013] Schmidtke, H.; Jastrzebska-Fraczek, I.; Fraczek, I. J.: *Ergonomie: Daten zur Systemgestaltung und Begriffsbestimmungen*. Hanser, München, 2013.

- [Sch-2018] Schmidtler, J.: Optimizing Haptic Human-Robot Collaboration Considering Human Perception and Idiosyncrasies. Dissertation. München: Technische Universität München, 2018.
- [Sch-2019] Schubert, P.; Stemmler, S.; Abel, D.: Development of a Human Machine Interface for Crane-based Load Handling using a Lightweight Robot. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): The 27th Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE, Piscataway, NJ, 2019, S. 292–298.
- [Sch-2020] Schock-Schmidtke, A.: Entwicklung intelligenter Assistenzsysteme zur Unterstützung der Kransteuerung mit Hilfe von Computer Vision und Machine Learning. Semesterarbeit. München: Technische Universität München, 2020.
- [Sci-2000] Sciavicco, L.; Grizzle, M. J.; Johnson, M. A.: Modelling and Control of Robot Manipulators. N. Springer, London, 2000.
- [Sei-2009] Seidl, A.: SizeGermany – The New German Anthropometric Survey: Conceptual Design, Implementation and Results. In: Proceedings of 17th World Congress on Ergonomics (2009).
- [Sen-2000] Sen, R. N.; Das, S.: An ergonomics study on compatibility of controls of overhead cranes in a heavy engineering factory in West Bengal. In: Applied Ergonomics 31 (2000), S. 179–184.
- [Sha-2007] Shapira, A.; Lucko, G.; Schexnayder, C.: Cranes for Building Construction Projects. In: Journal of Construction Engineering and Management 133.9 (2007), S. 690–700.
- [Sha-2011] Shapiro, L. K.; Shapiro, J. P.: Cranes and Derricks. 4. Auflage. McGraw-Hill, New York, NY, 2011.
- [Sha-2015] Sharples, S.; Megaw, T.: The Definition and Measurement of Human Workload. In: Wilson, J. R.; Sharples, S. (Hrsg.): Evaluation of Human Work. CRC Press, Boca Raton, FL, 2015, S. 515–548.
- [She-1989] Sheridan, T. B.: Telerobotics. In: Automatica 25.4 (1989), S. 487–507.
- [She-1995] Sheridan, T. B.: Teleoperation, Telerobotics and Telepresence: A Progress Report. In: Control Engineering Practice 3.2 (1995), S. 205–214.
- [Shi-2010] Shin, Y. K.; Proctor, R. W.; Capaldi, E. J.: A review of contemporary ideomotor theory. In: Psychological bulletin 136.6 (2010), S. 943–974.
- [Sic-1990] Siciliano, B.: Kinematic Control of Redundant Robot Manipulators: A Tutorial. In: Journal of Intelligent and Robotic Systems 3.3 (1990), S. 201–212.

-
- [Sic-2016] Siciliano, B.; Khatib, O. (Hrsg.): Springer Handbook of Robotics. 2nd Edition. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [Smi-1998] Smidt, W.: Verallgemeinerte inverse Kinematik für Anwendungen in der Robotersimulation und der virtuellen Realität. Diplomarbeit. Dortmund: Universität Dortmund, 1998.
- [Sol-2020] Solanes, J. E.; Muñoz, A.; Gracia, L.; Martí, A.; Girbés-Juan, V.; Tornero, J.: Teleoperation of industrial robot manipulators based on augmented reality. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 111.3-4 (2020), S. 1077–1097.
- [Son-2007] Song, T. H.; Park, J. H.; Chung, S. M.; Hong, S. H.; Kwon, K. H.; Lee, S.; Jeon, J. W.: A Study on Usability of Human-Robot Interaction Using a Mobile Computer and a Human Interface Device. In: Cheek, A. D. (Hrsg.): Proceedings of the 9th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services. ACM, New York, NY, 2007, S. 462–466.
- [Sor-2007] Sorensen, K.; Spiers, J.; Singhose, W.: Operational Effects of Crane Interface Devices. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007. IEEE Operations Center, Piscataway, NJ, 2007, S. 1073–1078.
- [Sor-2008] Sorensen, K.: Operational Performance Enhancement of Human Operated Flexible Systems. Dissertation. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2008.
- [Spa-1993] Spanner, B.: Einfluß der Kompatibilität von Stellteilen auf die menschliche Zuverlässigkeit: Zugl.: Dissertation. München: Technische Universität München, 1993. Bd. 89. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 17, Biotechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [Spa-2015] Spasojević Brkić, V. K.; Klarin, M. M.; Brkić, A.: Ergonomic design of crane cabin interior: The path to improved safety. In: Safety Science 73 (2015), S. 43–51.
- [Ste-2006] Steinfeld, A.; Fong, T.; Kaber, D.; Lewis, M.; Scholtz, J.; Schultz, A.; Goodrich, M. A.: Common Metrics for Human-Robot Interaction. In: Proceedings of the 2006 ACM Conference on Human-Robot Interaction (2006), S. 33–40.
- [Sti-2004] Stiefelhagen, R.; Fügen, C.; Gieselmann, P.; Holzapfel, H.; Nickel, K.; Waibel, A.: Natural human-robot interaction using speech, head pose and gestures. In: Intelligent Robots and Systems, 2004 (IROS 2004). Proceedings. (2004), S. 2422–2427.

- [Su-2015] Su, X.; Pan, J.; Grinter, M.: Improving Construction Equipment Operation Safety from a Human-centered Perspective. In: *Procedia Engineering* 118 (2015), S. 290–295.
- [Sut-2007] Suter, J.; Kim, D.; Singhose, W.; Sorensen, K.; Glauser, U.: Evaluation and integration of a wireless touchscreen into a bridge crane control system. In: *IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2007*. IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 2007, S. 1–6.
- [Tan-2018] Tang, G.; Webb, P.: The Design and Evaluation of an Ergonomic Contactless Gesture Control System for Industrial Robots. In: *Journal of Robotics* 2018 (2018), S. 1–10.
- [Tec-2019a] Technion Oy: The xCrane available now with parallel boom control and tip control. 2019. Url: <https://technion.fi/the-xcrane-available-now-with-parallel-boom-control-and-tip-control/> (besucht am 17. 09. 2019).
- [Tec-2019b] Technische Universität München: Den Kran per Touchscreen steuern: Forscher und Forscherinnen entwickeln intuitive Steuerungskonzepte für Krane. München, 2019. Url: <https://www.tum.de/nc/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/details/35705/> (besucht am 17. 10. 2019).
- [Tet-2018] Tetzner, T.: System zur Bestimmung der rotatorischen Ausrichtung eines Kranbedieners. Diplomarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Tom-2018] Tomakov, I.; Tomakov, V.; Pahomova, G.; Semicheva, E.; Bredihina, V.: A study on the causes and consequences of accidents with cranes for lifting and moving loads in industrial plants and construction sites of the Russian Federation. In: *Journal of Applied Engineering Science* 16.1 (2018), S. 95–98.
- [Ton-2018] Tonel Lima, A.; Santos Rocha, F. A.; Torre, M. P.; Azpurua, H.; Medeiros Freitas, G.: Teleoperation of an ABB IRB 120 Robotic Manipulator and BarrettHand BH8-282 Using a Geomagic Touch X Haptic Device and ROS. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): 15th Latin American Robotics Symposium/6th Brazilian Robotics Symposium/9th Workshop on Robotics in Education*. IEEE, Piscataway, NJ, 2018, S. 188–193.
- [Top-2017] Top, F.: Expertengespräch (16.11.2017). Garching, 2017.
- [Top-2017b] Top, F.; Prash, L.: Workshop: Anforderungen an die intuitive Laststeuerung (12.09.2017): Teilnehmer: Fünf Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses. Garching, 2017.

-
- [Top-2018a] Top, F.: Expertengespräch (20.03.2018). Garching, 2018.
- [Top-2018b] Top, F.; Antes J.: Intuitives, zielorientiertes Steuerungskonzept für eine einfache Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Lasthandling: Vortrag. Würzburg, 2018.
- [Top-2018c] Top, F.; Prasch, L.; Schmidtler, J.; Fottner, J.: Intuitive Steuerung von teleoperierten Kranen in Bau und Industrie. In: Will, F. (Hrsg.): Tagungsband zur 7. Fachtagung Baumaschinentechnik: Digitalisierung - Automatisierung - Mensch, 20.-21. September 2018, Dresden. Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e. V. Dresden, 2018, S. 209–224.
- [Top-2019a] Top, F.; Kessler, S.: Vom Kran zum Roboter: Paradigmenwechsel in der Kransteuerung. In: VDBUM Service GmbH (Hrsg.): Tagungsband: 48. Großseminar des Verbands der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik (VDBUM) e. V., 19.-22.02.2019, Willingen (Upland). Stühr, 2019, S. 60–63.
- [Top-2019b] Top, F.; Wagner, M.; Fottner, J.: How to Increase Crane Control Usability: An Intuitive HMI for Remotely Operated Cranes in Industry and Construction. In: Karwowski, W.; Ahram, T. (Hrsg.): Intelligent Human Systems Integration 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer International Publishing, Cham, 2019, S. 293–299.
- [Top-2020a] Top, F.: Kranfahren mit dem Zeigefinger: Tablet-App mit Live-Bild zur Auslegerspitzensteuerung. In: VDBUM Service GmbH (Hrsg.): Tagungsband: 49. Großseminar des Verbands der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik (VDBUM) e. V., 11.-14.02.2020, Willingen (Upland). Stühr, 2020, S. 57–59.
- [Top-2020b] Top, F.; Krottenthaler, J.; Fottner, J.: Evaluation of Remote Crane Operation with an Intuitive Tablet Interface and Boom Tip Control. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). Conference Proceedings. IEEE, Piscataway, NJ, 2020, S. 3275–3282.
- [Top-2021a] Top, F.; Pütz, S.; Fottner, J.: Human-Centered HMI for Crane Teleoperation: Empirical Study on the Operators' Mental Workload. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): IEEE International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering. Proceedings. IEEE, Piscataway, NJ, 2021.

- [Top-2021b] Top, F.; Pütz, S.; Fottner, J.: Human-Centered HMI for Crane Teleoperation: Intuitive Concepts Based on Mental Models, Compatibility and Mental Workload. In: Harris, D.; Li, W.-C. (Hrsg.): Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer International Publishing und SPRINGER NATURE, Basel, 2021, S. 438–456.
- [Tu-2020] Tu, X.: A Mixed Reality Interface for Digital Twin Based Crane. Master's Thesis. Aalto: Aalto University, 2020.
- [U.S-2019] U.S. Bureau of Labor Statistics: Census of Fatal Occupational Injuries (CFOI) - Current and Revised Data. 2019. Url: <https://www.bls.gov/iif/oshcfoi1.htm> (besucht am 23. 04. 2020).
- [Ull-2014] Ullrich, D.: Intuitive Interaktion: Eine Exploration von Komponenten, Einflussfaktoren und Gestaltungsansätzen aus der Perspektive des Nutzererlebens. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [Umi-1990] Umiltá, C.; Nicoletti, R.: Spatial Stimulus-Response Compatibility. In: Proctor, R. W. (Hrsg.): Stimulus response compatibility. Bd. 65. Advances in Psychology. North Holland, Amsterdam, 1990, S. 89–116.
- [Van-1996] Vandenbosch, B.; Higgins, C.: Information Acquisition and Mental Models: An Investigation into the Relationship Between Behaviour and Learning. In: Information Systems Research 7.2 (1996), S. 198–214.
- [VDI-2185-1] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik. Berlin, 2007.
- [VDI-2185-2] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik - Koexistenzmanagement von Funklösungen. Berlin, 2009.
- [VDI-3850-1] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Gebrauchstaugliche Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen - Konzepte, Prinzipien und grundsätzliche Empfehlungen. Berlin, 2014.
- [VDI-3850-2] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Gebrauchstaugliche Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen - Interaktionsgeräte für Bildschirme. Berlin, 2017.
- [VDI-4412] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Kabellose Steuerung von Kranen. Berlin, 2016.
- [Vem-2019] Vemcon GmbH: IMU Sensor. Haar, 2019. Url: https://www.vemcon.de/wp-content/uploads/2019/09/01_V-Techn.Datenblatt-IMU-2019-08.pdf (besucht am 22. 10. 2019).

-
- [Vu-2017] Vu, D.-S.; Allard, U. C.; Gosselin, C.; Routhier, F.; Gosselin, B.; Campeau-Lecours, A.: Intuitive adaptive orientation control of assistive robots for people living with upper limb disabilities. In: Amirabdollahian, F.; Burdet, E.; Masia, L. (Hrsg.): 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). IEEE, Piscataway, NJ, 2017, S. 795–800.
- [Wag-2018] Wagner, M.: Inverse Kinematics and Control Strategies for an Intuitive Crane Control System. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Wal-2000] Waldherr, S.; Romero, R.; Thrun, S.: A Gesture Based Interface for Human-Robot Interaction. In: Autonomous Robots 9 (2000), S. 151–173.
- [Wan-2020] Wandelbots GmbH: TracePen. 2020. Url: <https://wandelbots.com/tracepen/> (besucht am 07.01.2021).
- [War-2017] Warm, J. S.; Matthews, G.; Finomore, V. S.: Vigilance, Workload and Stress. In: Hancock, P. A.; Szalma, J. L. (Hrsg.): Performance under stress. Ashgate Publishing, Aldershot, 2017, S. 115–141.
- [Wel-1978] Welford, A. T.: Mental work-load as a function of demand, capacity, strategy and skill. In: Ergonomics 21.3 (1978), S. 151–167.
- [Wes-2014] Westerberg, S.: Semi-Automating Forestry Machines: Motion Planning, System Integration and Human-Machine Interaction. Dissertation. Umea: Umea University, 2014.
- [Wic-1983] Wickens, C. D.; Sandry, D. L.; Vidulich, M.: Compatibility and Resource Competition between Modalities of Input, Central Processing, and Output. In: Human Factors 25.2 (1983), S. 227–248.
- [Wic-2000] Wickens, C. D.; Hollands, J. G.: Engineering psychology and human performance. 3. ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2000.
- [Wic-2008] Wickens, C. D.: Multiple resources and mental workload. In: Human Factors 50.3 (2008), S. 449–455.
- [Win-2013] Winter, B.: Linear models and linear mixed effects models in R with linguistic applications. In: ArXiv abs/1308.5499 (2013). Url: <https://arxiv.org/abs/1308.5499>.
- [Win-2018] Winn, M. B.; Wendt, D.; Koelewijn, T.; Kuchinsky, S. E.: Best Practices and Advice for Using Pupillometry to Measure Listening Effort: An Introduction for Those Who Want to Get Started. In: Trends in hearing 22 (2018), S. 1–32.
- [Wol-2017] Wollschläger, A.: Gestaltung eines Augmented Reality Interaktionskonzepts für die intuitive Roboterprogrammierung. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2017.

- [Wöl-2018] Wöllhaf, M.: Modellierung und simulative Untersuchung einer intuitiven Kransteuerung mit MATLAB/Simscap am Beispiel eines hydraulischen Ladekrans. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Wor-1989] Worringham, C. J.; Beringer, D. B.: Operator orientation and compatibility in visual-motor task performance. In: *Ergonomics* 32.4 (1989), S. 387–399.
- [Wor-1998] Worringham, C. J.; Beringer, D. B.: Directional stimulus-response compatibility: a test of three alternative principles. In: *Ergonomics* 41.6 (1998), S. 864–880.
- [Wu-2020] Wu, L.; Alqasemi, R.; Dubey, R.: Development of Smartphone-Based Human-Robot Interfaces for Individuals With Disabilities. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 5.4 (2020), S. 5835–5841.
- [Xse-2018] Xsens Technologies B.V.: MTi 1-series Data Sheet: IMU, VRU, AHRS and GNSS/INS module. Enschede, 2018.
- [Xu-2018] Xu, Z.: Untersuchung des mentalen Modells des Menschen bei dynamischer Steuerung von Kransystemen. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Yoo-2010] Yoon, J.; Manurung, A.: Development of an intuitive user interface for a hydraulic backhoe. In: *Automation in Construction* 19.6 (2010), S. 779–790.
- [You-2002] Young, M.: Attention, automaticity, and automation: New perspectives on mental underload and performance. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 3.2 (2002).
- [You-2014] Young, R. M.: Surrogates and Mappings: Two Kinds of Conceptual Models for Interactive Devices. In: Gentner, D.; Stevens, A. L. (Hrsg.): *Mental models. Cognitive science*. Psychology Press, New York und London, 2014.
- [You-2015] Young, M. S.; Brookhuis, K. A.; Wickens, C. D.; Hancock, P. A.: State of science: mental workload in ergonomics. In: *Ergonomics* 58.1 (2015), S. 1–17.
- [Yu-2019] Yu, J.; Paik, W.: Efficiency and Learnability Comparison of the Gesture-based and the Mouse-based Telerobotic Systems. In: *Studies in Informatics and Control* 28.2 (2019).
- [Zha-2011] Zhang, W.; Xu, P.: Do I have to learn something new? Mental models and the acceptance of replacement technologies. In: *Behaviour & Information Technology* 30.2 (2011), S. 201–211.

-
- [Zim-1995] Zimmermann, S.; Zimmermann, B.: Kranführer-Ausbildung: Mit Tabellen. Bd. 1. Kranführer-Lehrsystem. Resch, Gräfelfing, 1995.
- [Zöl-2021] Zöls, K.: Entwicklung und prototypische Umsetzung einer innovativen Kransteuerung durch eine Hololens-AR-Brille. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2021.

Verzeichnis studentischer Arbeiten

System zur Bestimmung der rotatorischen Ausrichtung eines Kranbedieners

Diplomarbeit von Tobias Tetzner [Tet-2018]

Analyse und Bewertung verschiedener Ansätze zur Lastpendeldämpfung an Kranen

Bachelorarbeit von Andreas Baumgartner [Bau-2018]

Untersuchung des mentalen Modells des Menschen bei dynamischer Steuerung von Kransystemen

Bachelorarbeit von Zhencan Xu [Xu-2018]

Inverse Kinematics and Control Strategies for an Intuitive Crane Control System

Masterarbeit von Michael Wagner [Wag-2018]

Modellierung und simulative Untersuchung einer intuitiven Kransteuerung mit MATLAB/Simscape am Beispiel eines hydraulischen Ladekrans

Masterarbeit von Michael Wöllhaf [Wöl-2018]

Funktionenanalyse einer Kransteuerung mit Funkbedienung und Erarbeitung eines neuartigen Steuerungskonzeptes

Semesterarbeit von Isabel Helling [Hel-2018]

Infrastrukturaufbau mit Inbetriebnahme eines LKW-Ladekrans und Durchführung einer Studie zur Positionsgenauigkeit

Masterarbeit von Felix Meuer [Meu-2018]

Weiterentwicklung eines MEMS-Messkonzeptes zur Bestimmung der rotatorischen Ausrichtung eines Kranbedieners

Bachelorarbeit von Sven Haag [Haa-2018]

Entwicklung und Implementierung einer intuitiven Kransteuerung und zugehöriger App für ein touchfähiges Eingabegerät

Semesterarbeit von Jakob Gromer [Gro-2018]

Interaktionskonzept für ortsabhängige Teleoperation von Robotern. Eine Evaluation in virtueller Realität

Bachelorarbeit von Nico Hermann [Her-2019]

Konzeption, Entwicklung und prototypische Umsetzung eines Anti-Kollisions-Systems für einen Ladekran

Masterarbeit von Sebastian Preis [Pre-2019]

Entwicklung und Evaluation von standortabhängigen und intuitiven Steuerungskonzepten für Ladekrane

Masterarbeit von Constanze Haid [Hai-2019]

Evaluation einer intuitiven Tabletsteuerung für Ladekrane durch eine Probandenstudie

Semesterarbeit von Julia Krottenthaler [Kro-2019]

Evaluation eines inertialen Messkonzepts zur Bestimmung der Ausrichtung einer Kran-Funksteuerung

Masterarbeit von Sabine Kammerloher [Kam-2019]

Untersuchung der mentalen Beanspruchung durch menschenzentrierte und maschinenzentrierte Interaktionskonzepte für die Teleoperation von Kranen

Masterarbeit von Sebastian Pütz [Püt-2020]

Entwicklung intelligenter Assistenzsysteme zur Unterstützung der Kransteuerung mit Hilfe von Computer Vision und Machine Learning

Semesterarbeit von Alexander Schock-Schmidtke [Sch-2020]

Entwicklung und prototypische Umsetzung einer innovativen Kransteuerung durch eine HoloLens-AR-Brille

Bachelorarbeit von Korbinian Zöls [Zöl-2021]

Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte

Folgende studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte haben, zum Teil über Studienarbeiten hinausgehend, zusätzlich am Projekt mitgearbeitet:

- Jakob Gromer
- Sabine Kammerloher
- Julia Krottenthaler
- Simon Otte
- Alexander Schock-Schmidtke
- Tobias Tetzner
- Korbinian Zöls

An dieser Stelle dankt der Autor allen Studierenden, die im Rahmen der Forschungstätigkeiten Studienarbeiten oder hilfswissenschaftliche Tätigkeiten ausgeführt haben, herzlich für ihre Arbeit und ihren Einsatz.

Verzeichnis der Veröffentlichungen

Poster: Intuitive Laststeuerung

Posterpräsentation im Rahmen des 47. Großseminars des Verbands der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik (VDBUM) e. V., 20.-23.02.2018, Willingen (Upland)

Intuitives, zielorientiertes Steuerungskonzept für eine einfache Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Lasthandling

Vortrag von Felix Top, Jochen Antes

Industrial Usability Day 2018, 12.09.2018, Würzburg [Top-2018b]

Intuitive Steuerung von teleoperierten Kranen in Bau und Industrie

Paper mit Tagungsbeitrag von Felix Top, Lorenz Prasch, Jonas Schmidler, Johannes Fottner

Tagungsband zur 7. Fachtagung Baumaschinentechnik: Digitalisierung - Automatisierung - Mensch, 20.-21.09.2018, Dresden [Top-2018a]

How to Increase Crane Control Usability: An Intuitive HMI for Remotely Operated Cranes in Industry and Construction

Paper mit Tagungsbeitrag von Felix Top, Michael Wagner, Johannes Fottner

Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2019): Integrating People and Intelligent Systems, February 7-10, 2019, San Diego, California, USA [Top-2019a]

Vom Kran zum Roboter: Paradigmenwechsel in der Kransteuerung

Paper mit Tagungsbeitrag von Felix Top, Stephan Kessler

Tagungsband: 48. Großseminar des Verbands der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik (VDBUM) e. V., 19.-22.02.2019, Willingen (Upland) [Top-2019b]

Präsentation auf der Bauma 2019

Präsentation eines VR-Demonstrators der intuitiven Laststeuerung am Messestand des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Bauma 2019, 08.-14.04.19, München

Pressemitteilung der Technischen Universität München

Den Kran per Touchscreen steuern. Forscher und Forscherinnen entwickeln intuitive Steuerungskonzepte für Krane. Veröffentlicht am 23.09.2019 [Tec-2019b]

Entwicklung eines intuitiven Steuerungskonzepts für Lasthebemaschinen

Forschungsbericht von Felix Top, Lorenz Prasch

Herausgeber: Johannes Fottner, Klaus Bengler

Forschungsbericht zum IGF-Vorhaben 19573 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL): *Entwicklung eines intuitiven Steuerungskonzeptes für Lasthebemaschinen* der Forschungsstellen Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München und Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München. [Fot-2020]

Kranfahren mit dem Zeigefinger: Tablet-App mit Live-Bild zur Auslegerspitzensteuerung

Paper mit Tagungsbeitrag von Felix Top

Tagungsband: 49. Großseminar des Verbands der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik (VDBUM) e. V., 11.-14.02.2020, Willingen (Upland) [Top-2020a]

Evaluation of Remote Crane Operation with an Intuitive Tablet Interface and Boom Tip Control

Paper mit Tagungsbeitrag von Felix Top, Julia Krottenthaler, Johannes Fottner

IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). Conference Proceedings. October 11-14, 2020, Toronto, Canada [Top-2020b]

Human-Centered HMI for Crane Teleoperation: Intuitive Concepts Based on Mental Models, Compatibility and Mental Workload

Paper mit Tagungsbeitrag von Felix Top, Sebastian Pütz, Johannes Fottner

Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction – HCI International 2021. July 24-29, 2021, Washington D. C., USA [Top-2021b]

Human-Centered HMI for Crane Teleoperation: Empirical Study on the Operators' Mental Workload

Paper mit Tagungsbeitrag von Felix Top, Sebastian Pütz, Johannes Fottner

Proceedings of the IEEE International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering. October 7-8, 2021, Mauritius [Top-2021a]

User-Centered Interface Design and Evaluation for Teleoperated Cranes with Boom-Tip Control

Paper mit Tagungsbeitrag von von Lorenz Prasch, Felix Top, Jonas Schmidler, Klaus Bengler, Johannes Fottner

Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction – HCI International 2022. June 26 - July 1, 2022, Göteborg, Schweden [Pra-2022]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Schematische Darstellung üblicher Steuerungskonzepte (gepunktete Pfeile: mögliche Bewegungsrichtungen). Die Zuordnung der Bewegungsrichtung der Stellteile zu den DOFs des Krans erfolgt über standardisierte Symbole	2
Abbildung 1-2	Iterativer Prozess zur nutzerzentrierten Gestaltung gebrauchstauglicher Systeme, adaptiert aus [DIN-9241-210]	7
Abbildung 2-1	Der Mensch als Teil des Regelkreises im Belastungs- und Beanspruchungskonzept nach [Rüh-1981]	9
Abbildung 2-2	Zusammenhang der Prinzipien zur Gestaltung von Benutzungsschnittstellen mit der Gebrauchstauglichkeit, adaptiert aus [VDI-3850-1]. Pfeile signalisieren einen Einfluss eines Gestaltungsprinzips (Startpunkt des Pfeils) auf ein anderes (Zielpunkt)	12
Abbildung 2-3	Modelle zum Vergleich verschiedener Interaktionsebenen.	14
Abbildung 2-4	Dual Process Model für SR-Kompatibilitätsaufgaben mit dimensionaler Überlappung zwischen Stimulus und Response (durchgezogene Linien) und ohne dimensionale Überlappung zwischen Stimulus und Response (gestrichelte Linien). Der obere Ast zeigt den automatischen (unbewussten) und der untere Ast den bewussten Verarbeitungsweg. Adaptiert aus [Kor-1990, S. 257]	20
Abbildung 2-5	Zusammenhang zwischen den der Primäraufgabe zugewiesenen Ressourcen (linke y-Achse) und den von der Primäraufgabe geforderten Ressourcen (x-Achse), sowie zwischen der erreichten Leistung (rechte y-Achse) und den von der Primäraufgabe geforderten Ressourcen. Zitiert aus [Sha-2015, S. 521], farbliche Hervorhebungen durch den Autor	22
Abbildung 3-1	Schritte und potenzielle Stellgrößen bei der Mensch-Maschine-Interaktion mit dem Ziel, eine Arbeitsaufgabe zu erfüllen (eigene Darstellung)	33
Abbildung 3-2	Interaktionselemente aus [VDI-3850-2] zur Eingabe des Bedienerwunschs (gelb umrahmte Elemente: Ergänzung durch den Autor)	34
Abbildung 3-3	Bauformen unterschiedlicher Kransteuerungen: Linearhebel (links), Joysticks mit zwei Funktionen (mitte), Drucktaster (rechts), zitiert aus [HBC-2019a]	37
Abbildung 3-4	HBC-pilot zur Einhand-Steuerung von Kranen und Maschinen, zitiert aus [HBC-2019a]	38

Abbildung 3-5	Blockschema einer Funksteuerung, adaptiert aus [VDI-4412] (farbliche Hervorhebungen durch den Autor)	39
Abbildung 5-1	Methodischer Rahmen für die systematische Ableitung von nutzerzentrierten Kran-HMIs: Gestaltungsrichtlinien und bekannte Effekte (<i>oben</i>) und Schlussfolgerungen zur Intuitivität bzw. den ergonomischen Messgrößen (<i>unten</i>)	66
Abbildung 5-2	Abstrahierter Steuerungsablauf für eine lastorientierte Steuerung	69
Abbildung 5-3	Richtungsorientiertes Steuerungskonzept (Draufsicht, schematisch)	71
Abbildung 5-4	Konzept zur richtungsorientierten Laststeuerung, dargestellt am Beispiel eines Ladekrans	72
Abbildung 5-5	Konzept zur zielorientierten Laststeuerung, dargestellt am Beispiel eines Ladekrans	74
Abbildung 6-1	Versuchsaufbau für die Laborstudie	80
Abbildung 6-2	Zuordnung der Eingabeelemente an den Oculus-Controllern zu den Bewegungen des Krans in der VR-Simulation für die drei untersuchten HMIs. Grafiken übernommen aus [Püt-2020]	83
Abbildung 6-3	Boxplots (Mittelwerte über alle Versuche je Proband mit dem gleichen HMI) und Histogramm (Absolutwerte) zur deskriptiven Auswertung der empirischen Laborstudie (Teil 1). (i) zeigt die Unterschiede zwischen den drei untersuchten HMIs, und (ii) die Abweichungen der nutzerzentrierten HMIs relativ zum Mittelwert des maschinenzentrierten HMI (Ausnahme: Kollisionen)	91
Abbildung 6-4	Boxplots (Mittelwerte über alle Versuche je Proband mit dem gleichen HMI) zur deskriptiven Auswertung der empirischen Laborstudie (Teil 2). (i) zeigt die Unterschiede zwischen den drei untersuchten HMIs, und (ii) die Abweichungen der nutzerzentrierten HMIs relativ zum Mittelwert des maschinenzentrierten HMI (Ausnahme: Bedienerpositionsgruppen). Unterabbildung (e) zeigt den Verlauf der Zeit zur Aufgabenerfüllung über die 10 Versuche je HMI (Verlaufseffekt)	92
Abbildung 7-1	Nutzungskontext: Ladekran	113
Abbildung 7-2	Geometrische Zusammenhänge für die Bestimmung der Hakenposition (Skizze): Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts)	115
Abbildung 7-3	Regelungskonzept für die Hakenbewegung	121
Abbildung 7-4	Positionsregelung der Gelenke: Vergleich des Sollwerts der Zylinderposition mit dem Istwert	122
Abbildung 7-5	Absolute Fehler der Zylinderlängen je Gelenk	123
Abbildung 7-6	Absoluter Fehler in der Hakenposition	124
Abbildung 8-1	Installationen zur Lichtpunktdetektion	130
Abbildung 8-2	Funksender für die zielorientierte Lichtpunkt-Steuerung	131

Abbildung 8-3	Hololens-HMI zur Zielvorgabe, in beiden Fällen mit gleichzeitig durch die Clicker-Geste ausgelöster manueller Vertikalbewegung (roter Pfeil)	134
Abbildung 9-1	Funksteuerung: Eingabegerät für die richtungsorientierte Joystick-Steuerung	144
Abbildung 9-2	MEMS-Sensorbaustein MTi-3 AHRS der Firma Xsens Technologies	146
Abbildung 9-3	Box zur Referenzierung der Funksteuerung im Bezug auf das Krankoordinatensystem	147
Abbildung 9-4	Kamera für Live-Draufsicht auf die Hakenumgebung	148
Abbildung 9-5	Tablet-GUI zur richtungsorientierten Laststeuerung	149
Abbildung 10-1	Versuchsaufbau	155
Abbildung 10-2	Boxplots mit der Verteilung der HMI-spezifischen Werte für alle Probanden zur deskriptiven Auswertung der realen Bedienerstudie (Teil 1)	162
Abbildung 10-3	Boxplots mit der Verteilung der HMI-spezifischen Werte für alle Probanden zur deskriptiven Auswertung der realen Bedienerstudie (Teil 2)	163
Abbildung C-1	Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt.	B-3
Abbildung C-2	Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.	B-4
Abbildung C-3	Diagnoseplots für die Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt.	B-5
Abbildung C-4	Diagnoseplots für die Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.	B-6
Abbildung C-5	Diagnoseplots für die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt.	B-7
Abbildung C-6	Diagnoseplots für die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt. Der erkennbare Randeffekt in Subplot (ii) resultiert daraus, dass sich die Probanden am linken Rand des Plots an die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung von $t = 0$ s annähern, also nahe an eine perfekte Ausführung kommen.	B-8
Abbildung C-7	Diagnoseplots für den Pupillendurchmesser (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.	B-9

- Abbildung C-8 Diagnoseplots für den RTLX (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt, mit Ausnahme von 1 und 2, weshalb zur Prüfung von 2 zusätzlich eine Friedmann's ANOVA durchgeführt wird (Empfehlung von [Cai-2007]). Die in (ii) und (v) erkennbaren Verteilungen (zwei parallele Linien) und die damit verbundene Verletzung von 1 resultieren daraus, dass die RTLX-Daten für das maschinenzentrierte HMI stark und über alle Probanden von den nutzerzentrierten HMI abweichen, was zu einer Kategorisierung der Daten in zwei Klassen (maschinenzentriert, nutzerzentriert) führt. B-10
- Abbildung C-9 Diagnoseplots für den SUS (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt, mit Ausnahme von 1 und 2, weshalb zur Prüfung von 2 zusätzlich eine Friedmann's ANOVA durchgeführt wird (Empfehlung von [Cai-2007]). Die in (ii) und (v) erkennbaren Verteilungen (zwei parallele Linien) und die damit verbundene Verletzung von 1 resultieren daraus, dass die SUS-Daten für das maschinenzentrierte HMI stark und über alle Probanden von den nutzerzentrierten HMI abweichen, was zu einer Kategorisierung der Daten in zwei Klassen (maschinenzentriert, nutzerzentriert) führt. B-11
- Abbildung C-10 Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt. B-12
- Abbildung C-11 Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt. B-13
- Abbildung C-12 Diagnoseplots für den Verlaufseffekt bzw. den Verlauf der Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt. B-14
- Abbildung C-13 Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 1 (vernachlässigbare absolute Residuen), 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt. B-15
- Abbildung C-14 Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt. B-16
- Abbildung C-15 Diagnoseplots für die Fehlerzahl (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt. B-17
- Abbildung C-16 Diagnoseplots für die Fehlerzahl (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt. B-18
- Abbildung C-17 Diagnoseplots für die Ablagegenauigkeit (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt. B-19

- Abbildung C-18 Diagnoseplots für den SUS (nicht log-transformiert). Voraussetzung 2 ist nur näherungsweise erfüllt, wird jedoch als erfüllt angenommen, da die geringe Streuung im Bereich der niedrigen angepassten Werte daher kommt, dass für den SUS insgesamt deutlich mehr höhere Werte als niedrigere Werte angegeben werden. Die anderen Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt. Die in (ii) und (iii) erkennbaren diskreten Werteniveaus resultieren daraus, dass als Ergebnis des SUS-Fragebogens immer ganzzahlige Werte entstehen. B-20
- Abbildung C-19 Diagnoseplots für Normalverteilung der Eingangsdaten. Die Voraussetzung ist ausreichend erfüllt. B-22

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit nach [DIN-9241-11]	11
Tabelle 2-2	Die sieben Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110 [DIN-9241-110]	12
Tabelle 2-3	Automatisierungsebenen für Echtzeit-Steuerungssysteme nach [End-1999]; Verteilung der Aufgaben zwischen Mensch (H) und Rechner (C)	27
Tabelle 3-1	Maschinensysteme mit hohem Regelungsaufwand bei Steuerung eines Endeffektors	31
Tabelle 3-2	Anzahl der DOFs für ausgewählte Krantypen (eigene Auswertung)	35
Tabelle 4-1	Überblick und Bewertung existierender Steuerungskonzepte	57
Tabelle 5-1	Vergleich des richtungs- und zielorientierten HMI mit dem maschinen-zentrierten HMI	76
Tabelle 6-1	Zusammenfassung der deskriptiven Kenngrößen	93
Tabelle 6-2	Zusammenfassung der Modellparameter für alle Hypothesen (Modellart: LMM, außer Kollisionen je Versuch: GLMM bzw. ZIPM)	96
Tabelle 6-3	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert)	97
Tabelle 6-4	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (log-transformiert)	98
Tabelle 6-5	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (log-transformiert)	99
Tabelle 6-6	Koeffizienten des GLMM-Teils mit zero-inflation (Baseline + HMI) für Kollisionen je Versuch	100
Tabelle 6-7	Koeffizienten des konditionalen Teils des GLMM (Baseline + HMI) für Kollisionen je Versuch	100
Tabelle 6-8	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für den Pupillendurchmesser	101
Tabelle 6-9	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für den RTLX	102
Tabelle 6-10	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI) für den SUS	103
Tabelle 6-11	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Reihung) für die Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung (log-transformiert)	104
Tabelle 6-12	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Versuchsnummer) für den Verlaufseffekt bzw. den Verlauf der Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert)	105
Tabelle 7-1	Bewertung der Berechnungsstrategien im Hinblick auf die Anforderungen	118
Tabelle 8-1	Technische Spezifikation der RealSense D435 [Int-2020]	129
Tabelle 8-2	Technische Spezifikation der Microsoft HoloLens [Mic-2021]	133
Tabelle 8-3	Zielorientiertes HMI: Berücksichtigung der Grundsätze der Dialoggestaltung	136
		241

Tabelle 9-1	Technische Spezifikation der Joystick-Steuerung (Auswahl) [HBC-2017a; HBC-2017b]	144
Tabelle 9-2	Komponenten der Tablet-Steuerung	149
Tabelle 9-3	Richtungsorientiertes HMI: Berücksichtigung der Grundsätze der Dialoggestaltung	151
Tabelle 10-1	Zusammenfassung der deskriptiven Kenngrößen für die Hypothesen (MZ: maschinenzentriertes HMI; RO: richtungsorientiertes HMI)	164
Tabelle 10-2	Aufgabenzeiten (Mediane) für die explorative Untersuchung des Verlaufseffekts (MZ: maschinenzentriertes HMI; RO: richtungsorientiertes HMI)	165
Tabelle 10-3	Zusammenfassung der Modellparameter für alle Hypothesen (Modellart: LMM, außer Verlaufseffekt: ANOVA)	167
Tabelle 10-4	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert)	168
Tabelle 10-5	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für die Fehlerzahl (log-transformiert)	170
Tabelle 10-6	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für die Ablesegenauigkeit	171
Tabelle 10-7	Koeffizienten des LMM (Baseline + HMI + Gruppe · HMI) für den SUS	172
Tabelle 10-8	HMI-Empfehlung für alle Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit und beide Bedienergruppen (MZ: maschinenzentriertes HMI; RO: richtungsorientiertes HMI)	176

A Hinweise zu Vorschriften, Normen und Gestaltungsrichtlinien für Kransteuerungen

Da Krane in der Regel im Umfeld von Personen betrieben werden, wird der korrekten und sicheren Funktion sowie der Entwicklung von risikomindernden Maßnahmen im Fehlerfall große Bedeutung beigemessen. Aus diesem Grund existieren eine ganze Reihe von Unfallverhütungsvorschriften und Sicherheitsvorgaben. Eine zusammenfassende Darstellung der sicherheitsrelevanten Aspekte findet sich beispielsweise in [Koo-2011].

Zu den wichtigsten Unfallverhütungsvorschriften gehören:

- DGUV Vorschrift 1: Grundsätze der Prävention [Bun-2013b]
- DGUV Vorschrift 3: Elektrische Anlagen und Betriebsmittel [Bun-1997a]
- VBG 5: Kraftbetriebene Arbeitsmittel [Bun-1993]
- DGUV Vorschrift 52: Krane [Bun-2013a]
- DGUV Vorschrift 54: Winden, Hub- und Zuggeräte [Bun-1997b]
- DGUV-Regel 100-500, Kapitel 2.8: Betreiben von Lastaufnahmeeinrichtungen im Hebezeugbetrieb [Bun-2008]
- DGUV Regel 103-006: Einrichtungen zur drahtlosen Übertragung von Steuerbefehlen [Bun-1995]
- DGUV-Regel 109-014: Richtlinien für Funkfernsteuerungen von Kranen [Bun-1986]

Ferner existieren ausführliche Vorgaben zur funktionalen Sicherheit. Funktionale Sicherheit ist der Teil der Gesamtsicherheit, der davon abhängig ist, dass ein System oder ein Betriebsmittel korrekte Antworten auf seine Eingangszustände liefert. Ein System gilt als funktional sicher, wenn sicherheitsgerichtete Steuerungen ihre Sicherheitsfunktion auch im Fehlerfall zuverlässig erbringen und wenn im Notfall die bestimmungsgemäße Funktion entweder wieder hergestellt werden kann oder ein vorher definierter sicherer Systemzustand eingenommen wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sowohl systematische als auch zufällig auftretende Fehler durch entsprechende Überwachungsrichtungen werden. [DIN-61508]

Die wichtigsten Vorschriften zum Thema Sicherheit und funktionale Sicherheit bei Kranen, insbesondere bei der Steuerung von Kranen, sind:

- „Maschinenrichtlinie“: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG [EU-2006]

- DIN EN ISO 13849-1: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze [DIN-13849-1]
- DIN EN 60204-32: Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen – Anforderungen für Hebezeuge [DIN-60204-32]
- DIN EN 61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme [DIN-61508]
- DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung [DIN-12100]
- DIN EN 13135: Krane – Sicherheit – Konstruktion – Anforderungen an die Ausrüstung [DIN-13135]
- DIN EN ISO 13850: Sicherheit von Maschinen – Not-Halt-Funktion – Gestaltungsleitsätze [DIN-13850] Krane: Betätigungssinn und Anordnung von Stellteilen in Krankabinen
- DIN EN 894-1 bis -4: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen [DIN-894-1; DIN-894-2; DIN-894-3; DIN-894-4]
- DIN EN 614-1 bis -2: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze [DIN-614-1; DIN-614-2]

Weiterführend existiert eine Reihe von Normen, die sich spezifisch mit bestimmten Krantypen beschäftigen und dabei auch Sicherheitsaspekte berücksichtigen, u. a. für Turmdrehkrane [DIN-14439], Brücken- und Portalkrane [DIN-15011], Ladekrane [DIN-12999] sowie Fahrzeugkrane [DIN-13000].

Darüber hinaus existieren zahlreiche sowohl normative als auch nicht-normative Vorschriften, Gestaltungsrichtlinien und Erfahrungswerte, die für die Gestaltung von Kransteuerungen von Belang sind. Wichtige Richtlinien im Hinblick auf die Gestaltung von Kransteuerungen (ortsfest und beweglich) sind:

- DIN EN ISO 10075-1 bis -2: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung [DIN-10075-1; DIN-10075-2; DIN-10075-3]
- DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion, u. a. [DIN-9241-11; DIN-9241-110; DIN-9241-210]
- DIN EN 614-1 bis -2 : Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze [DIN-614-1; DIN-614-2]
- DIN EN 984-1 bis 4: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen [DIN-894-1; DIN-894-2; DIN-894-3; DIN-894-4]
- DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen [DIN-6385]
- DIN EN 13557: Krane – Stellteile und Steuerstände [DIN-13557]
- ISO 7752-1 bis -4: Cranes — Control layout and characteristics, u. a. [ISO-7752-1]
- VDI 4412: Kabellose Steuerung von Kranen [VDI-4412]

-
- DIN 15025: Krane – Betätigungssinn und Anordnung von Stellteilen in Krankabinen [DIN-15025]
 - DIN 61310-3: Sicherheit von Maschinen – Anzeigen, Kennzeichen und Bedienen – Teil 3: Anforderungen an die Anordnung und den Betrieb von Bedienteilen [DIN-61310-3]
 - VDI/VDE 2185-1: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik [VDI-2185-1]
 - VDI/VDE 2185-2: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik – Koexistenzmanagement von Funklösungen [VDI-2185-2]

Im Rahmen der Forschungstätigkeiten des Autors wurde zur Anforderungsdefinition eine ausführliche Normenrecherche durchgeführt. Die Rechercheergebnisse im Hinblick auf sicherheitsrelevante und gestaltungstechnische normative Anforderungen an Kransteuerungen können in Anhang A von [Fot-2020] nachgelesen werden.

Ferner existieren ausführliche Zusammenstellungen mit ergonomischen Kennwerten und Daten zur Systemgestaltung, so beispielsweise in [Sch-2013], sowie eine Vielzahl an Publikationen, die sich mit der Gestaltung von Bedienkonzepten im Allgemeinen beschäftigen. Hier seien beispielhaft [Göt-2007; Kro-1997; Nor-1983; Nor-2013] genannt.

B Vorverarbeitung der Messdaten für den Pupillendurchmesser (VR-Studie)

Die Mess-Rohdaten für den Pupillendurchmesser der Laborstudie aus Kapitel 6 werden wie im Folgenden beschrieben verarbeitet.

Nach visueller Inspektion der Daten werden die beiden Cutoff-Kriterien auf 2 mm und 6 mm für alle Teilnehmer als Minimal- und Maximalwerte gesetzt. Dies ermöglicht eine Unterscheidung von Datenpunkten, bei denen der Eye-Tracker die Pupille nicht erkennt, was zu Pupillendurchmesserwerten nahe 0 mm führt, oder die Pupille falsch erkennt, was zu Durchmesserwerten zwischen 8 und 10 mm führt. Datencluster mit einer Dauer von weniger als 60 ms und die zusätzlich mehr als 40 ms Abstand zu den nächsten gültigen Abtastungen haben, werden als isoliert kategorisiert und verworfen. Datenpunkte mit einer mittleren absoluten Abweichung von mehr als Faktor 8 im Vergleich zu benachbarten Abtastungen wurden als Ausreißer bei der Pupillenerweiterungsgeschwindigkeit eingestuft und entfernt. Um Kanteneffekte zu vermeiden, werden alle Datenpunkte 40 ms vor oder nach einer Lücke mit einer Dauer zwischen 75 ms und 2000 ms ebenfalls verworfen. Anschließend werden Trendlinien-Ausreißer durch mittlere absolute Abweichungen größer als Faktor 8 von der Trendlinie identifiziert. Für die Trendlinien-Schätzung wird ein 12 Hz Tiefpassfilter verwendet. Der Trendlinienfilter wird viermal wiederholt. Anschließend werden die mittleren Werte des Pupillendurchmessers für die Zeitpunkte berechnet, für die sowohl die Messwerte des linken als auch des rechten Pupillendurchmessers im gültigen Bereich sind. Wenn nur die Probe eines Auges gültig war, wird der dynamische Offset der beiden Pupillen aus der Referenzmessung des Probanden für die Schätzung des mittleren Pupillendurchmessers berücksichtigt. Schließlich werden die Daten auf 1000 Hz interpoliert und mit einem Tiefpassfilter von 4 Hz geglättet. Lücken größer als 250 ms werden nicht interpoliert. Unter Verwendung des mittleren Pupillendurchmessers werden abschließend die durchschnittlichen Pupillendurchmesser je Versuch und Teilnehmer berechnet.

C Prüfung der Voraussetzungen für die statistischen Modelle

C.1 Linear Mixed Models (LMM)

Um zu prüfen, ob die verwendeten statistischen Modelle die Voraussetzungen für LMM erfüllen, werden diagnostische Plots eingesetzt. Das Vorgehen zur Prüfung orientiert sich an [Win-2013, S. 12 ff] bzw. [Gal-2013, Kap. 13] und kann analog in jedem Statistikbuch, das LMM behandelt, nachvollzogen werden.

1. Die Prüfung auf **Linearität** erfolgt mit Hilfe des Residuenplots (Subplot (ii) in den Diagnosegrafiken): Wenn die Verteilung der standardisierten Residuen über den gesamten Bereich der angepassten Werte kein offensichtliches nichtlineares Muster (Verteilung folgt einer Kurve, mehrere Linien etc.) aufweist, ist Linearität gegeben.
Für den Fall, dass die im Subplot (ii) eingezeichnete Trendlinie (geglättete Werte der standardisierten Residuen) nicht horizontal verläuft, sondern eine steigende/fallende Gerade erkennbar ist, muss davon ausgegangen werden, dass noch ein Fixed Effect existiert, der im Modell noch nicht abgebildet ist. Bei den im Folgenden aufgeführten Modellen, bei denen eine steigende/fallende Trendlinie vorliegt, konnte jedoch kein weiterer Fixed Effect identifiziert werden. In diesen Fällen wird ein zusätzlicher Subplot (v) ausgegeben, der die absoluten Residuen über den angepassten Werten ausgibt. Sind die absoluten Residuen in einer im Vergleich zur Größe der abhängigen Variable sehr kleinen Größenordnung, kann die Steigung der Trendlinie (und damit die Änderung der Residuen) vernachlässigt werden, weil durch die sehr kleinen absoluten Residuen gezeigt werden kann, dass die angepassten Werten den beobachteten Werten sehr genau entsprechen. Folglich kann auch in diesem Fall Linearität angenommen werden.
2. Die Prüfung der Daten auf **Homoskedastizität** (oder: Abwesenheit von Heteroskedastizität) erfolgt auch mit Hilfe von Subplot (ii): Wenn die Streuweite der standardisierten Residuen über den gesamten Bereich der angepassten Werte gleichmäßig groß ist, ist Homoskedastizität gegeben.
3. Die Prüfung auf **normalverteilte Residuen** erfolgt mit Hilfe der Subplots (i) und (iii): Wenn zum einen die Dichteverteilung der standardisierten Residuen in Subplot (i) der eingezeichneten Normalverteilung (näherungsweise) folgt, und zum anderen in Subplot (iii) (sog. QQ-Plot) eine näherungsweise diagonale Linie erkennbar ist, dann können normalverteilte Residuen angenommen werden.

4. Zur Prüfung, ob **die korrekten Effekte als zufällige Effekte (Random Effects) modelliert** werden, kommt Subplot (iv) zum Einsatz: Wenn die beobachteten zufälligen Intercepts (Steigungen der Regressionsgeraden der zufälligen Effekte) im Bezug zu den theoretischen Werten näherungsweise eine diagonale Gerade ergeben, ist diese Voraussetzung erfüllt.
5. Die **Abwesenheit von Ausreißern (Datenpunkte mit überhöhtem Einfluss auf das Modell)** wird über die Subplots (ii) bis (iv) geprüft: Wenn keine Datenpunkte zu erkennen sind, die offensichtlich als extreme Ausreißer vom Verhalten der benachbarten Punkte abweichen, dann gilt diese Voraussetzung als hinreichend erfüllt. Außerdem wurde bereits in den jeweiligen Ergebniskapiteln die Zahl der extremen Ausreißer berichtet, die sich im vernachlässigbaren Bereich befindet. Als extremen Ausreißer gelten Datenpunkte, die im Boxplot außerhalb des dreifachen Interquartilsabstands liegen.

Bei einigen der im Folgenden dargestellten Modelle lässt sich insbesondere an den Rändern der Subplots eine Abweichung vom gewünschten Verhalten bei einigen wenigen Punkten erkennen (Gefahr von Ausreißern). Hierbei handelt es sich jedoch stets um einige wenige Datenpunkte, während insgesamt der allergrößte Teil der Datenpunkte das gewünschte Verhalten zeigt. Da sich die abweichenden Punkte stets an den Rändern befinden und sie in ihrer Anzahl vernachlässigbar klein sind, verschlechtern sie die Modellqualität ebenso nur im vernachlässigbaren Bereich. Dieses Verhalten ist bei der Auswertung von statistischen Daten, die durch Probandenversuche entstanden sind, fast nicht zu vermeiden, weil in jeder Studienpopulation mit (mehr oder weniger großen) Ausreißern an den Rändern der untersuchten Variablen gerechnet werden muss.

C.1.1 VR-Studie (Kapitel 6)

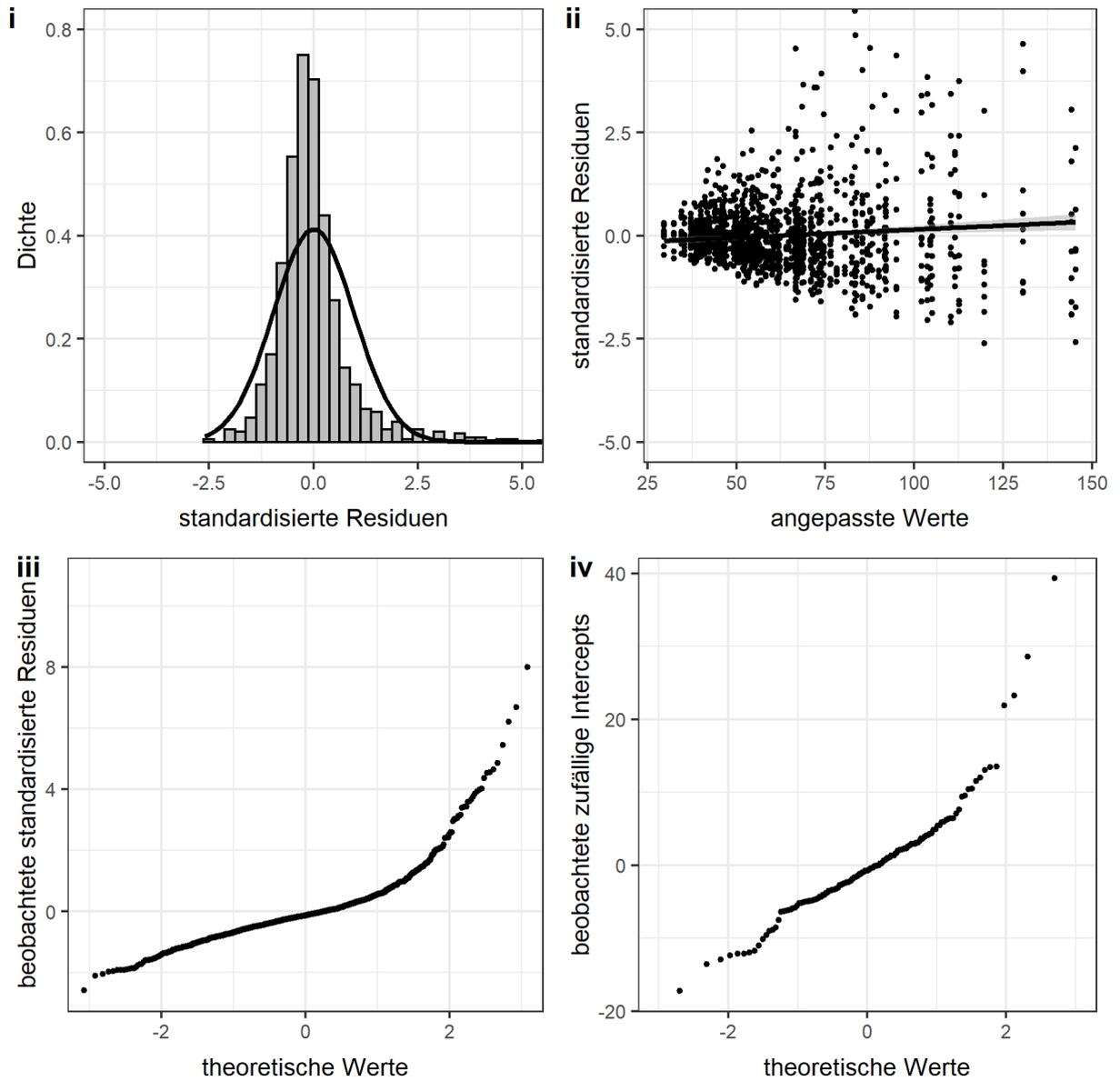


Abbildung C-1: Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt.

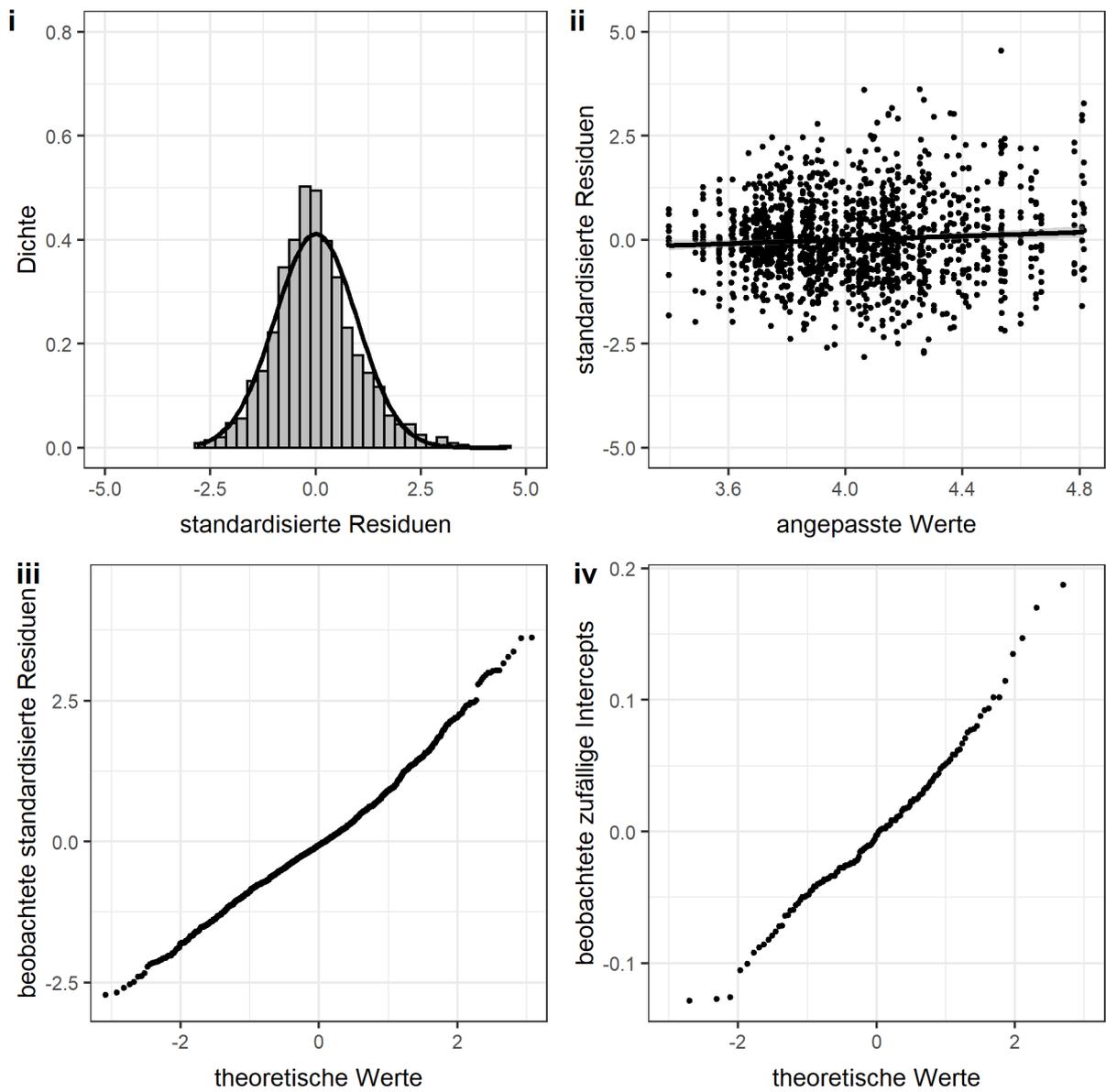


Abbildung C-2: Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.

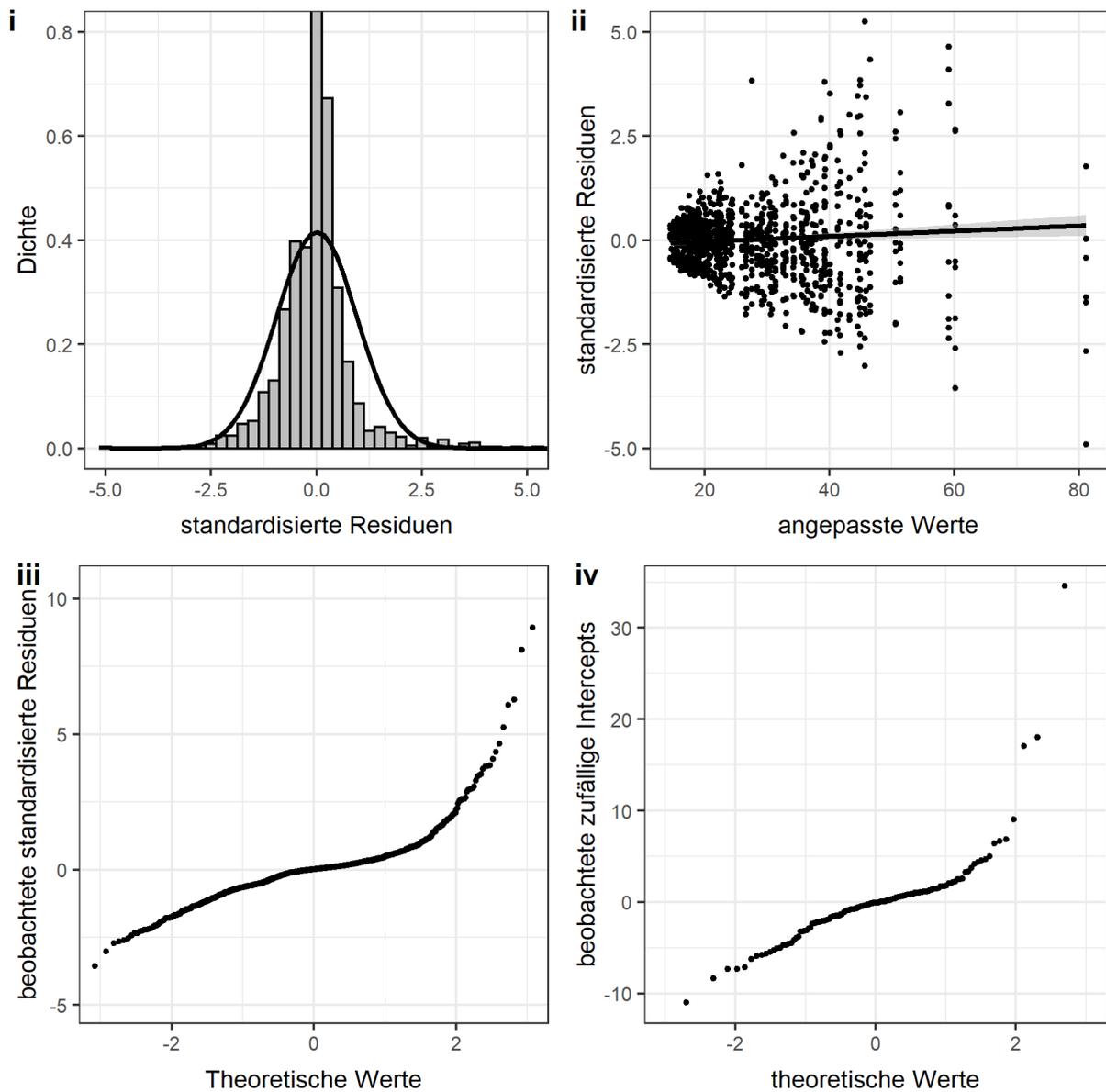


Abbildung C-3: Diagnoseplots für die Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt.

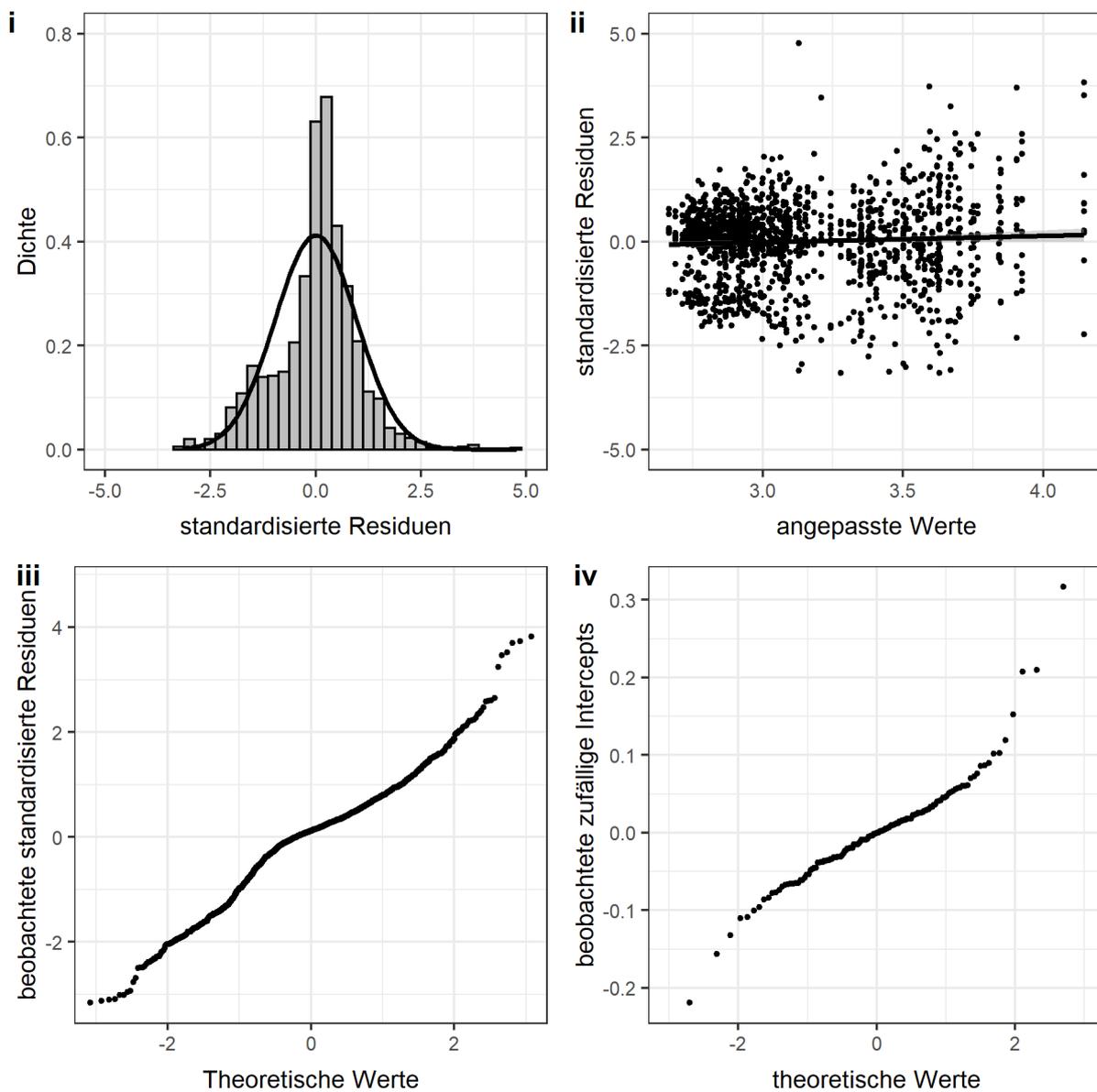


Abbildung C-4: Diagnoseplots für die Gesamtdistanz der TCP-Bewegung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.

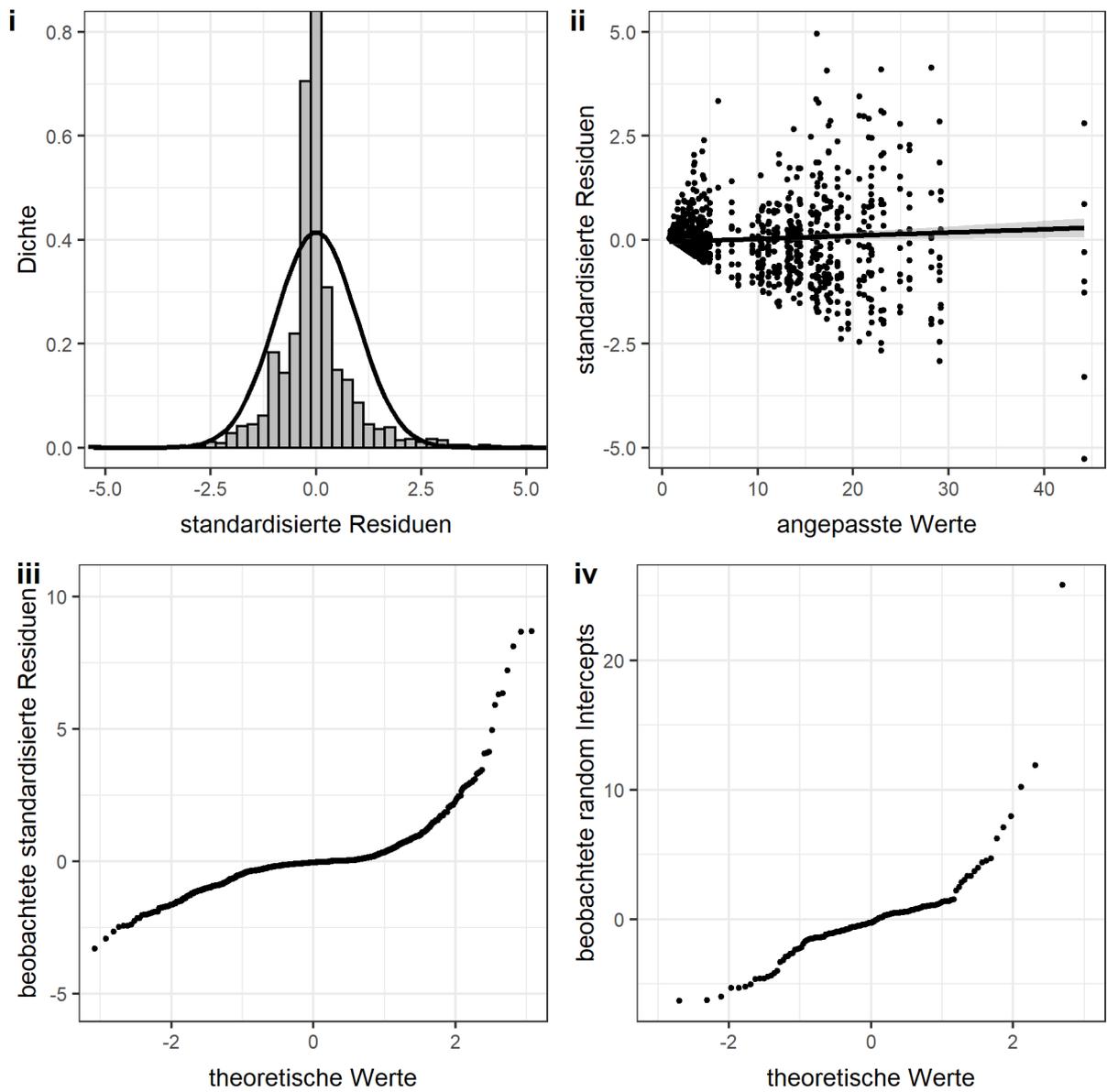


Abbildung C-5: Diagnoseplots für die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt.

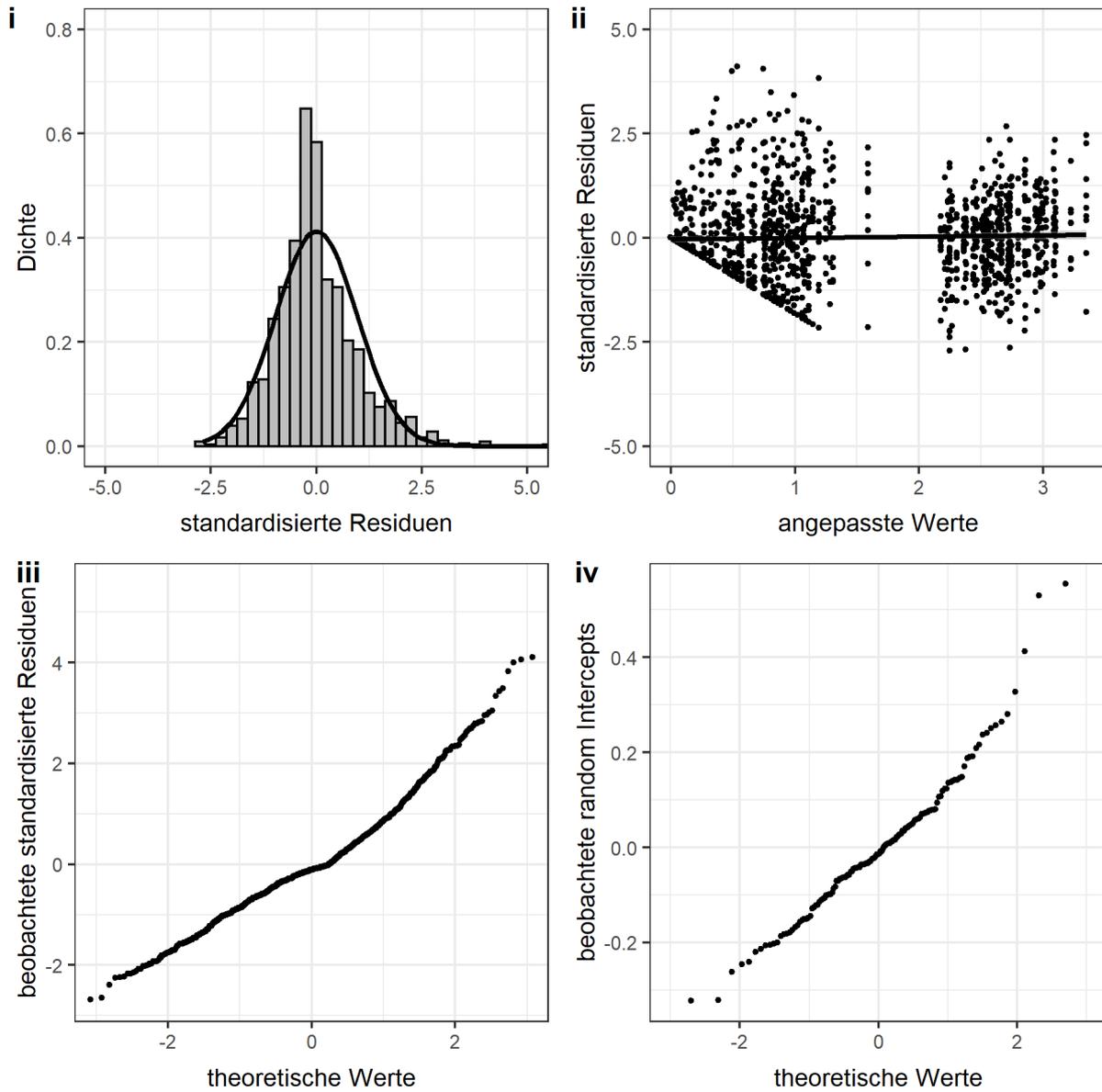


Abbildung C-6: Diagnoseplots für die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt. Der erkennbare Randeffekt in Subplot (ii) resultiert daraus, dass sich die Probanden am linken Rand des Plots an die TCP-Bewegungszeit in die falsche Richtung von $t = 0$ s annähern, also nahe an eine perfekte Ausführung kommen.

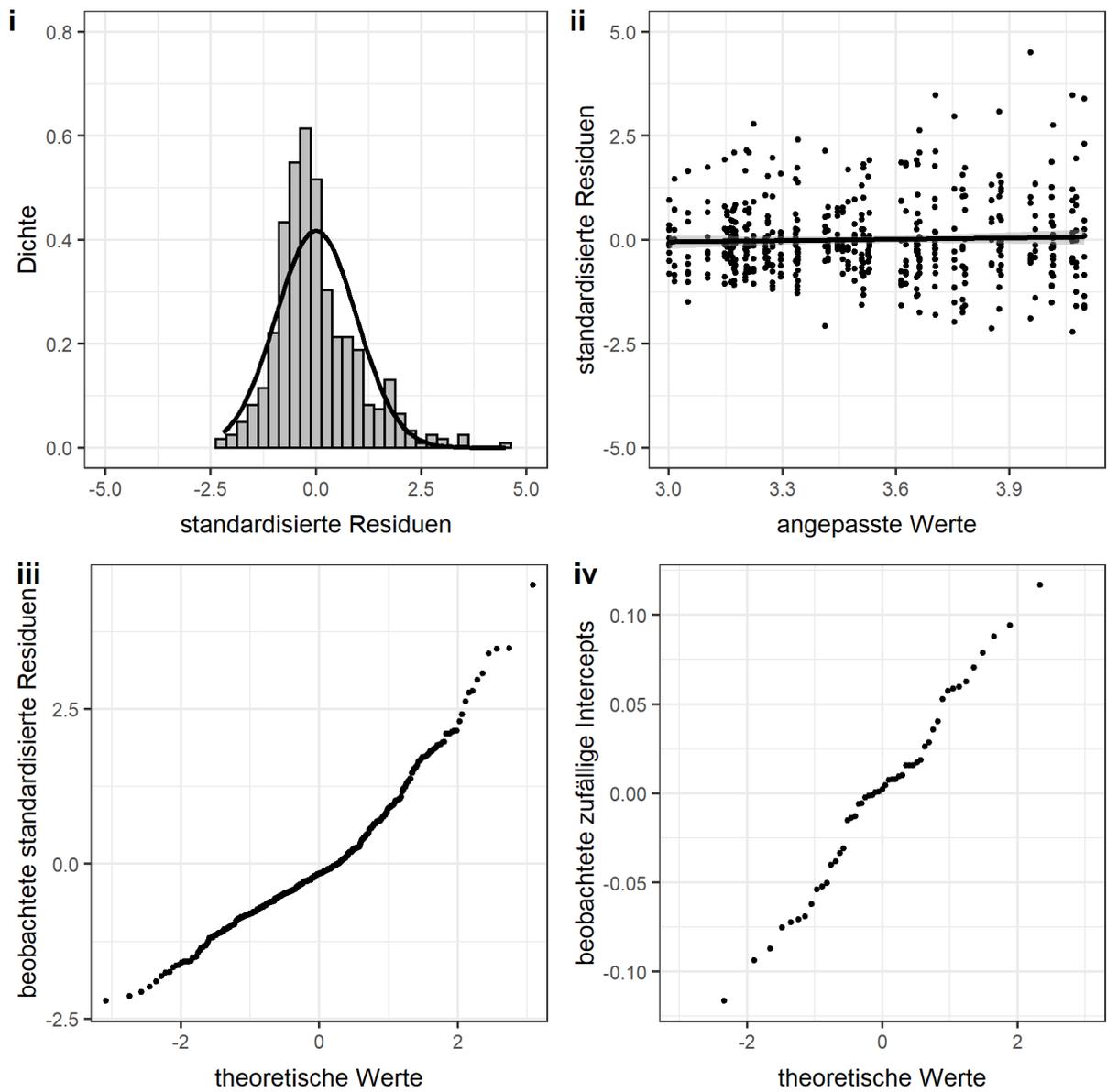


Abbildung C-7: Diagnoseplots für den Pupillendurchmesser (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.

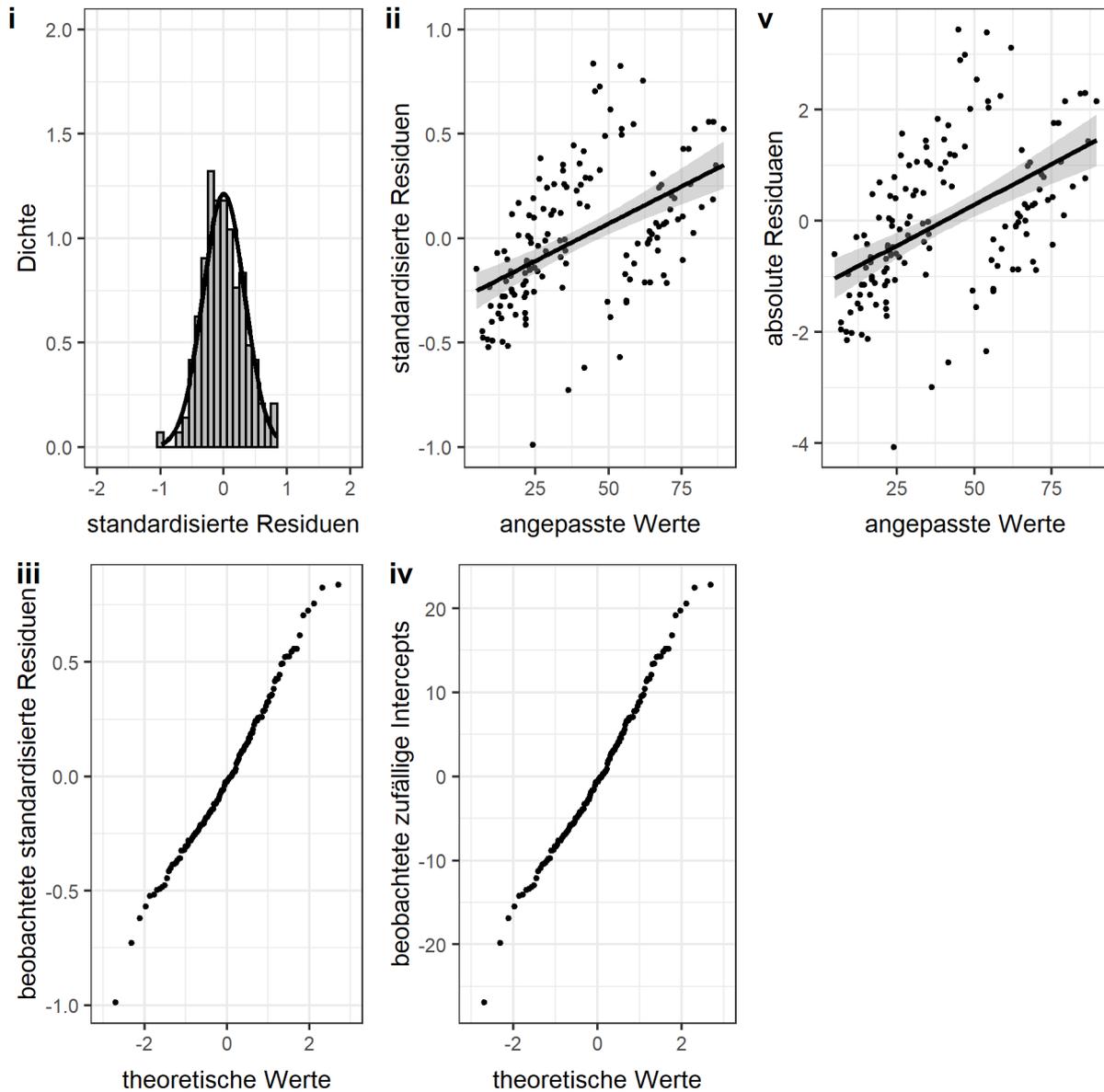


Abbildung C-8: Diagnoseplots für den RTLX (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt, mit Ausnahme von 1 und 2, weshalb zur Prüfung von 2 zusätzlich eine Friedmann's ANOVA durchgeführt wird (Empfehlung von [Cai-2007]). Die in (ii) und (v) erkennbaren Verteilungen (zwei parallele Linien) und die damit verbundene Verletzung von 1 resultieren daraus, dass die RTLX-Daten für das maschinenzentrierte HMI stark und über alle Probanden von den nutzerzentrierten HMI abweichen, was zu einer Kategorisierung der Daten in zwei Klassen (maschinenzentriert, nutzerzentriert) führt.

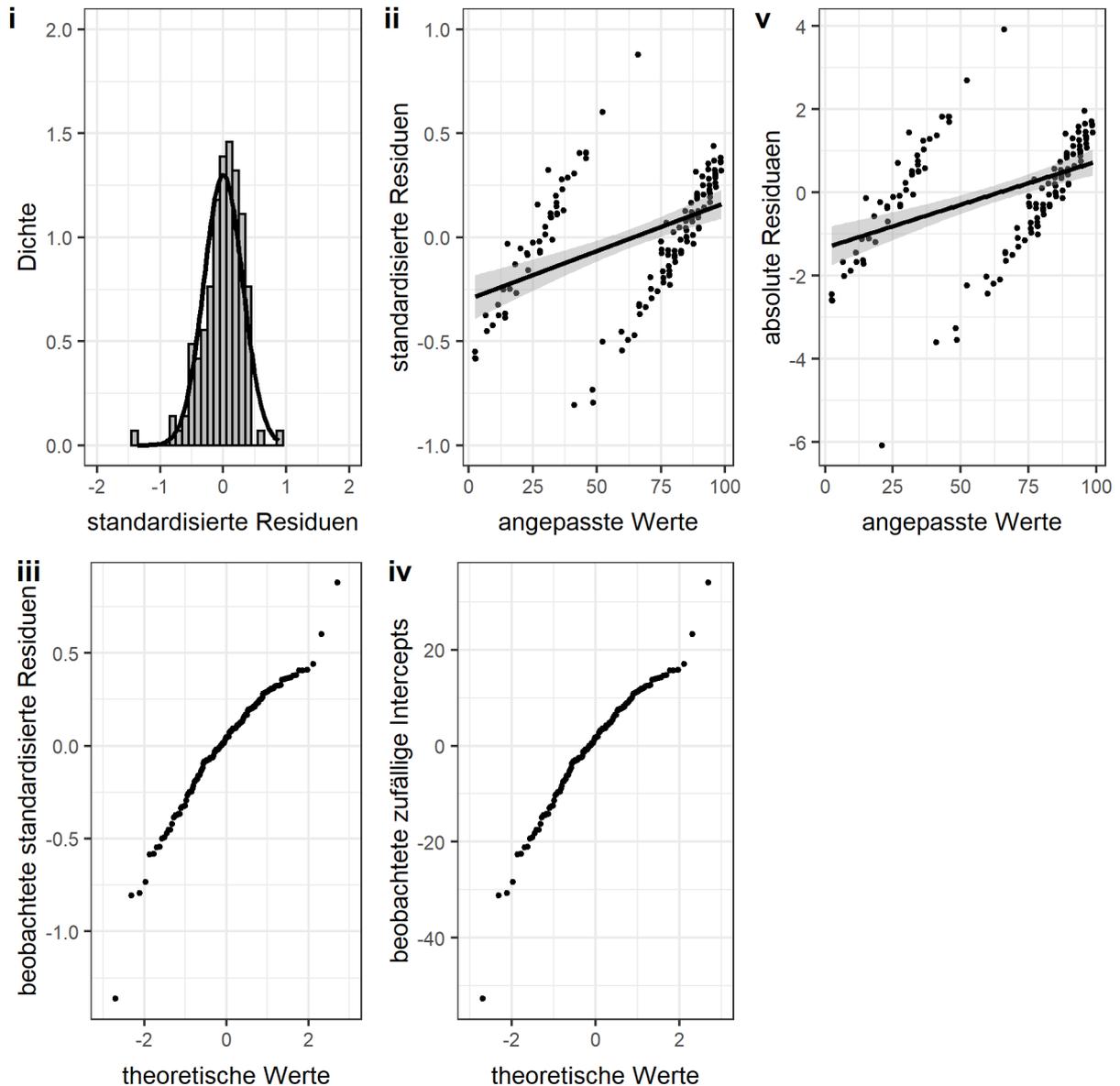


Abbildung C-9: Diagnoseplots für den SUS (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt, mit Ausnahme von 1 und 2, weshalb zur Prüfung von 2 zusätzlich eine Friedman's ANOVA durchgeführt wird (Empfehlung von [Cai-2007]). Die in (ii) und (v) erkennbaren Verteilungen (zwei parallele Linien) und die damit verbundene Verletzung von 1 resultieren daraus, dass die SUS-Daten für das maschinenzentrierte HMI stark und über alle Probanden von den nutzerzentrierten HMI abweichen, was zu einer Kategorisierung der Daten in zwei Klassen (maschinenzentriert, nutzerzentriert) führt.

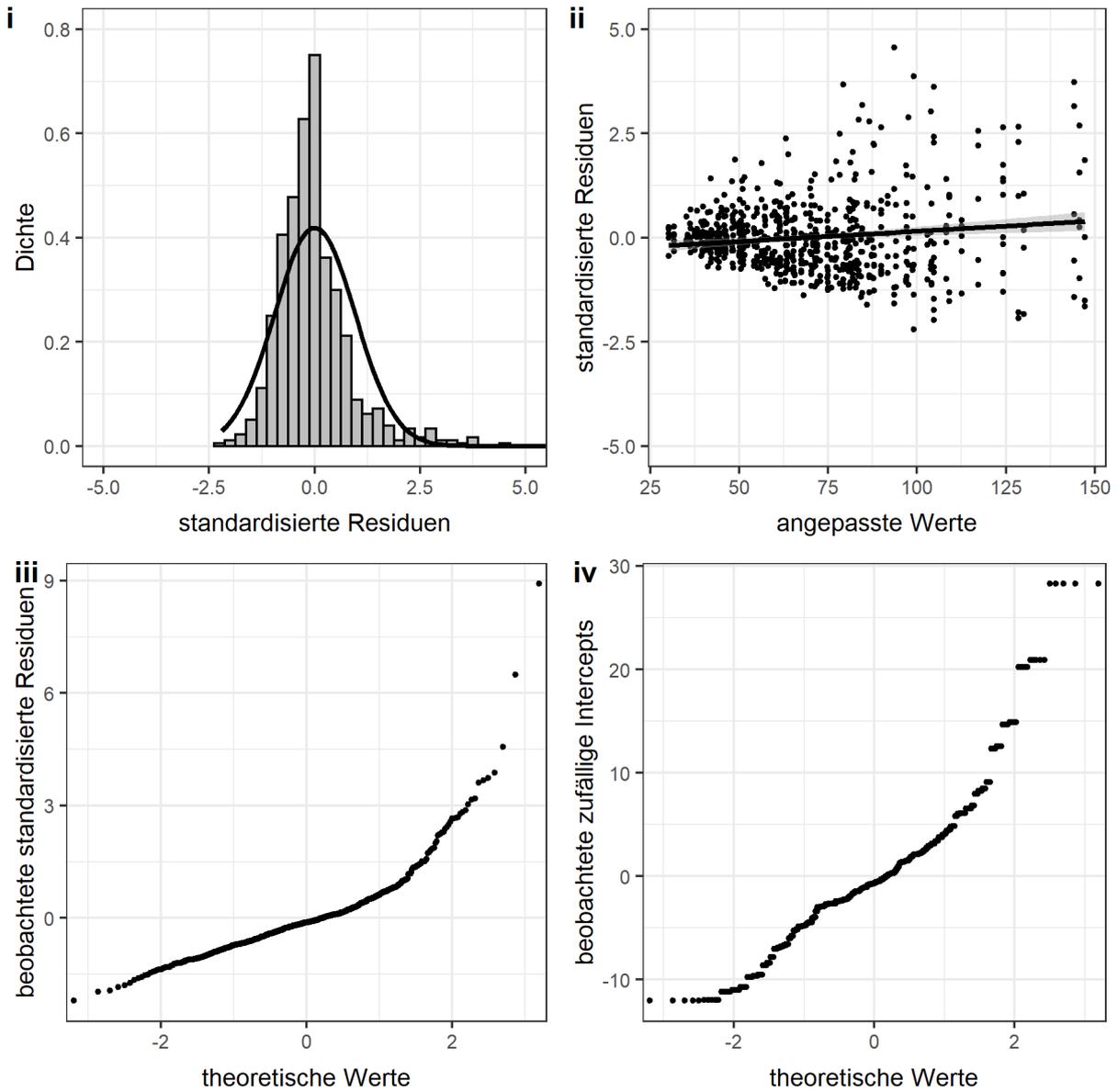


Abbildung C-10: Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt.

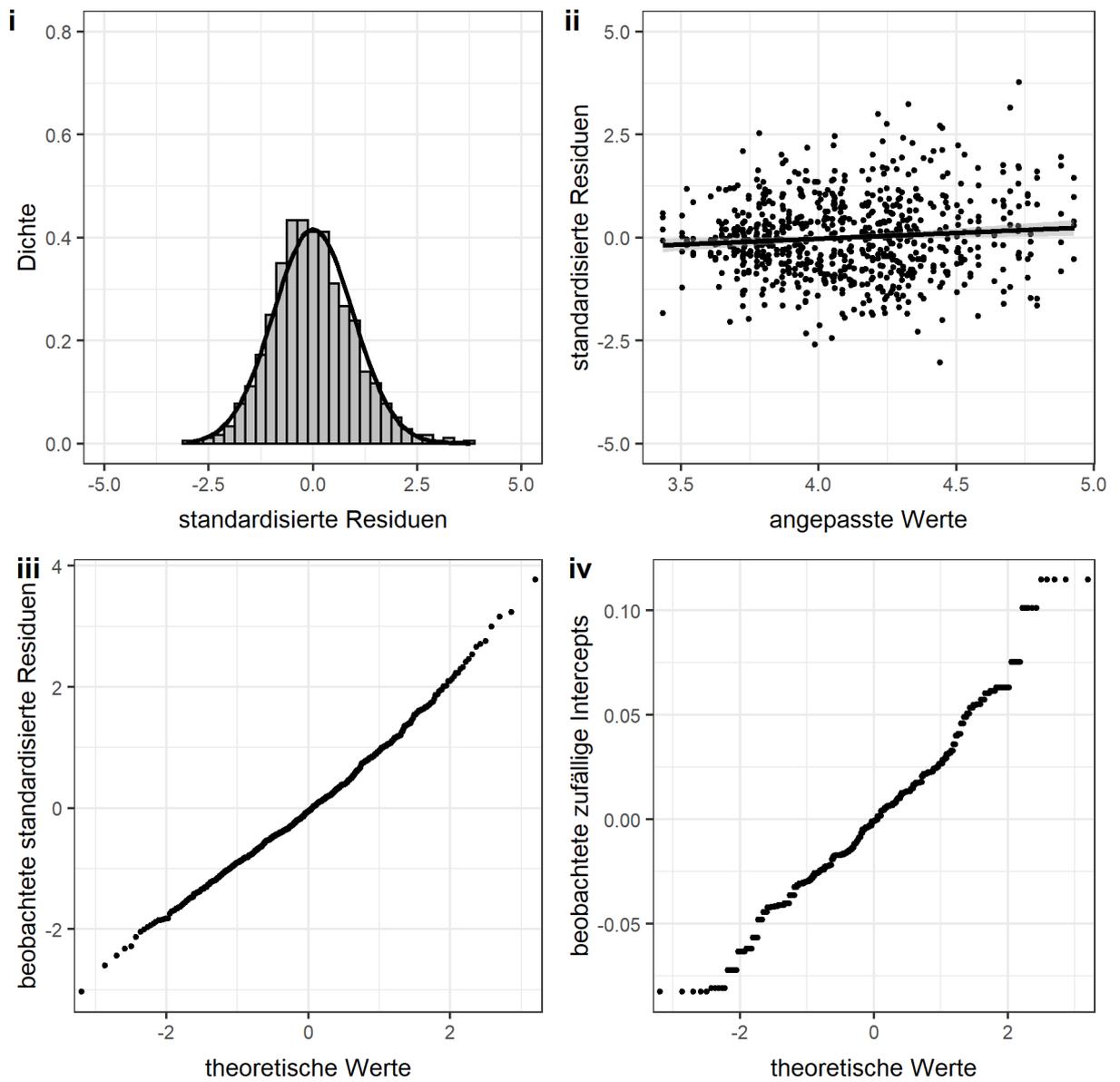


Abbildung C-11: Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung mit/ohne Positionsänderung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.

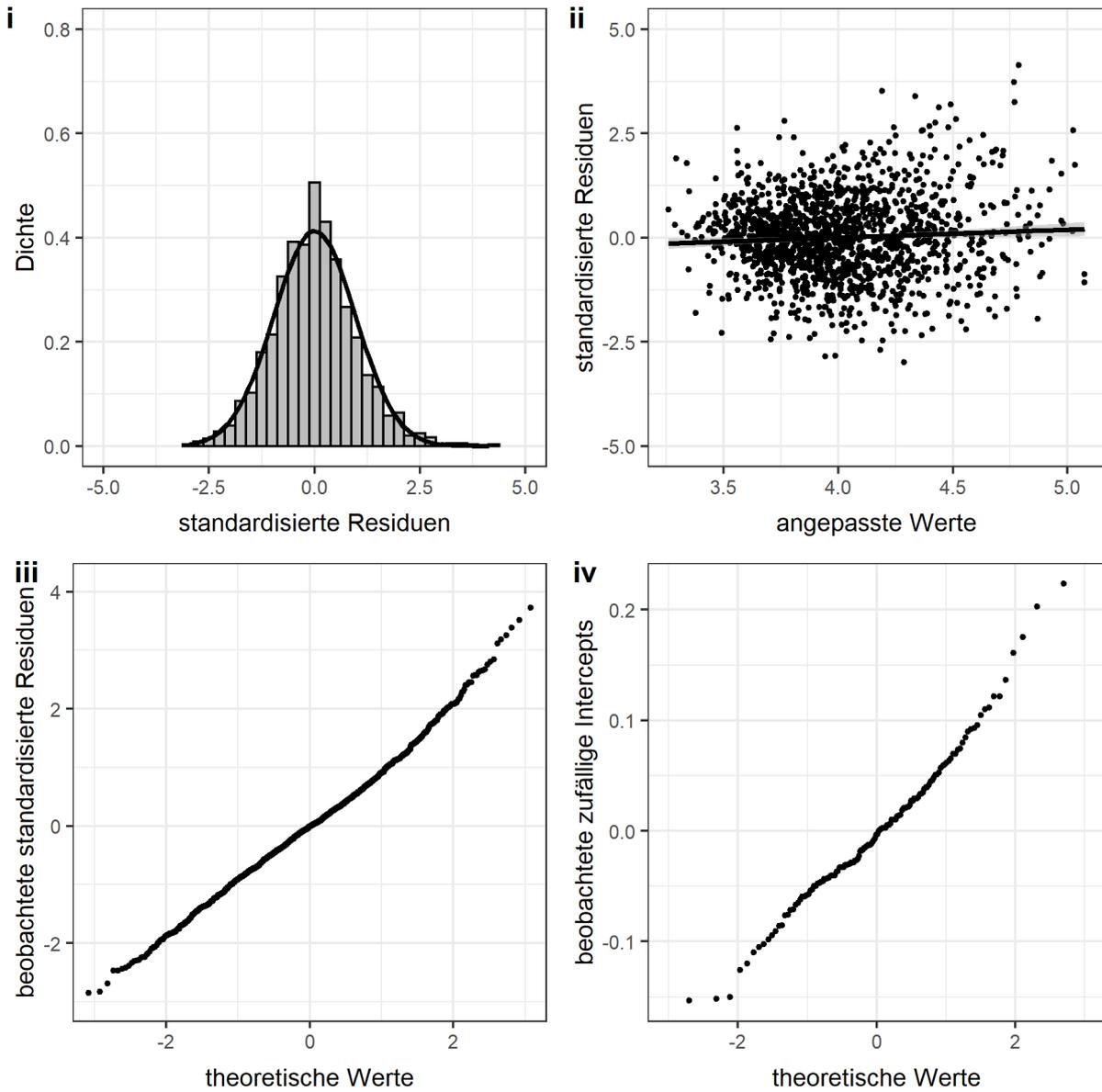


Abbildung C-12: Diagnoseplots für den Verlaufseffekt bzw. den Verlauf der Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.

C.1.2 Realstudie (Kapitel 10)

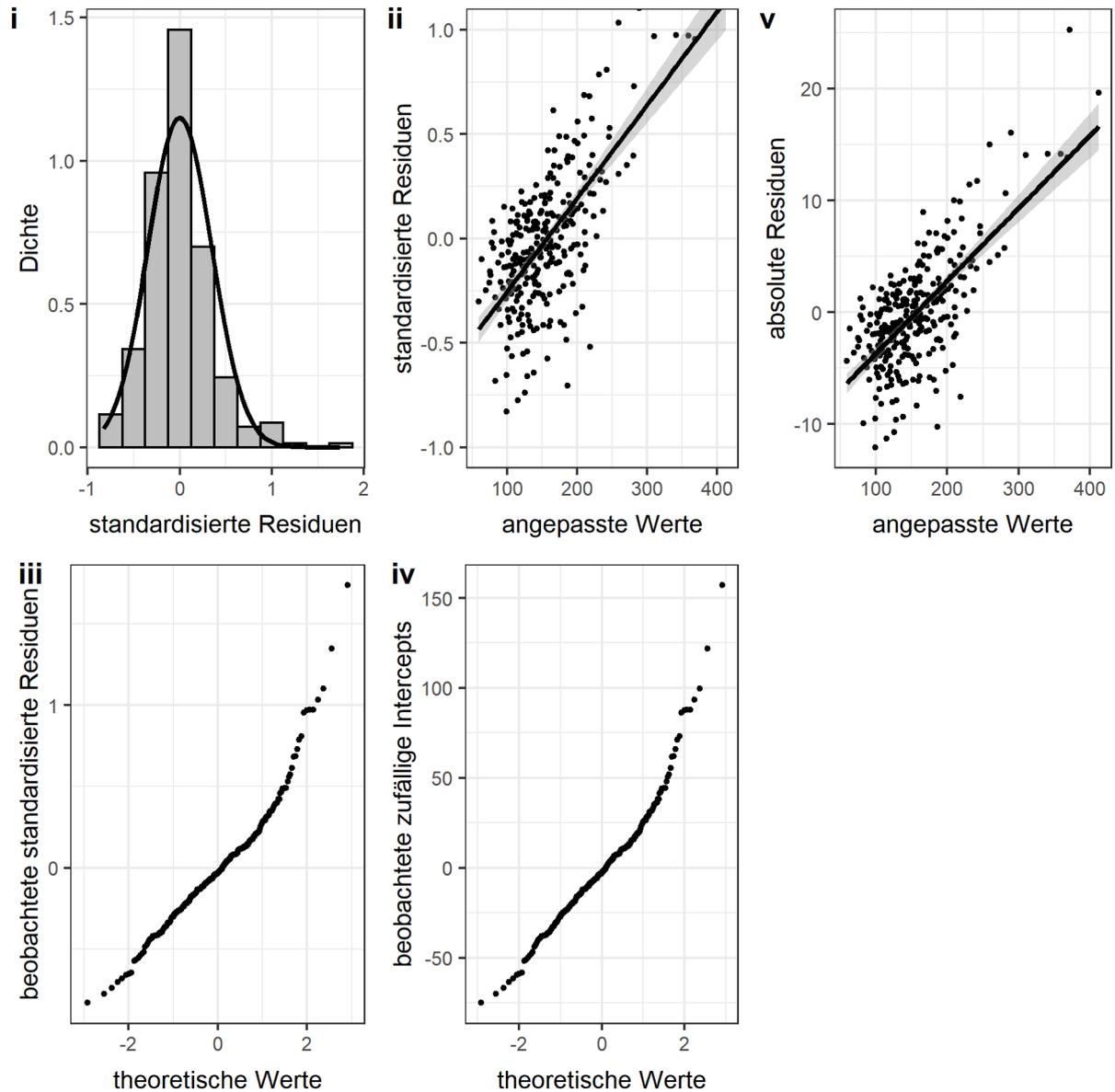


Abbildung C-13: Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 1 (vernachlässigbare absolute Residuen), 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt.

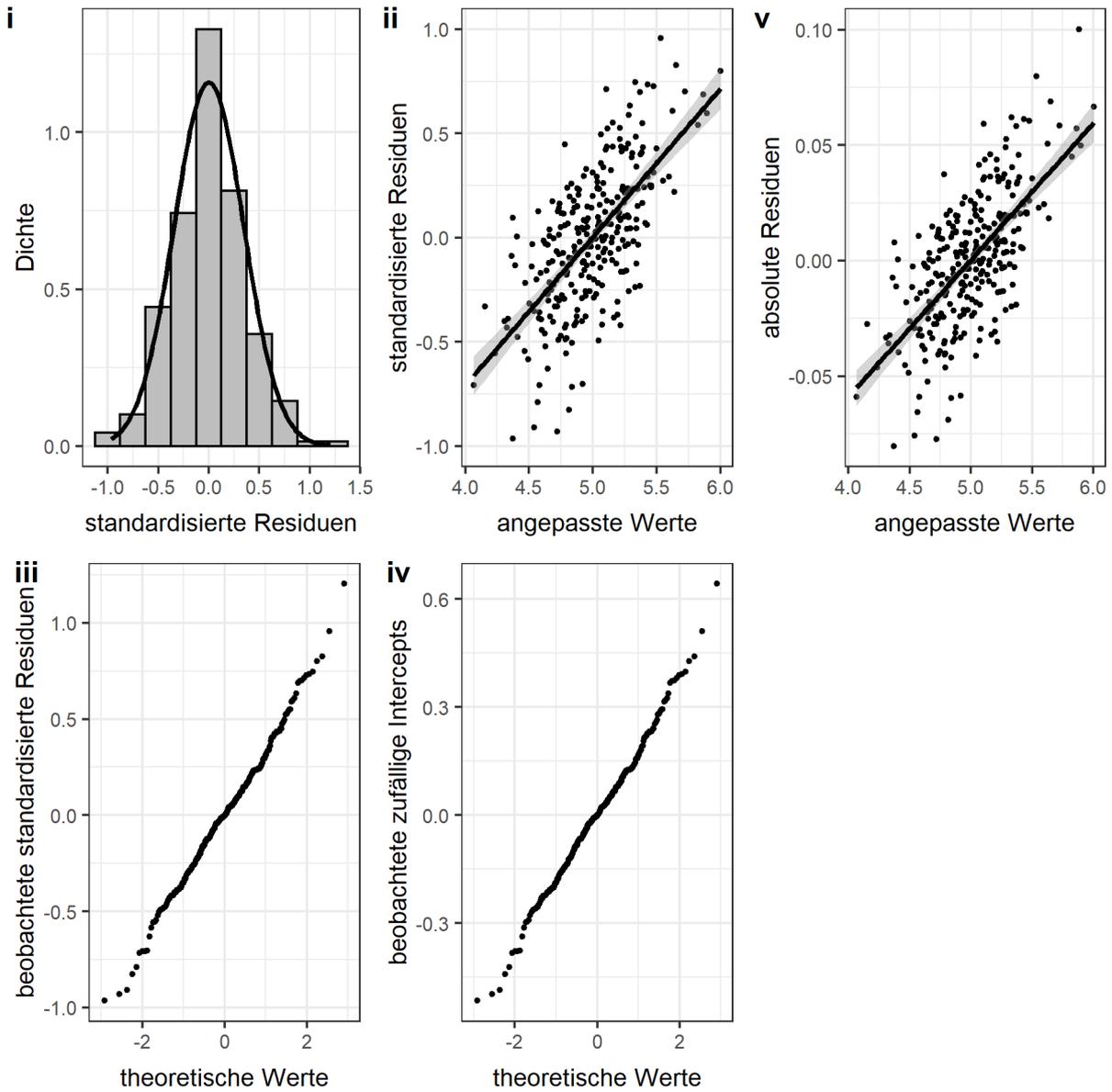


Abbildung C-14: Diagnoseplots für die Zeit zur Aufgabenerfüllung (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.

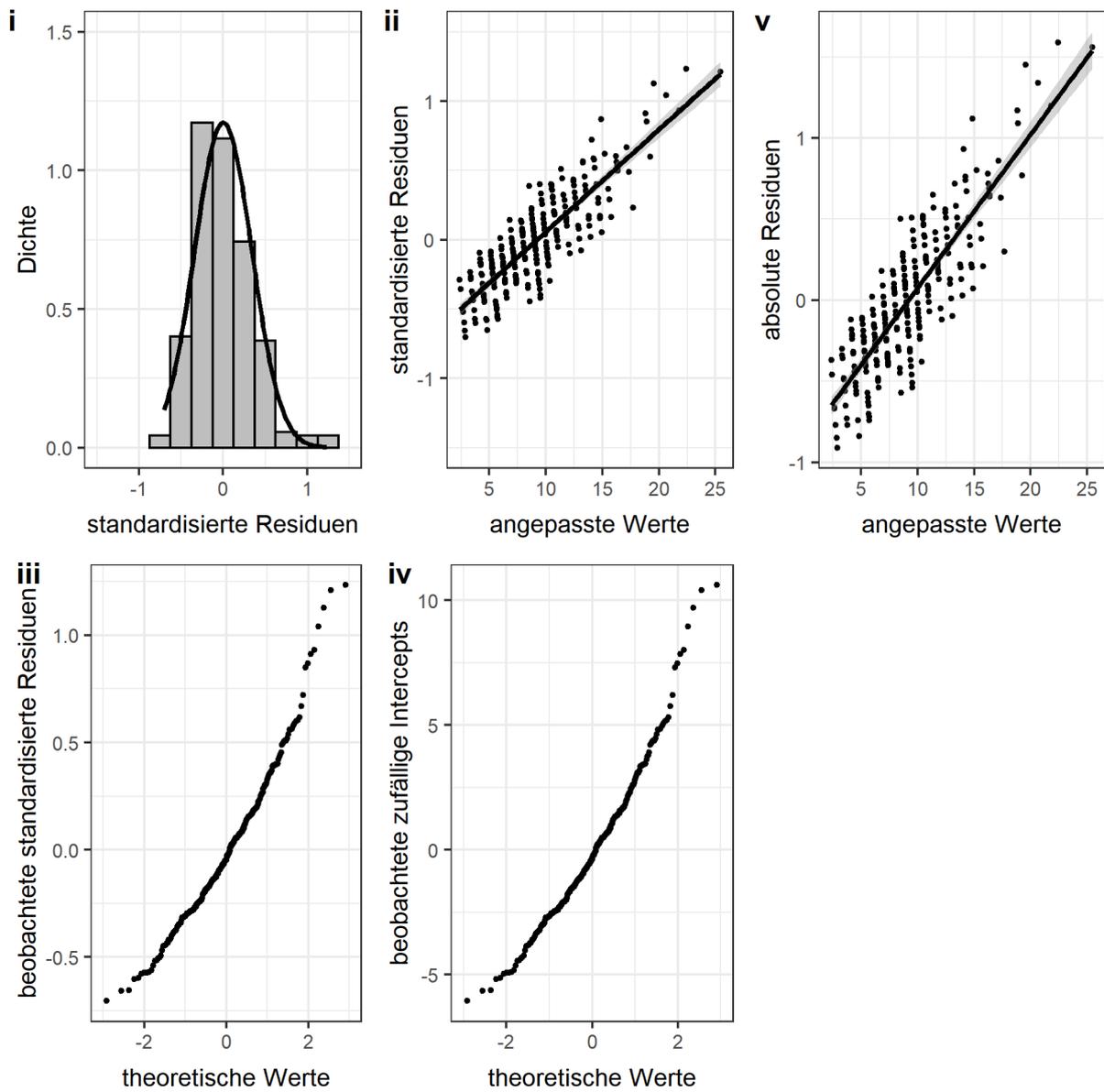


Abbildung C-15: Diagnoseplots für die Fehlerzahl (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen 2, 3 und 4 sind nicht erfüllt.

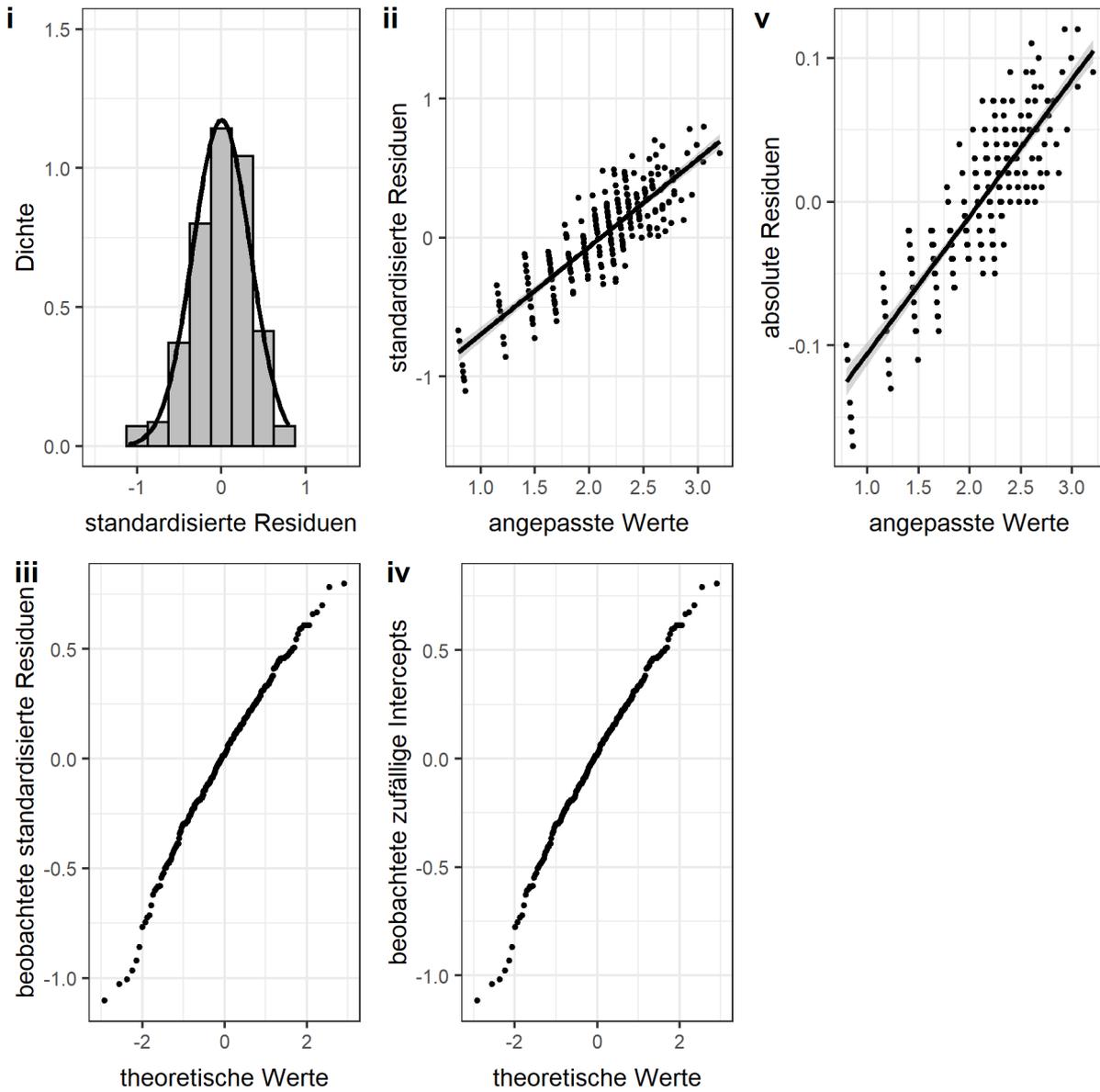


Abbildung C-16: Diagnoseplots für die Fehlerzahl (log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.

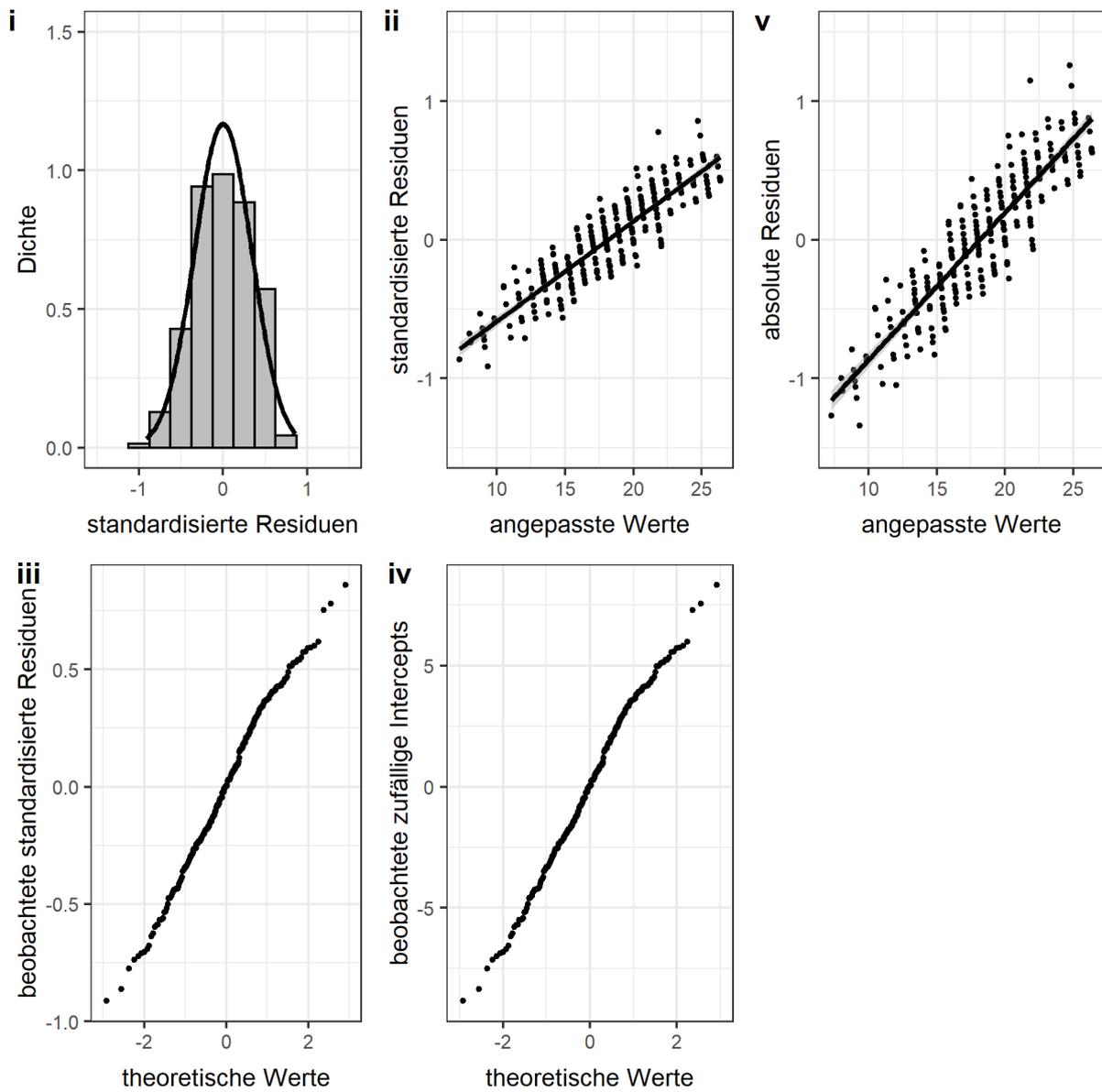


Abbildung C-17: Diagnoseplots für die Ablagegenauigkeit (nicht log-transformiert). Die Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt.

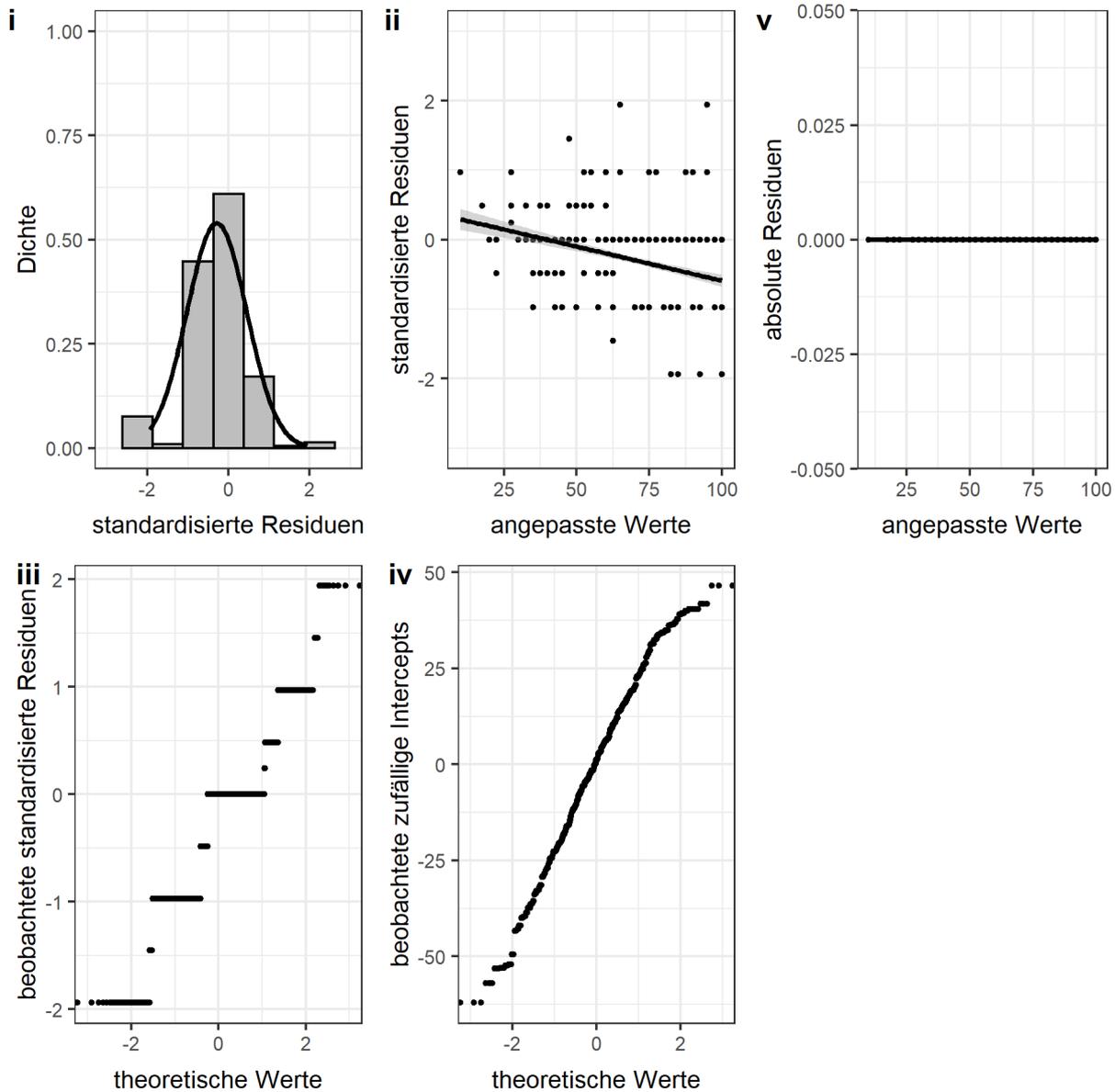


Abbildung C-18: Diagnoseplots für den SUS (nicht log-transformiert). Voraussetzung 2 ist nur näherungsweise erfüllt, wird jedoch als erfüllt angenommen, da die geringe Streuung im Bereich der niedrigen angepassten Werte daher kommt, dass für den SUS insgesamt deutlich mehr höhere Werte als niedrigere Werte angegeben werden. Die anderen Voraussetzungen sind ausreichend erfüllt. Die in (ii) und (iii) erkennbaren diskreten Wertenniveaus resultieren daraus, dass als Ergebnis des SUS-Fragebogens immer ganzzahlige Werte entstehen.

C.2 Mixed Analysis of Variance (ANOVA)

Realstudie (Kapitel 10)

Um zu prüfen, ob die für die Untersuchung des Verlaufeffekts in der Realstudie verwendete Mixed ANOVA die Voraussetzungen erfüllt, werden statistische Tests und diagnostische Plots eingesetzt. Das Vorgehen zur Prüfung orientiert sich an [Kas-2020] und kann analog in jedem Statistikbuch, das Mixed ANOVA behandelt, nachvollzogen werden.

1. Die **Abwesenheit von Ausreißern (Datenpunkte mit überhöhtem Einfluss auf das Modell) für die abhängige Variable** wird über die deskriptiven Boxplots geprüft. Die mit der Mixed ANOVA untersuchten Daten sind – mit vier Ausnahmen – frei von extremen Ausreißern, d. h. Ausreißern, die außerhalb des dreifachen Interquartilsabstands liegen. Durch die geringe Ausreißerzahl kann davon ausgegangen werden, dass sie keinen Einfluss auf die Qualität der ANOVA-Ergebnisse haben.
2. Die **Normalverteilung der abhängigen Variable** wird über QQ-Plots geprüft (siehe Abbildung C-19). Wenn alle Datenpunkte (näherungsweise) entlang der diagonalen Referenzlinie liegen, sind die Daten (näherungsweise) normalverteilt. Darüber hinaus kann auf Grund des zentralen Grenzwertsatzes bei hinreichend großen Stichproben eine Verletzung der Normalverteilung hingenommen werden. Hier gilt die sog. Normalverteilungsannahme [Gol-2013, S. 692, S. 696] (Faustregel: $N > 30$). Die Voraussetzung der Normalverteilung der abhängigen Variable ist für die untersuchten Daten hinreichend erfüllt.
3. Zur Prüfung der **Varianzhomogenität zwischen den Gruppen** wird der Levène-Test verwendet. Die Varianzhomogenität wird bestätigt ($p < 0,05$), mit Ausnahme der Daten für Aufgabe 1 und 3 des richtungsorientierten, kontinuierlichen HMI ($p > 0,05$). Nach [Gol-2013, S. 390] kann die Voraussetzung der Varianzhomogenität jedoch bei identischen Gruppengrößen gelockert werden. Daher wird diese Voraussetzung als hinreichend erfüllt betrachtet.
4. Die **Sphärizität** wird mit Hilfe des Mauchly-Tests geprüft und über Sphärizitäts-Korrekturen sichergestellt, die automatisch durch das Statistikprogramm ausgeführt werden. Die Voraussetzung ist damit erfüllt.

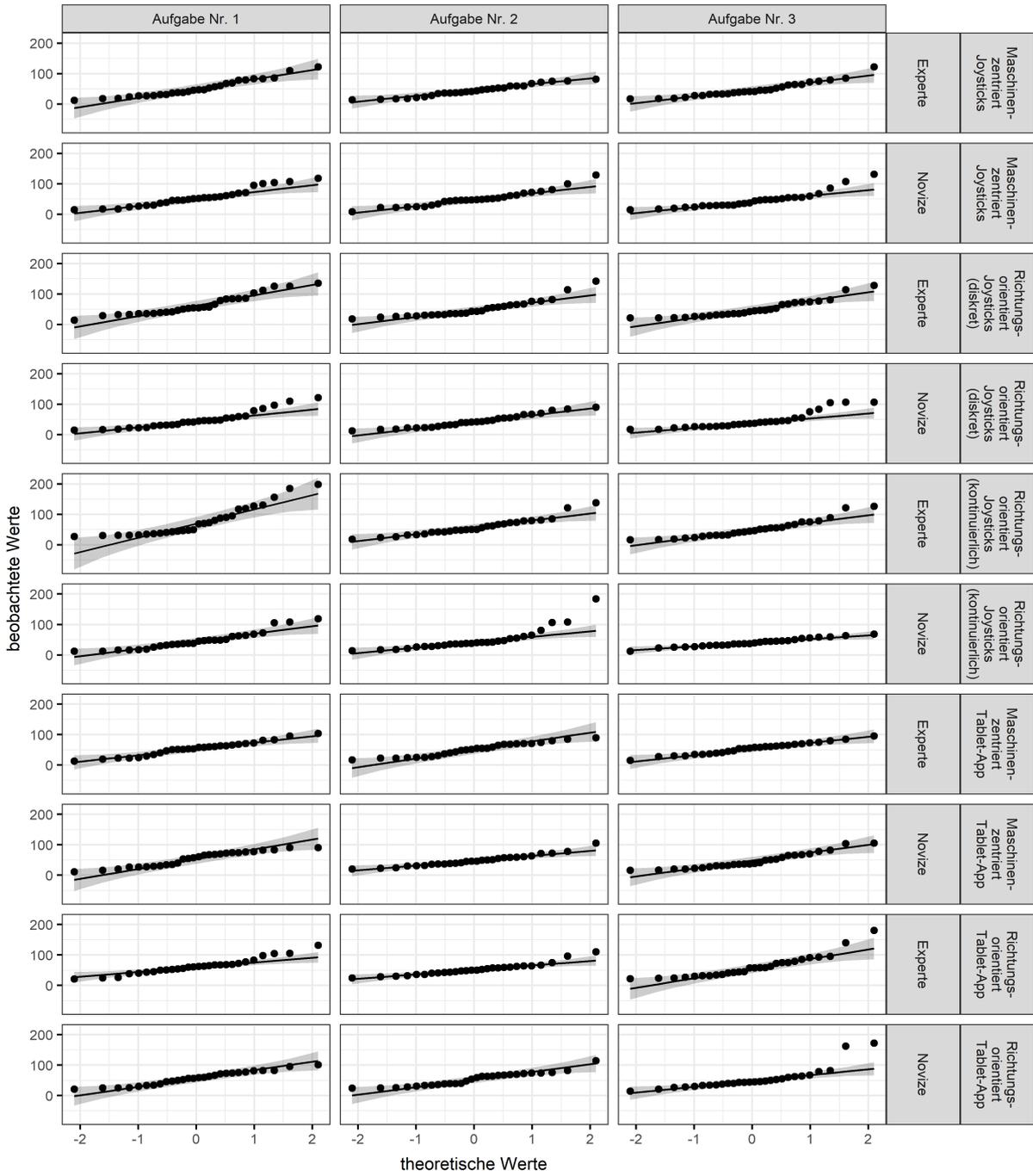


Abbildung C-19: Diagnoseplots für Normalverteilung der Eingangsdaten. Die Voraussetzung ist ausreichend erfüllt.