

J. Fottner · K. Bengler · F. Top · L. Prasch

Entwicklung eines intuitiven Steuerungs- konzepts für Lasthebemaschinen

Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Entwicklung eines intuitiven Steuerungskonzeptes für Lasthebemaschinen

der Forschungsstellen

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München und
Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München.

Das IGF-Vorhaben 19573 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. - BVL
wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Lehrstuhl für Ergonomie

Technische Universität München

Verfasser:

Felix Top, M. Sc.

Lorenz Prasch, M. Sc.

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

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,

Printed in Germany 2020

ISBN: 978-3-948514-04-4

fml – Lehrstuhl für

Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Tel.: + 49.89.289.15921

Fax: + 49.89.289.15922

www.mw.tum.de/fml

Kurzfassung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines intuitiven Steuerungskonzepts für Krane mittels einer tragbaren Fernbedienung: die intuitive Laststeuerung. Der Geräteführer steuert die Maschine in Abhängigkeit seiner eigenen Orientierung. Die Bewegung eines Stellhebels in Richtung der gewünschten Zielposition führt zu einer Lastbewegung in die vorgegebene Richtung bei gleichzeitiger Wirkung mehrerer Antriebe.

Es existiert bisher keine intuitive, funkbasierte Eingabemöglichkeit, die sich generell bei allen Arten von industriellen Lasthebemitteln robust und effizient einsetzen lässt und die gleichzeitig die ergonomischen Nachteile bisheriger Freiheitsgrad-Steuerungen hinsichtlich Kompatibilität, Gebrauchstauglichkeit und Intuitivität behebt. Im Rahmen der ergonomischen Auslegung der intuitiven Laststeuerung wurde in diesem Forschungsvorhaben die Benutzereingabe mit Hilfe von Joysticks als Lösung für die Umsetzung der intuitiven Laststeuerung identifiziert und das Potenzial mit einer Online-Studie erfolgreich evaluiert. Darauf aufbauend wurde die intuitive Laststeuerung technisch umgesetzt und an einem stationären Ladekran am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München in Garching appliziert. Hierfür wurden ein Eingabegerät nach ergonomischen Vorgaben konfiguriert sowie notwendige Sensorikkonzepte zur Messung der Bedienerorientierung (MEMS-Inertialsensoren) und Hakenposition (Drehgeber, Seilzuggeber an den Krangelenken) entwickelt. Ferner wurde eine inverse Kinematik aus dem Bereich der Robotik für den Einsatz am Kran modifiziert, um von der gewünschten Hakenbewegungen auf die notwendigen Gelenkbewegungen umrechnen zu können. Ein passendes Regelungskonzept sichert die exakte Ansteuerung der Gelenke auch bei äußeren Störungen.

Die ergonomische Evaluation der intuitiven Laststeuerung belegt die Potenziale des neuen Konzepts. Hierfür wurde eine Probandenstudie durchgeführt, in der die herkömmliche Steuerung mit der intuitiven Laststeuerung verglichen wurde. Vor allem für Novizen bietet die intuitive Laststeuerung entscheidende Vorteile in der Ablagegenauigkeit und Bedienzeit. In der subjektiven Einschätzung ist sie sowohl für Novizen als auch Experten dem konventionellen Konzept überlegen und wird mit 49:7 für weitere Hebevorgänge gewählt.

Mit der intuitiven Laststeuerung steht somit ein intuitives, industrietaugliches Steuerungskonzept für funkgesteuerte Krane zur Verfügung, das von unterschiedlichen Bedienern – unabhängig von der Vorerfahrung – zur sicheren Steuerung eines Krans verwendet werden kann. Durch die intuitive Laststeuerung wird ein Paradigmenwechsel in der Kransteuerung ermöglicht: Statt wie bisher den Kran zu steuern, steuert der Bediener nun direkt die Last – einfach, schnell und sicher.

Das angestrebte Forschungsziel wurde **erreicht**.

Abstract

The aim of the research project is to develop an intuitive control concept for cranes using a portable remote control: the intuitive load control. The operator controls the machine according to his own orientation. The movement of a control lever in the direction of the desired target position leads to a load movement in the specified direction with simultaneous action of several drives.

So far, there is no intuitive, radio-based control concept that can generally be used robustly and efficiently for all types of industrial lifting equipment and at the same time eliminates the ergonomic disadvantages of previous degree of freedom controls in terms of compatibility, usability and intuitiveness. As part of the ergonomic design of intuitive load control, user input using joysticks was identified as the solution for implementing intuitive load control in this research project and the potential was successfully evaluated in an online study. Based on this, the intuitive load control was technically implemented and applied to a stationary loader crane at the Chair of Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich in Garching (Germany). For this purpose, an input device was configured according to ergonomic specifications and the necessary sensor concepts for measuring operator orientation (MEMS inertial sensors) and hook position (rotary encoder, cable-actuated encoder at the crane joints) were developed. In addition, inverse kinematics from the field of robotics were modified for use on the crane in order to be able to convert from the desired hook movements to the necessary joint movements. A suitable control concept ensures exact control of the joints even in the event of external disturbances.

The ergonomic evaluation of the intuitive load control proves the potential of the new concept. For this purpose, a study was conducted in which the conventional control system was compared with the intuitive load control system. For novices in particular, intuitive load control offers decisive advantages in terms of placement accuracy and operating time. In the subjective assessment, it is superior to the conventional concept for both novices and experts and is selected with 49:7 for further lifting operations.

The intuitive load control thus provides an intuitive, industry-compatible control concept for radio-controlled cranes that can be used by different operators – regardless of previous experience – to safely control a crane. The intuitive load control allows for a paradigm shift in crane control: instead of controlling the crane as before, the operator now controls the load directly - simply, quickly and safely.

The desired research objective was **achieved**.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	1
1.2	Forschungsziel	3
1.3	Lösungsweg zum Erreichen des Forschungsziels	4
2	Stand der Forschung und Entwicklung	7
2.1	Ergonomische Grundprinzipien	7
2.1.1	Mentale Modelle	8
2.1.2	Kompatibilität	9
2.1.3	Gebrauchstauglichkeit	9
2.1.4	Intuitivität	11
2.2	Lasthebemaschinen (Krane)	13
2.2.1	Bauarten und Anwendungsbereich	14
2.2.2	Bedienerkollektiv	15
2.2.3	Sicherheitsaspekte	17
2.3	Mensch-Maschine-Schnittstellen für Krane	18
2.3.1	Gestaltung von bestehenden Kran-Funksteuerungen	19
2.3.2	Laststeuerungen in der Anwendung: Auslegerspitzensteuerungen	22
2.3.3	Laststeuerungen: Konzepte aus der Forschung	27
2.3.4	Mögliche Interaktionsparadigmen	30
2.4	Mensch-Maschine-Schnittstellen aus angrenzenden Fachbereichen	31
2.4.1	Mobile Arbeitsmaschinen	31
2.4.2	Robotik und Werkzeugmaschinen	32
2.4.3	Konsumgüter	33
3	Forschungslücke und Forschungsbedarf	35
3.1	Defizite aktueller Steuerungslösungen	35
3.2	Basisanforderungen an die intuitive Laststeuerung	36
3.3	Forschungslücke	37
3.4	Forschungsfragen	39
3.4.1	Ergonomische Fragestellungen	39
3.4.2	Steuerungstechnische Fragestellungen	39
3.5	Wissenschaftliche Methodik	40
3.5.1	Probandenstudien	40
3.5.2	Vorgehen bei der Entwicklung	41
4	Ergonomische Auslegung der intuitiven Laststeuerung	43

4.1	Entwurf	43
4.1.1	Systemergonomische Analyse	43
4.1.2	Generierung von Bedienkonzeptvarianten	45
4.1.3	Lösungsansatz: intuitive Laststeuerung	49
4.2	Potenzial	50
4.2.1	Expertenbefragung	50
4.2.2	Online-Fragebogenstudie	51
4.2.3	Fazit	62
4.3	Untersuchung des Nutzer-Referenz-Koordinatensystems (NRK)	64
4.3.1	Position des NRK	64
4.3.2	Ausrichtung und Veränderlichkeit des Nutzer-Referenz-Koordinatensystems	70
4.3.3	Fazit	71
5	Technische Umsetzung der intuitiven Laststeuerung	73
5.1	Anforderungsdefinition	73
5.1.1	Anforderungen an die technische Umsetzung der intuitiven Laststeuerung	73
5.1.2	Normative Anforderungen	76
5.2	Demonstratorkran	77
5.2.1	Auswahl des Krans	77
5.2.2	Systemarchitektur und Schnittstellen	79
5.2.3	Umgebung	82
5.3	Gestaltung des Eingabegeräts	82
5.4	Entwurf notwendiger Sensorikkonzepte	87
5.4.1	Messung der Bedienerorientierung	88
5.4.2	Messung der Hakenposition	99
5.5	Entwurf des Steuerungs- und Regelungskonzepts	101
5.5.1	Inverse Kinematik	101
5.5.2	Regelungskonzept	106
5.6	Steuergerät	109
5.7	Demonstrator der intuitiven Laststeuerung	112
5.7.1	Systemarchitektur und Schnittstellen	112
5.7.2	Aufbau des Demonstratorsystems	113
5.7.3	Sicherheitsaspekte	113
5.8	Funktionsnachweis	114
5.8.1	Intuitive Laststeuerung (Gesamtsytem)	114
5.8.2	Validierungsstudie zur Messung der Benutzerorientierung	117
6	Ergonomische Evaluation der intuitiven Laststeuerung	123
6.1	Methodik	124
6.2	Ergebnisse	126

6.2.1	Probandenkollektiv	127
6.2.2	Effektivität	127
6.2.3	Effizienz	130
6.2.4	Zufriedenstellung	132
6.2.5	Mentale Rotation	133
6.2.6	Lerneffekt	133
6.2.7	Zusammenfassung	135
6.2.8	Diskussion	136
7	Ergebnisdiskussion	139
7.1	Anforderungsabgleich	139
7.2	Beantwortung der Forschungsfragen	142
7.2.1	Ergonomische Fragestellungen	143
7.2.2	Steuerungstechnische Fragestellungen	144
7.3	Grenzen der intuitiven Laststeuerung	145
7.3.1	Gestaltung der Benutzereingabe	145
7.3.2	Messung der Benutzerorientierung	145
7.3.3	Evaluationsergebnisse	146
7.3.4	Ironies of Automation	148
7.3.5	Umgebungsüberwachung	149
7.4	Übertragbarkeit des Konzepts	149
7.4.1	Übertragbarkeit auf andere Krantypen	150
7.4.2	Übertragbarkeit auf andere Maschinentypen	150
8	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	153
8.1	Zusammenfassung	153
8.2	Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	157
8.3	Förderhinweis	158
8.4	Ausblick	159
	Verzeichnis der Veröffentlichungen	163
	Verzeichnis der studentischen Arbeiten	165
	Literaturverzeichnis	167
	Abbildungsverzeichnis	179
	Tabellenverzeichnis	185
A	Ergebnisse der Normenrecherche	A-1
A.1	Funksteuerung	A-2
A.1.1	Allgemein	A-2
A.1.2	Sicherheit	A-3

A.1.3	Energieversorgung	A-3
A.2	Stellteile, Stellteilergonomie	A-4
A.2.1	Anordnung	A-4
A.2.2	Kennzeichnung	A-5
A.2.3	Form	A-5
A.2.4	Farben	A-5
A.2.5	Wahrnehmung	A-6
A.2.6	Abmaße	A-6
A.2.7	Anweisung	A-6
A.2.8	Benutzung	A-7
A.2.9	Sicherheit	A-7
A.2.10	Randbedingungen	A-8
A.2.11	Körperhaltung und -bewegung	A-8
A.2.12	Stellteilbetätigung und Betätigungsrichtung	A-8
A.2.13	Bildschirm	A-9
A.3	Sicherheitsvorgaben	A-9
A.3.1	Allgemein	A-9
A.3.2	Informationen	A-10
A.3.3	Start-Stopp-Funktionen	A-11
A.3.4	Tragfähigkeit	A-12
A.3.5	Akustische Warnung	A-12
A.3.6	Elektrische Ausrüstung	A-12
A.3.7	Architektur	A-13
A.3.8	Prüfung	A-14
A.3.9	Elektromagnetische Verträglichkeit	A-14
A.4	Weitere ergonomische Kennwerte	A-14
B	Erklärvideos zur Online-Studie (Wortlaut)	A-16
B.1	Linearhebel	A-16
B.2	Meisterschalter	A-16
C	Kommentare und Hinweise zum Anforderungsabgleich	A-18

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V.
AV	Abhängige Variable
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BVL	Bundesvereinigung Logistik e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOF	Degree of Freedom, dt. Freiheitsgrad
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MARG	Magnetic, angular rate, gravity
MEMS	Micro-electro-mechanical System
NRK	Nutzer-Referenz-Koordinatensystem
PA	Projektbegleitender Ausschuss
TCP	Tool Center Point (Robotik, Werkzeugmaschinen)
TUM	Technische Universität München
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1. Einleitung

Krane sind unverzichtbare Hilfsmittel in zahlreichen industriellen Bereichen, die abhängig vom Anwendungsbereich in unterschiedlichen Bauformen vorkommen. Sie werden überall dort eingesetzt, wo schwere oder sperrige Lasten bewegt werden müssen, die manuell nicht oder nur schwer zu handhaben sind, oder falls die Zugänglichkeit der Last eine manuelle Handhabung unmöglich macht. Bis auf wenige Spezialanwendungen werden alle Krane – unabhängig von ihrem Anwendungsbereich – immer von einem menschlichen Bediener („Kranführer“) kontrolliert, der im Wesentlichen zwei Kernaufgaben hat. Erstens ist er dafür verantwortlich, zu jedem Zeitpunkt den Kran, die Last sowie die Umgebung zu überwachen und durch entsprechende Umsicht und geeignete Vorsichtsmaßnahmen sicherzustellen, dass gefährliche Situationen und Beschädigungen aller Art vermieden werden. Zweitens ist es Aufgabe des Kranführers, die Kranantriebe anzusteuern und somit den Bewegungsverlauf der Last vorzugeben.

Das Bewegen der Last erfolgt üblicherweise durch das direkte Ansteuern einzelner Antriebe wie Drehwerke, Fahrwerke und Hydraulikzylinder über Stellhebel oder Druckknöpfe. Die Gesamtbewegung der Last ergibt sich folglich als Summe der Bewegungen der Einzelantriebe.

Viele Krane besitzen hierzu eine Funksteuerung, die dem Bediener erlaubt, sich relativ zum Kran frei zu bewegen. In diesem Fall spricht man von teleoperierten Kranen. Bedingt durch die Vielzahl von Vorteilen können inzwischen nahezu alle Krane zumindest optional mit Funksteuerungen ausgestattet werden. Dies hat in den vergangenen Jahren zu einem stetig steigenden Marktanteil und damit einhergehend zu einer Heterogenisierung des Bedienerkollektivs geführt. Der Einsatz einer Funksteuerung bei teleoperierten Kranen bleibt somit nicht mehr nur Experten vorbehalten, sondern wird auch für Gelegenheitsbediener möglich.

1.1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Dem Bediener kommt bei der Manipulation von Lasten mit Hilfe eines Krans eine wesentliche Rolle zu. Um eine Last sicher vom Start- zum Zielpunkt zu bewegen, müssen mehrere Aufgaben zeitgleich bewältigt werden.

Neben seinen Sicherheits- und Überwachungsaufgaben ist die Hauptaufgabe des Bediener die korrekte Ansteuerung der einzelnen translatorischen und rotatorischen Freiheits-

grade des Krans, sodass sich die gewünschte Lastbewegung als Summe der Einzelbewegungen ergibt. Die Bestimmung der erforderlichen Betätigungsrichtung der Bedienelemente erfordert vom Bediener eine gedankliche Umrechnung der Wunsch-Lastbewegung auf die einzelnen Freiheitsgrade des Systems, wobei sowohl die Charakteristik des Freiheitsgrads (zugelassene Bewegungen und Geschwindigkeiten) als auch die Bewegungsrichtung korrekt beurteilt werden müssen. Da die Stellteile der Steuerung an das Krankoordinatensystem gekoppelt sind, muss der Benutzer neben der aktuellen Stellung des Krans und der Gerätekinematik bei der Verwendung einer Funksteuerung zusätzlich seine eigene Ausrichtung relativ zum Gerät berücksichtigen, sobald er sich relativ zum Krankoordinatensystem verdreht.

Insbesondere bei der häufig stattfindenden gleichzeitigen Bewegung mehrerer Freiheitsgrade erschwert die damit verbundene kognitive Mehrfachbelastung die Manipulation der Last und ist für den Bediener nicht intuitiv. Ergonomisch gesehen treten Bedienprobleme vor allem deshalb auf, da das Nutzer- und das Maschinenkoordinatensystem nicht übereinstimmen (Verletzung des sog. *Kompatibilitäts-Postulats* von Bubb [Sch-1993, S. 416ff]). Die Folge ist eine Erhöhung des Umrechnungsaufwands auf Bedienerseite, der sich - bedingt durch die erhöhte kognitive Beanspruchung - in verlängerten Eingabezeiten und erhöhter Fehlerzahl widerspiegelt. Die innere Umrechnung ist für jede Lastbewegung und Benutzerposition erneut auszuführen. Ein Gewöhnungseffekt stellt sich aus diesem Grund oft nur sehr langsam und auch nur bei sehr regelmäßiger Bedienung des Krans ein. Selbst wenn Eingabefehler nicht in einer Beschädigung der Systemkomponenten resultieren, kann nachgewiesen werden, dass fehlende Kompatibilität bei teleoperierten Systemen zu verminderter Leistung und einem verminderten Vertrauen bei der Bedienung und somit zu unnötiger Frustration beim Bediener führt [Her-2013].

Während in Großbetrieben meistens ein Kranführer speziell für die Kranbedienung geschult und eingesetzt wird, erledigen diese Aufgabe bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) verschiedene, unterschiedlich qualifizierte Mitarbeiter zusätzlich zu ihrer regulären Tätigkeit (sog. Gelegenheitsbediener). Die geschilderten Herausforderungen bei der Funksteuerung von Kranen resultieren insbesondere bei diesen Gelegenheitsbedienern oft in zeitaufwendigen Folgen von einzelnen Fahrwegen, bis das Ziel erreicht ist. Hieraus resultieren Effekte wie Ermüdung, Zeitverlust durch unnötige Fahrwege und erhöhtes Fehlerpotential mit der Gefahr von Schäden sowie eine erhebliche Frustrationsgefahr. Diese Problemstellung tritt bei allen teleoperierten Kranen unabhängig von der Einsatzumgebung auf und ist ebenfalls Forschungsgegenstand in benachbarten Domänen wie der Tele-Robotik.

1.2. Forschungsziel

Bei den allermeisten Krantypen oder anderen Großgeräten zum Lasthandling, wie Auto-betonpumpen, Schiffsentlader oder Harvester, stellt das externe mobile Bedienhandgerät („Funksteuerung“) weiterhin die praktikabelste Steuerungslösung dar, da der Bediener dem Lastpunkt zu jeder Zeit folgen und seine Position individuell den äußeren Gegebenheiten anpassen kann. Um den nötigen Umrechnungsaufwand zu reduzieren und gleichzeitig die Qualität und Sicherheit der Bedienung zu erhöhen, wird im Rahmen des Forschungsprojekts *Entwicklung eines intuitiven Steuerungskonzepts für Lasthebemaschinen* ein innovatives, zielorientiertes Laststeuerungskonzept für Hebemaschinen mit Hilfe einer Funksteuerung entwickelt¹. Das neue Steuerungskonzept stellt das Krankoordinatensystem in Relation zum Bedienhandgerät bzw. der Orientierung des Menschen, sodass die Kompatibilität der Koordinatensysteme von Nutzer und Maschine gewährleistet ist. Die Vorteile der Funkbedienung werden beibehalten und das Kompatibilitätsproblem wird gelöst.

Ziel ist die Entwicklung eines Steuerungskonzepts, bei dem der Bediener durch die Betätigung eines Bedienelements die gewünschte Bewegungsrichtung der Last aus seiner Perspektive direkt vorgibt und somit die Positionen von Last, Maschine und Bediener automatisch berücksichtigt (siehe Abbildung 1-1).

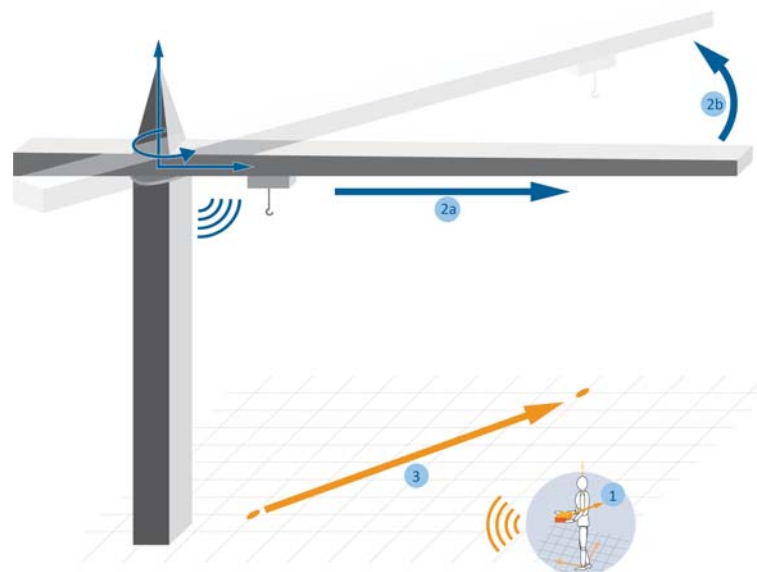


Abbildung 1-1: Lösungsansatz am Beispiel eines Turmdrehkrans

So gibt der Bediener durch die Betätigung eines Bedienelements ① die gewünschte Bewegungsrichtung der Last aus seiner Perspektive vor. Er bewegt den Stellhebel nur von der aktuellen Last- in Richtung der Zielposition. Das System ermittelt durch die integrierte Sensorik die Ausrichtung des Nutzers relativ zur Last sowie die aktuelle Stellung des

¹ Im weiteren Verlauf wird dieses Konzept als *intuitive Laststeuerung* bezeichnet.

teleoperierten Krans und steuert dessen Antriebe ② durch Verwendung einer Rückwärtskinematik so an, dass die Bewegungsrichtung der Last ③ parallel zu der tatsächlich vom Bediener vorgegebenen Auslenkung des Bedienelements ① ist. Die Bewegung eines Stellhebels in Richtung der gewünschten Zielposition führt somit zu einer Lastbewegung in die vorgegebene Richtung bei gleichzeitiger Wirkung mehrerer Antriebe.

Neben der Berücksichtigung grundsätzlicher ergonomischer Prinzipien bei der Gestaltung des Steuerungskonzepts (Kompatibilität, Gebrauchstauglichkeit etc.) sind hierbei eine Vielzahl von technischen Gesichtspunkten zu berücksichtigen, um eine sichere, effiziente und zufriedenstellende Bedienung des Hebemittels zu gewährleisten. Zudem soll gezeigt werden, dass eine neuartige Mensch-Maschine-Schnittstelle für funkbediente Krane die Manipulation von Lasten erheblich vereinfachen und damit Logistikprozesse nachhaltig verbessern kann. Ferner soll die Berücksichtigung aller relevanten ergonomischen Grundsätze bei der Konzeptionierung der intuitiven Laststeuerung dafür sorgen, dass ein Funksteuerungskonzept entsteht, das von möglichst großen Teilen des Bedienerkollektivs als „intuitiv“ empfunden wird².

Die Leitfrage, die im Rahmen des Forschungsprojekts beantwortet werden soll, lautet:

Wie sieht eine Mensch-Maschine-Schnittstelle für funkbediente Lasthebemittel aus, die sowohl die steuerungstechnischen als auch die ergonomischen Anforderungen an eine intuitive, zielorientierte Steuerung erfüllt?

1.3. Lösungsweg zum Erreichen des Forschungsziels

Die Vorgehensweise zur Erreichung des Forschungsziels orientiert sich an den im Antrag festgeschriebenen Arbeitspaketen des Projekts. Das Forschungsprojekt ist in neun Arbeitspakete aufgeteilt. Durch die parallele Projektbearbeitung am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der TUM sowie am Lehrstuhl für Ergonomie (LfE) der TUM überschneiden sich die Arbeitspakete teilweise in ihrer zeitlichen Abfolge. Aus Gründen der besseren Nachvollziehbarkeit wurde daher beim Aufbau des vorliegenden Berichts von der chronologischen Darstellung in Arbeitspaketen abgewichen und stattdessen eine thematische Zuordnung der Projektinhalte zu den jeweiligen Kapiteln im Bericht vorgenommen.

Die Arbeitspakete mit ihrer zeitlichen Abfolge sowie die Zuordnung zu den entsprechenden Kapiteln sind in Abbildung 1-2 dargestellt.

Kapitel 2 bildet den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung ab und ist somit die wissenschaftliche Grundlage für die Entwicklung der intuitiven Laststeuerung. Der dargestellte Stand der Forschung und Entwicklung ist das Ergebnis ausführlicher Expertengespräche

² Die Definition von Intuitivität ist stark kontextabhängig und wird in Abschnitt 2.1 diskutiert.

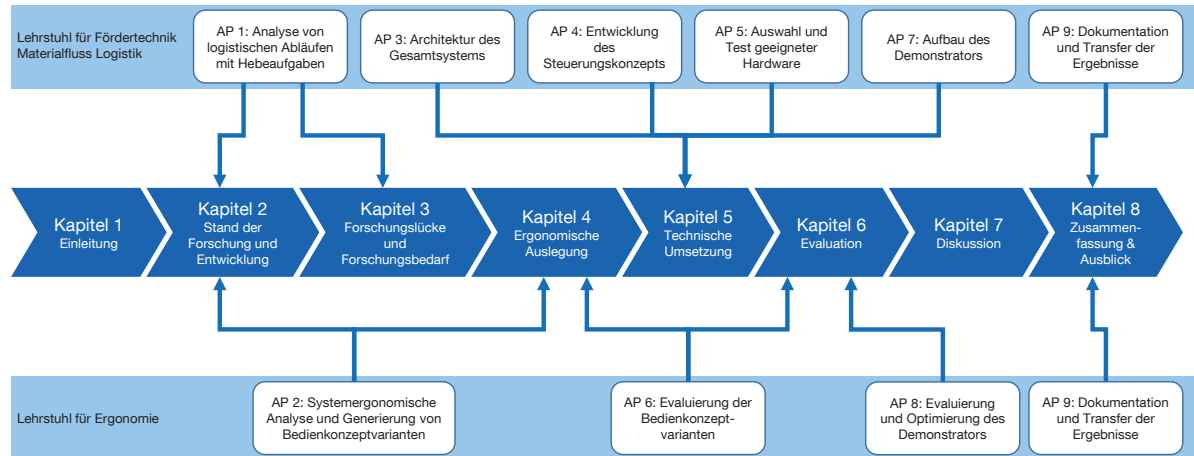


Abbildung 1-2: Zuordnung der Arbeitspakete zu den Kapiteln des Schlussberichts

sowie der Literaturrecherche und -analyse während der gesamten Projektlaufzeit. Zunächst werden in Kapitel 2.1 die relevanten ergonomischen Grundprinzipien für die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen dargestellt. Anschließend folgen in Kapitel 2.2 die wichtigsten Grundbegriffe im Zusammenhang mit Lasthebemaschinen, wie die verschiedenen Typen, Anwendungsgebiete, Hinweise zum Bedienerkollektiv und Sicherheitsaspekte. Ferner werden in Forschung und Industrie vorhandene Steuerungskonzepte für Krane (Kapitel 2.3) sowie Steuerungskonzepte aus anderen Fachbereichen, wie Arbeitsmaschinen, Robotik, Werkzeugmaschinen und Konsumgüter, analysiert (Kapitel 2.4).

In Kapitel 3 werden – basierend auf dem Stand der Forschung und Entwicklung – zunächst die Defizite aktueller Steuerungslösungen im Licht der ergonomischen Grundprinzipien dargestellt (Kapitel 3.1). Aufbauend auf den existierenden Steuerungskonzepten aus den verschiedenen Bereichen von Wissenschaft und Technik können anschließend funktionale Basisanforderungen an die intuitive Laststeuerung und die vorhandene Forschungslücke formuliert werden (Kapitel 3.2 und 3.3). In Kapitel 3.4 werden die hieraus abgeleiteten Forschungsfragen beschrieben und ferner erläutert, wie diese Forschungsfragen im Rahmen des Forschungsprojekts beantwortet werden, um die aus der Forschungslücke resultierenden Problemstellungen zu schließen. In Kapitel 3.5 wird abschließend noch die angewendete wissenschaftliche Methodik im Hinblick auf den Entwicklungsprozess sowie die durchgeführten Probandenstudien geschildert.

Kapitel 4 befasst sich mit der ergonomischen Auslegung der intuitiven Laststeuerung. Ausgehend von einer Analyse des Ist-Zustands bei funkbedienten Lasthebemitteln in Form einer systemergonomischen Analyse werden systematisch alternative Bedienkonzepte generiert, die dann in den Lösungsansatz der intuitiven Laststeuerung münden (Kapitel 4.1). In Kapitel 4.2 wird das Potenzial des Lösungsansatzes mit Hilfe einer Expertenbefragung sowie einer breit angelegten Fragebogenstudie evaluiert. Anschließend folgt eine Untersu-

chung zur Position und Ausrichtung des internen Nutzer-Referenz-Koordinatensystems im Rahmen einer Studie in einer virtuellen Realität (Kapitel 4.3). Am Ende von Kapitel 4 liegt somit das ergonomische Konzept für die intuitive Laststeuerung vor.

Die technische Konzeption sowie die demonstratorische Umsetzung der intuitiven Laststeuerung wird in Kapitel 5 beschrieben. Hierfür werden zunächst die entsprechenden ergonomischen, technischen, ökonomischen und normativen Anforderungen dargestellt (Kapitel 5.1). Anschließend erfolgt die Auswahl eines passenden Demonstratorkrans (Kapitel 5.2) sowie die technische Spezifikation und Gestaltung des Eingabegeräts und notwendiger Sensorikkonzepte (Kapitel 5.3 und 5.4). In Kapitel 5.5 wird ein passendes Steuerungs- und Regelungskonzept entwickelt. Anschließend erfolgt die Auswahl eines Steuergeräts (Kapitel 5.6). Kapitel 5.7 behandelt den Aufbau des Demonstrators der intuitiven Laststeuerung. Abschließend wird in Kapitel 5.8 der Funktionsnachweis des Demonstrators erbracht.

Zur Evaluation der intuitiven Laststeuerung wird in Kapitel 6 eine groß angelegte Probandenstudie mit 56 Probanden in zwei Benutzergruppen (Novizen und Experten) durchgeführt. Es wird untersucht, ob und in welchem Maß die intuitive Laststeuerung zur Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit (Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung) bei funkbedienten Kranen und damit zu einer Erhöhung der Intuitivität führt.

Der vorliegende Bericht schließt mit einer kritischen Reflexion des Konzepts in Kapitel 7, in deren Rahmen der Anforderungsabgleich sowie die Grenzen der intuitiven Laststeuerung sowie mögliche Übertragungspotenziale auf andere Anwendungsfälle dargestellt werden. Eine kurze Zusammenfassung der Forschungsergebnisse sowie ein Ausblick auf weitere notwendige Forschungstätigkeiten in Kapitel 8 runden den Bericht ab.

2. Stand der Forschung und Entwicklung

Dieses Kapitel umfasst die Definitionen und Grundlagen der zentralen Themen des Forschungsvorhabens. Zunächst werden die ergonomischen Grundprinzipien erläutert, deren Erfüllung eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung der intuitiven Laststeuerung bildet. Anschließend werden Lasthebemittel und deren bestehende Mensch-Maschine-Schnittstellen aus Industrie und Forschung vorgestellt. Im letzten Teil des Kapitels werden existierende Mensch-Maschine-Schnittstellen aus angrenzenden Fachbereichen zusammenfassend dargestellt, um einen Überblick über bestehende Interaktionsprinzipien in Industrie und Forschung zu erhalten. Der Fokus bei den dargestellten Mensch-Maschine-Schnittstellen liegt dabei auf Interaktionsprinzipien, die Ergebnis eines nutzerzentrierten Gestaltungsprozesses sind.

2.1. Ergonomische Grundprinzipien

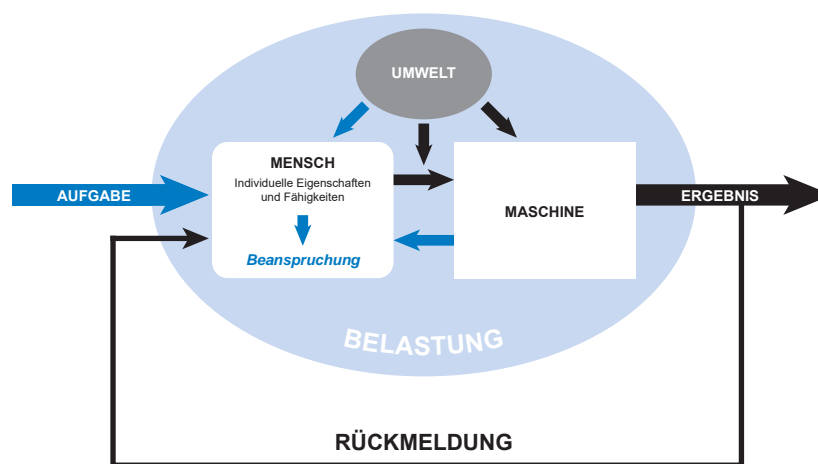


Abbildung 2-1: Der Mensch als Teil des Regelkreises im Belastungs- Beanspruchungskonzept nach [Rüh-1981].

Auf der Grundlage des Mensch-Maschine Modells nach Rühmann & Bubb [Rüh-1981], vgl. 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. Die Informationsverarbeitung des Menschen lässt sich dabei schematisch in drei Stufen veranschaulichen (vgl. hierzu auch [Wic-2000]):

1. Sensorische **Wahrnehmung**
Informationsaufnahme und erste Filterung
2. Kognitive **Verarbeitung**
Denken, Problemlösen, Schlussfolgern, Entscheiden
3. Motorische **Handlung**
Manuelle oder verbale Handlungsausführung

Unter Berücksichtigung dieser drei abstrahierten Stufen setzt eine adäquate und optimierte Interaktionsgestaltung (schnell und fehlerrobust) eine gründliche Berücksichtigung von Informations-, Eingabe- und Feedbackgestaltung voraus.

2.1.1. Mentale Modelle

Da die wirkliche Welt ausgesprochen komplex ist, verlassen sich Menschen im Alltag in der Regel auf vereinfachte *Abbilder* der Realität. Bereits durch die sensorische Wahrnehmung werden die Umgebung und in ihr wahrgenommene Reize massiv gefiltert. Kommt es zur Interaktion mit komplexen Problembereichen wie technischen Systemen, bildet der Mensch auch hiervon eine abstrakte Repräsentation, die das Verständnis dieser Systeme erleichtern und den Umgang mit ihnen im Alltag vereinfachen soll [Joh-1983]. Diese sog. *mentalen Modelle* bezeichnen innere, unvollständige, zeitlich veränderliche und subjektive modellhafte Vorstellungen für technische, physikalische und komplexe Systeme.

Bei der Bedienung eines technischen Systems wie eines Krans erschafft der Benutzer für sich ein Modell, das die Funktionsweise des jeweiligen Systems erklärt. Da auch dieses mentale Modell in der Regel eine Vereinfachung der Wirklichkeit darstellt, unterscheidet es sich häufig wesentlich von den tatsächlichen technischen Gegebenheiten des Systems. Konkret bedeutet dies, dass sich Nutzer häufig nicht bewusst sind, wie ein System tatsächlich funktioniert (sog. „Funktionsmodell“). Ihre Interaktion basiert viel mehr allein auf dem ihnen eigenen mentalen Modell. Je größer der Unterschied zwischen diesen beiden Modellen ist, desto schwerer fällt es dem Nutzer, den Umgang mit dem System zu erlernen und das System routiniert zu nutzen. Hierbei ergibt sich die Aufgabe an die Interaktionsgestaltung, das mentale Modell der Nutzer möglichst detailgetreu in der Mensch-Maschine Schnittstelle abzubilden, sodass Inferenzen vom mentalen Modell auf die Realität einfach möglich werden [Fit-1953]. Dies befähigt den Nutzer auch in unbekanntem Situationen das korrekte Systemverhalten vorherzusagen und entsprechende Eingaben vorzunehmen. Grundsätzlich vereinfacht werden können solche Schlussfolgerungen durch Beachtung der Kompatibilität.

2.1.2. Kompatibilität

Unter Kompatibilität im Sinne der Systemergonomie versteht man, [...] den vom Menschen zu bewältigenden Umcodieraufwand (d. h. inneren Umrechnungsaufwand) zwischen verschiedenen Informationen. [Sch-1993]

Hierbei unterscheidet man zwischen der primären und sekundären Kompatibilität, wobei die primäre Kompatibilität weiter in innere und äußere Kompatibilität unterteilt wird.

- **Primäre Kompatibilität**
Informationen von Wirklichkeit und innerem Modell sind sinnfällig.
 - **Innere Kompatibilität**
Bewegungsrichtungen stimmen mit unseren inneren Modellen überein.
 - **Äußere Kompatibilität**
Bewegungsrichtungen von Stellteilen und Anzeigen stimmen mit der Umwelt, anderen Stellteilen und Anzeigen überein.
- **Sekundäre Kompatibilität**
Bewegungsrichtung und Drehsinn befinden sich nicht im Widerspruch zueinander.

Je größer die Kompatibilität zwischen Stellteilen und Anzeige- bzw. Systemverhalten ist, desto weniger kognitive Energie muss zur inneren Umrechnung seitens des Nutzers verwendet werden. Eine beispielhafte Darstellung räumlich kompatibler und inkompatibler Anordnung ist Abbildung 2-2 zu entnehmen. Erhöhte Kompatibilität führt in der Regel zu leichterem Systemverständnis, sowie effektiver, effizienter und zufriedenstellender Interaktion.

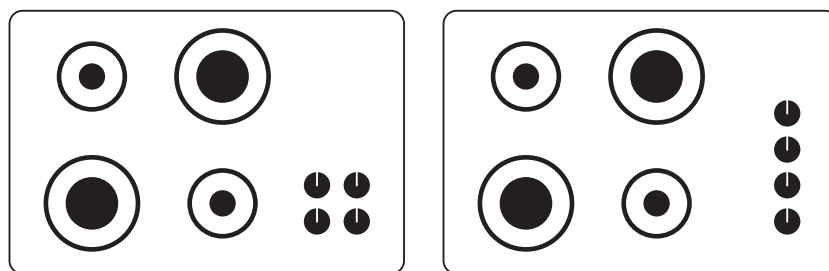


Abbildung 2-2: Exemplarische Darstellung räumlicher Kompatibilität. Links ist eine kompatible, rechts eine inkompatible Anordnung von Anzeigen und Bedienelementen zu sehen.

2.1.3. Gebrauchstauglichkeit

Bei erreichter Kompatibilität von innerem (mentalem) und Maschinenmodell spricht man von guter Usability oder Gebrauchstauglichkeit. Diese bezeichnet ein mehrdimensionales Konstrukt der Interaktion des Nutzers mit einem Produkt in einem bestimmten Kontext. Die

DIN EN ISO 9241 definiert Gebrauchstauglichkeit als „Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“. [Deu-2016a] Abhängig von dem System/Produkt bzw. der Dienstleistung, die genutzt wird, kann die Gebrauchstauglichkeit für **bestimmte Benutzer** in einem **bestimmten Kontext**, also in drei Dimensionen, erfasst werden. Nur im Zusammenspiel von Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung kann von guter Gebrauchstauglichkeit gesprochen werden (vgl. Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit

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

Zur Erreichung dieser Ziele existieren – neben Vorgehensempfehlungen wie z. B. die menschenzentrierte Gestaltung – grundsätzliche Empfehlungen zur Gestaltung von Mensch-Maschine Schnittstellen. Die DIN EN ISO 9241 nennt sieben Grundsätze für die Gestaltung und Bewertung eines Dialogs (siehe Tabelle 2-2). Im besonderen gilt für die menschenzentrierte Gestaltung das Ziel, interaktive Systeme gebrauchstauglicher zu machen, indem sie sich auf die Verwendung des Systems konzentriert [Deu-2011a]. Hierbei gilt grundsätzlich:

- Die Gestaltung beruht auf einem umfassenden Verständnis der Benutzer, der Arbeitsaufgaben und Arbeitsumgebungen.
- Die Benutzer sind während der Gestaltung und Entwicklung einbezogen.
- Das Verfeinern und Anpassen von Gestaltungslösungen wird fortlaufend auf der Basis benutzerzentrierter Evaluierung vorangetrieben.
- Der Prozess ist iterativ.
- Bei der Gestaltung wird die gesamte User Experience berücksichtigt.
- Im Gestaltungsteam sind fachübergreifende Kenntnisse und Perspektiven vertreten.

Zusammenfassend sollen also die drei Dimensionen Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung über tiefgreifende Analyse und Verständnis der Nutzer durch ein interdisziplinäres Team unter Einbezug der Nutzer optimiert werden. Häufig bewegt man sich hierbei iterativ durch die Phasen Analyse, Gestaltung, Implementierung und Evaluation zum gewünschten Endergebnis.

Der Grad der Zielerreichung wird für jede der drei Dimensionen separat erfasst. Man unterscheidet grundsätzlich drei Arten der Erhebung: Beurteilung (z. B. Expertenbewertung

Tabelle 2-2: Die sieben Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110 [Deu-2006].

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, anstatt 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, an welcher Stelle im Dialog er sich befindet, welche Handlungen unternommen werden können und wie diese ausgeführt werden können.
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.

oder analytische Ansätze wie Checklisten ähnlich den Grundsätzen der Dialoggestaltung in Tabelle 2-2), Beobachtung (physiologische oder physikalische Messungen) und Befragung (z. B. mittels Fragebögen). Abhängig von der Art der Erhebung wird zwischen objektiven und subjektiven Maßen differenziert. Eine schematische Zuordnung typischer Arten der Erhebung für die drei Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit findet sich in Abbildung 2-3.

2.1.4. Intuitivität

Intuitivität bzw. intuitive Bedienbarkeit technischer Systeme ist ein vielgenanntes und oft beworbenes Schlagwort. Grundsätzlich jedoch herrscht nach wie vor Uneinigkeit darüber, was Intuitivität genau beinhaltet. In ihrem Aufsatz von 2006 liefern Mohs und Kollegen folgende Definition:

„Ein technisches System ist intuitiv benutzbar, wenn es durch nicht-bewusste Anwendung von Vorwissen durch den Benutzer zu effektiver Interaktion führt.“
[Moh-2006]

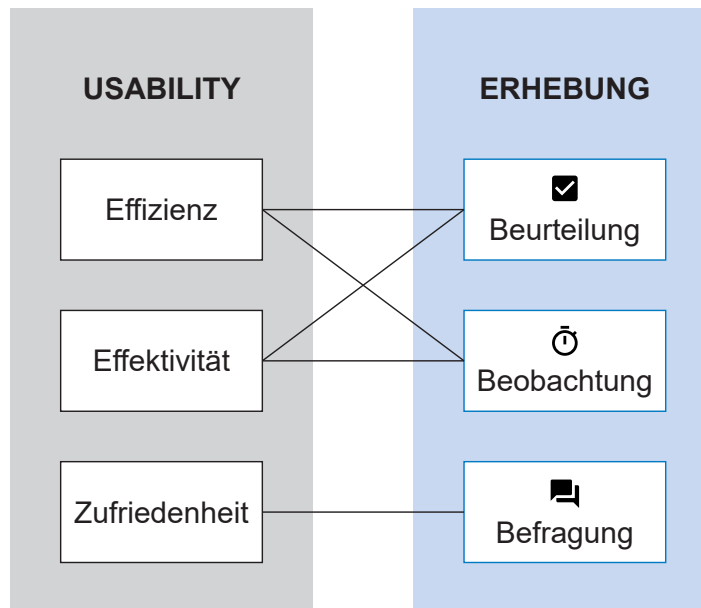


Abbildung 2-3: Zuordnung der Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit (links) zu typischen Arten der Erhebung (rechts).

Der entscheidende Punkt hierbei ist die nicht-bewusste Anwendung des Vorwissens, durch die ein System intuitiv bedienbar wird. Generell kann bei jeglicher Form von Interaktion zwischen Mensch und Maschine zwischen dem sog. Sachproblem und dem Interaktionsproblem unterschieden werden. Das Sachproblem beschreibt dabei die zu erledigende Aufgabe, das Interaktionsproblem den Weg, auf dem diese Aufgabe vom menschlichen Operator unter Zuhilfenahme der Maschine erledigt wird. Im Lasthebekontext wäre das Sachproblem also die Verlagerung einer Last von Punkt A nach Punkt B. Das Interaktionsproblem wären die Art der Steuerung und die genauen Steuerbefehle, die der Mensch zur Erreichung des Ziels durchführen muss. Je nach Komplexität dieser Steuerbefehle und Geübtheit des Bedieners, werden hierbei verschiedene Ebenen menschlichen Verhaltens angesprochen (vgl. Abbildung 2-4).

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 der damit benötigten kognitiven Ressourcen aufsteigend als fertigkeitbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten bezeichnet [Ras-1983]. Umso 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.

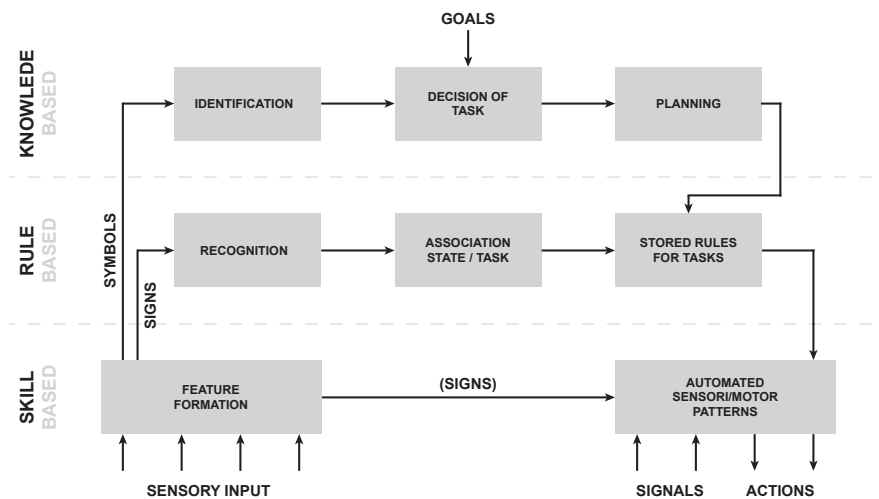


Abbildung 2-4: Die Verhaltensstufen (fertigkeit-, regel- und wissensbasiert) eines erfahrenen menschlichen Bedieners nach Rasmussen [Ras-1983]

Wird also ein bestimmtes Problem häufig genug gelöst, kann es von der wissensbasierten auf die regelbasierte oder sogar die fertigkeitbasierte Verhaltensstufe herabgestuft werden. Der Mensch wird also mit der Zeit besser und schneller in seiner Reaktionsauswahl auf bekannte Reize. Wird nun das Interaktionsproblem durch Übung auf den Verhaltensstufen herabgestuft, tritt es (bei sehr erfahrenen Bedienern) in den Hintergrund. Entsprechend sind diese Bediener in der Lage, mehr kognitive Ressourcen auf die Lösung des Sachproblems zu verwenden. In diesem Falle lässt sich also von einer intuitiven Interaktion sprechen, da die Anwendung des Vorwissens zur Bedienung nicht mehr bewusst stattfindet [Moh-2006].

Aus diesem Grund ist Intuitivität in gewissem Maße gleichzusetzen mit Lernförderlichkeit, also der Eigenschaft eines Systems für Nutzer schnell erlernbar und leicht verinnerlichtbar zu sein. Lernförderlichkeit begünstigt demnach die Herabstufung auf den Verhaltensstufen und so eine Konzentration auf die Lösung des Sachproblems. Das technische System wird so zum unbewussten Werkzeug. Im Kontext der intuitiven Laststeuerung bedeutet dies, dass Nutzer keinen Kran mehr operieren, sondern direkt eine Last bewegen.

2.2. 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. Es existieren unzählige verschiedene Lasthebemittel für den innerbetrieblichen und interbetrieblichen Transport. Im Kontext der intuitiven Laststeuerung 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.“ [Deu-1973] Krane gehören somit zu den Fördermitteln für Stückgut mit intermittierender Förderung.

Grundsätzlich hat Logistik immer das Ziel, die richtige Menge der benötigten Objekte in der richtigen Zusammensetzung zur rechten Zeit am richtigen Ort effizient bereitzustellen [Gud-2012, S. 1]. 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

In allen 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 Privatsektor) sowie in der Forstwirtschaft. In allen Bereichen ermöglichen Krane den Umschlag großer Gütermengen nahezu beliebigen Gewichts. Sie somit wesentliche Ermöglicher für das Transport- und Produktionsumfeld des 21. Jahrhunderts.

2.2.1. Bauarten und Anwendungsbereich

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

Einteilung nach der Bauart [Deu-1973]

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

Einteilung nach dem Anwendungsbereich [Deu-1975]

- 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 möglich. Der Einsatz der intuitiven Laststeuerung soll grundsätzlich für alle Krantypen und alle Anwendungsbereiche möglich sein.

Bewegte Freiheitsgrade

Abhängig von der Bauart und dem konkreten Anwendungsfall weisen Krane unterschiedlich viele bewegte Antriebe, d. h. Bewegungsfreiheitsgrade auf. Alle Antriebsbewegungen haben einen direkten Einfluss auf die Position des Hakens, der zur Lastaufnahme dient. Die Haken- bzw. Lastbewegung ergibt sich somit stets als Summe aller Bewegungen der einzelnen Freiheitsgrade. Im Gegensatz zu Lastmanipulatoren aus der Robotik werden dabei nur die Freiheitsgrade angegeben, die einen Einfluss auf die Position der Last im Raum (x, y, z) haben. Die rotatorischen Freiheitsgrade der Hakenposition (α, β, γ) sowie die Summe aus Positions- und Drehfreiheitsgraden (sog. Pose: $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$) ist für Krane in der Regel nicht von Belang. In Tabelle 2-3 ist für einige besonders verbreitete Krantypen und Anwendungsbereiche die typische Anzahl von Bewegungsfreiheitsgraden exemplarisch dargestellt.

Die intuitive Laststeuerung soll an Kranen mit beliebig vielen Bewegungsfreiheitsgraden applizierbar sein.

2.2.2. Bedienerkollektiv

Lasthebemittel verschiedenster Art kommen in den unterschiedlichsten industriellen und privatwirtschaftlichen Bereichen zum Einsatz. Das Bedienerkollektiv, also die Zusammensetzung der Bediener aus verschiedenen Nutzergruppen, ist bei Kranen somit stark vom

Tabelle 2-3: Anzahl der Bewegungsfreiheitsgrade für einige Krantypen und Anwendungsbereiche

Krantyp / Anwendungsbereich	Freiheitsgrade (allgemein)	Freiheitsgrade (Sonderfälle)
Laufkatzen	2	
Auslegerkrane und Drehkrane	1-4	
Brückenkrane	3	2, 4
Portalkrane	3	2, 4
Wandlaufkrane	3	2
Turmdrehkrane	3	4
Fahrzeugkrane	3	4
Kabelkrane	2	3
Lagerkrane	3	4
Baukrane	3	4
LKW-Ladekrane	4-7	3
Containerkrane	3	4

Krantyp und vom Anwendungsfall abhängig. Während in Großbetrieben meistens ein Kranführer speziell für die Kranbedienung geschult und eingesetzt wird, erledigen diese Aufgabe bei 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 mitbringen¹. 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.).

In Gesprächen mit diversen Industriepartnern sowohl aus dem Kranhersteller-, Kranbetreiber und Krananwenderbereich 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 Wirtschaftsleistungen immer mehr Hebeaufgaben durchzuführen sind, und andererseits aufgrund der

¹ Zur Ausbildung von Kranfahrern siehe bspw. [Zim-1995].

sehr positiven Arbeitsmarktsituation mit vielfältigen Berufswahlmöglichkeiten nur wenige Personen neu als Kranführer qualifiziert werden. 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 intuitive Laststeuerung soll also sowohl für Experten als auch für Gelegenheitsbediener und Novizen eine intuitivere Kranbedienung ermöglichen.

2.2.3. Sicherheitsaspekte

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 in [Koo-2011].

Zu den wichtigsten Unfallverhütungsvorschriften gehören:

- DGUV Vorschrift 1: Grundsätze der Prävention [Bun-2013a]
- DGUV Vorschrift 3: Elektrische Anlagen und Betriebsmittel [Bun-1997a]
- VBG 5: Kraftbetriebene Arbeitsmittel [Bun-1993]
- DGUV Vorschrift 52: Krane [Bun-2013b]
- 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 an den Gefahrenstellen erfasst werden.

Die wichtigsten normativen Vorschriften zum Thema Sicherheit und funktionale Sicherheit bei Kranen und 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 [Eur-2006]
- DIN EN ISO 13849-1: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze [Deu-2016d]
- DIN EN 60204-32: Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen – Anforderungen für Hebezeuge [Deu-2009b]
- DIN EN 61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme [Deu-2011b]
- DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung [Deu-2011c]
- DIN EN 13135: Krane – Sicherheit – Konstruktion – Anforderungen an die Ausrüstung [Deu-2013b]
- DIN EN ISO 13850: Sicherheit von Maschinen – Not-Halt-Funktion – Gestaltungsleitsätze [Deu-2016c]
- DIN EN 894-1: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen [Deu-2009c]
- DIN EN 894-3: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 3: Stellteile [Deu-2010b]
- DIN EN 614-1: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze [Deu-2009d]

Weiterführend existiert eine Reihe von Normen, die sich spezifisch mit bestimmten Krantypen beschäftigen und dabei auch Sicherheitsaspekte berücksichtigen, u. a. für Turmdrehkrane [Deu-2010a], Brücken- und Portalkrane [Deu-2014a], Ladekrane [Deu-2013a] sowie Fahrzeugkrane [Deu-2014b].

Im Hinblick auf die intuitive Laststeuerung wurde zur Anforderungsdefinition eine ausführliche Normenrecherche durchgeführt. Die Rechercheergebnisse im Hinblick auf sicherheitsrelevante normative Anforderungen an Kransteuerungen und die intuitive Laststeuerung werden in Kapitel 5.1 dargestellt.

2.3. Mensch-Maschine-Schnittstellen für Krane

In der überwiegenden Zahl der Fälle werden Krane manuell gesteuert. Im Allgemeinen kommen Steuerelemente zum Einsatz, die auf dem Krankoordinatensystem basieren. Die Bewegung eines bestimmten Steuerelements führt zur Bewegung des zugeordneten Freiheitsgrads am Kran. Automatisierte Kransysteme finden sich lediglich in wenigen Anwen-

dungsbereichen 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, Robustheit und Sicherheit bei der Kranbedienung, da der Benutzer gleichzeitig steuernde, regelnde und überwachende Funktionen übernimmt. Um den Bediener optimal in das Mensch-Maschine-System einzubinden, kommt der Mensch-Maschine-Schnittstelle bei Kranen eine wichtige Bedeutung zu.

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 [Deu-2009a]. 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: sog. Mitgängersteuerung) realisiert [Koo-2011, 98 f.][Ver-2016]. Selten kommen auch ultraschallbasierte kabellose Verbindungen zum Einsatz. Im Kontext der intuitiven Laststeuerung sind vor allem kabellose Kran-Funksteuerungen von Interesse.

Funksteuerungen haben gegenüber kabelgebundenen Steuerungen 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.

2.3.1. Gestaltung von bestehenden Kran-Funksteuerungen

Bestehende Kran-Funksteuerungen sind das Ergebnis vieler Jahrzehnte technischer Entwicklung. Über die Jahre haben sich unterschiedlichste wissenschaftliche Vorgaben und Erfahrungswerte aus der Praxis zum aktuellen Stand der Technik hinentwickelt. Der Stand der Technik bildet dabei die Summe aus allen etablierten normativen und nicht-normativen Gestaltungsvorgaben sowie aller vorhandenen, praxisbewährten Steuerungsvarianten.

Gestaltungsvorgaben

Es existieren zahlreiche sowohl normative als auch nicht-normative Vorschriften, Gestaltungsrichtlinien und Erfahrungswerte, die für die Gestaltung von Kran-Funksteuerungen von Belang sind.

Wichtige Richtlinien im Hinblick auf die Gestaltung von Kran-Funsteuerungen sind:

- DIN EN ISO 10075-1: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe [Deu-2018]
- DIN EN ISO 10075-2: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 2: Gestaltungsgrundsätze [Deu-2000]
- DIN EN ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung [Deu-2006]
- DIN EN 614-1: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze [Deu-2009d]
- DIN EN 984-1: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen [Deu-2009c]
- DIN EN 894-3: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 3: Stellteile [Deu-2010b]
- DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen [Deu-2016b]
- DIN EN 13557: Krane – Stellteile und Steuerstände [Deu-2009a]
- ISO 7752-1: Cranes — Control layout and characteristics — Part 1: General principles [Int-2010]
- VDI 4412: Kabellose Steuerung von Kranen [Ver-2016]
- DIN 15025: Krane – Betätigungssinn und Anordnung von Stellteilen in Krankabinen [Deu-1978]
- DIN 61310-3: Sicherheit von Maschinen – Anzeigen, Kennzeichen und Bedienen – Teil 3: Anforderungen an die Anordnung und den Betrieb von Bedienteilen [Deu-2008]
- VDI/VDE 2185-1: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik [Ver-2007]
- VDI/VDE 2185-2: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik – Koexistenzmanagement von Funklösungen [Ver-2009]

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.

Im Hinblick auf die intuitive Laststeuerung wurde zur Anforderungsdefinition eine ausführliche Recherche durchgeführt. Die Rechercheergebnisse im Hinblick auf normative und nicht-normative Anforderungen an die Gestaltung von Kran-Funksteuerungen und die intuitive Laststeuerung werden in Kapitel 5.1 dargestellt.

Bauformen

Aktuelle Kran-Funksteuerungen sind als achsbasierte Steuerungen ausgelegt. Die Zuordnung der einzelnen Stellteil-Freiheitsgrade zu den entsprechenden Kranantrieben erfolgt dabei über Icons, die neben den Stellteilen auf der Funksteuerung angebracht sind. Die Icons sind in aller Regel einheitlich für jeden Krantyp vorgegeben (siehe z. B. [Deu-2013a] für Ladekrane). Der Hauptunterschied bei bestehenden Kran-Funksteuerungen aus Sicht des Bedieners liegt in der Gestaltung des Senders und der Stellteile. Während bei allen Funksteuerungen Taster, Stellräder oder (selten) berührungsempfindliche Bildschirme als Funktionstasten zum Einsatz kommen, unterscheiden sich die Stellteile zur Bewegung der Kran-Freiheitsgrade je nach Hersteller und Krantyp. Die am häufigsten verwendeten Stellteile zur Kranbewegung sind in Tabelle 2-4 aufgeführt und in Abbildung 2-5 beispielhaft dargestellt.

Tabelle 2-4: Stellteile zur Kranbewegung

Stellteil	Freiheitsgrade
Linearhebel	1
Joystick (Meisterschalter)	2 oder 3
Taster	0,5

Ein Linearhebel lässt sich lediglich nach vorne und hinten kippen, während ein Joystick² mit zwei Freiheitsgraden gleichzeitig nach vorne/hinten und links/rechts bewegt werden kann. Ein Joystick mit drei Funktionen hat zusätzlich zu den beiden Freiheitsgraden des 2-Funktionen-Joysticks einen Drehfreiheitsgrad an der Joystickspitze. Drucktaster besitzen lediglich einen halben Freiheitsgrad, da für die Bewegung eines Kran-Antriebs in Vor- und Rückwärtsrichtung zwei separate Taster notwendig sind.

Eine Ausnahme in der herkömmlichen achsbasierten Bedienung bildet die Funksteuerung HBC-pilot der Firma HBC-radiomatic [HBC-2019a]. Der HBC-pilot (siehe Abbildung 2-6) besitzt zusätzlich zu zwei Tasterpaaren zur Bewegungssteuerung noch zwei Kipp-Freiheitsgrade. 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 Achsen durch Betätigung eines einzelnen Stellteils ist nicht möglich.

² Häufig werden Joysticks auch als Meisterschalter bezeichnet.



Abbildung 2-5: Bauformen unterschiedlicher Funksteuerungen: Linearhebel (links), Joysticks mit zwei Funktionen (mitte), Drucktaster (rechts) [HBC-2019b]



Abbildung 2-6: HBC-pilot zur Einhandsteuerung von Kranen und Maschinen [HBC-2019a]

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

Im Rahmen der intuitiven Laststeuerung soll nicht nur der Sender zur Eingabe des Bewegungswunsches betrachtet werden, sondern es werden alle in den Prozess *Kran-Funksteuerung* eingebundenen Komponenten inklusive des Bedieners mit einbezogen. Abbildung 2-7 zeigt zu diesem Zweck den prinzipiellen Aufbau einer kabellosen Steuerung nach VDI-Richtlinie 4412 [Ver-2016]. Der Aufbau beinhaltet ein Steuergerät, ein Empfangsgerät und den zu steuernden Kran. Neben der Gestaltung des Steuergeräts zur Eingabe des Bewegungswunsches durch einen Kranbediener mit Hilfe entsprechender Stellteile sollen auch notwendige Methoden zur Signalverarbeitung am Empfangsgerät und eine dazu passende Ansteuerung der Kranbewegung entwickelt werden.

2.3.2. Laststeuerungen in der Anwendung: Auslegerspitzensteuerungen

In den vergangenen Jahren gab es in Forschung und Industrie vielfältige Bemühungen, Kranbedienung einfacher, schneller und sicherer zu machen. Ein Hauptfokus war – neben der Entwicklung von unzähligen Ansätzen zur Lastpendeldämpfung – die Umsetzung von

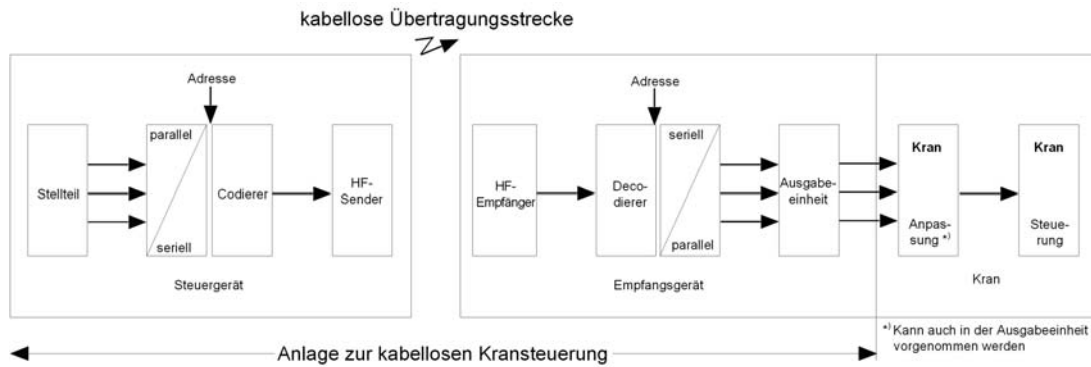


Abbildung 2-7: Blockschema einer Funksteuerung [Ver-2016]

sog. Auslegerspitzen- bzw. Hakensteuerungen (engl. *tip control*) zur Erhöhung der Intuitivität. Statt der konventionellen Kransteuerung über die Bewegung einzelner Freiheitsgrade, die in Summe die gewünschte Haken- bzw. Lastbewegung ergeben, wird bei einer Auslegerspitzensteuerung direkt die Bewegung des Lastaufnahmemittels vorgegeben. Das Lastaufnahmemittel ist bei Kranen in der Regel der Haken, der – je nach Krantyp – entweder an der Auslegerspitze oder am Hubwindenseil angebracht ist. Über unterschiedliche Eingabemodalitäten wird hierfür der Bewegungswunsch (Richtung und Geschwindigkeit) vom Kranbediener erfasst und an die Maschinensteuerung übertragen. Eine sog. Rückwärtskinematik³ berechnet algorithmisch dann innerhalb der Maschinensteuerung mögliche Bewegungsrichtungen und -geschwindigkeiten der Einzelantriebe, die in Summe die gewünschte Hakenbewegung ergeben. Die Maschinensteuerung steuert sodann alle notwendigen Freiheitsgrade simultan an, sodass dies in der vom Benutzer vorgegebenen Bewegung des Hakens resultiert.

Die Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung ist grundsätzlich gleichermaßen bei einem festen Bedienerplatz (Kabine) wie bei einem bewegtem Bediener (Funksteuerung) möglich. Sowohl industriell umgesetzte Konzepte als auch Ansätze aus der Forschung zeigen dabei aus Bedienerseite ein erhebliches Verbesserungspotenzial bei der Kranbedienung gegenüber der herkömmlichen Freiheitsgradsteuerung auf, da die durch Kompatibilitätsprobleme und die Einzelansteuerung der Antriebe bei der herkömmlichen Freiheitsgradsteuerung auftretenden Umrechnungsaufgaben auf Bedienerseite durch eine Auslegerspitzensteuerung reduziert werden. Insbesondere die Untersuchungen von Peng et al. [Pen-2009a][Pen-2009b][Pen-2009c][Pen-2012][Pen-2013], Campeau-Lecours et al. [Cam-2016], Chakraborty et al. [Cha-2016], Fodor et al. [Fod-2016] und Prorok [Pro-2003] belegen ein Verbesserungspotenzial durch die Verwendung einer Auslegerspitzensteuerung qualitativ und quantitativ.

³ In der Robotik wird häufig auch von einer inversen Kinematik gesprochen.

Konzepte aus der industriellen Anwendung

Auslegerspitzensteuerungen finden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstufen auf dem Hebemittelmarkt. Dieser Abschnitt soll – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einen Überblick über wichtige Produkte und Konzepte im Bereich der Auslegerspitzensteuerungen geben.

Marktanalyse

Bei der Marktanalyse im Hinblick auf Auslegerspitzensteuerungen wird deutlich, dass sich die Entwicklungstätigkeiten vor allem im Bereich Forstgeräte, Ladekrane und hierzu verwandter Geräte (Auslegerkrane, Autobetonpumpen) fokussieren. Beispielhaft zu nennen sind:

- John Deere: Intelligent Boom Control
Steuerung der Auslegerspitze von Rückezügen in Polarkoordinaten von einem festen Platz in der Kabine (mit dem Ausleger mitdrehendes Koordinatensystem) [Joh-2013]
- HIAB: Crane Tip Control
Steuerung der Auslegerspitze von Ladekranen in kartesischen Koordinaten mit Hilfe einer Funksteuerung (festes maschinengebundenes Koordinatensystem) [HIA-2018]
- Epsilon Kran: Smart Control
Steuerung der Auslegerspitze von Rückezügen und Holztransportern in Polarkoordinaten per Funksteuerung oder von einem Hochsitz am Kranturm (mit dem Ausleger mitdrehendes Koordinatensystem) [Eps-2018]
- Palfinger: Smart Boom Control
Steuerung der Auslegerspitze von Ladekranen in Polarkoordinaten mit Hilfe einer Funksteuerung (mit dem Ausleger mitdrehendes Koordinatensystem) [Pal-2019]
- Technion: Tip Control
Steuerung der Auslegerspitze von Forstgeräten und anderen geländegängigen Hebemitteln per Funksteuerung oder aus einer Kabine (festes maschinengebundenes Koordinatensystem) [Tec-2019a]
- Lehnert Regelungstechnik: Lennix Pro
Steuerung von Auslegerkranen (Hafenumschlag) in kartesischen oder polaren Koordinaten von einem festen Platz in der Kabine (festes maschinengebundenes Koordinatensystem) [Leh-2019]

Bei der Betrachtung der Einsatzfälle 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 Freiheitsgraden (Ladekrane).

Die meisten 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 führt. Für diese Aussagen werden von den Herstellern allerdings keine nachvollziehbaren Belege geliefert.

Alle Konzepte haben gemeinsam, dass sich die Bedienelemente und damit die Steuerungseingaben stets auf das Krankoordinatensystem beziehen. Stimmt die Orientierung des Benutzerkoordinatensystems nicht mit dem Krankoordinatensystem überein, muss dies vom Bediener durch eine innere Umrechnung berücksichtigt werden. Es wird deutlich, dass kein Konzept existiert, das die Vorteile einer Funksteuerung hinsichtlich der Bedienerbeweglichkeit mit einem adaptiven, mitdrehenden Koordinatensystem verbindet, sodass der Bediener die Hakenbewegung direkt aus seiner Perspektive steuern kann. Bei allen vorgestellten Konzepten muss sich der Bediener entweder an einem festen Fahrerplatz befinden, der sich mit dem Ausleger mitdrehen kann (Kabine/Hochsitz), oder er muss zwischen seinem beweglichen Benutzerkoordinatensystem, d. h. dem Koordinatensystem der Funksteuerung, und dem festen Maschinenkoordinatensystem umrechnen, da die Bewegung des Benutzers zu einer Verdrehung des Benutzerkoordinatensystems gegenüber dem Maschinenkoordinatensystems führt. Die Intuitivität ist aus diesen Gründen eingeschränkt.

Es lässt sich festhalten, dass bei allen vorgestellten Industrieanwendungen lediglich die Ansteuerung der Hakenbewegung verändert worden ist. Die Gestalt und Anordnung der Bedienelemente, also des Mediums zur Aufnahme des Benutzerwunsches, orientiert sich in allen Fällen sehr stark an etablierten Steuerungslösungen in Form von Meisterschaltern, Linearhebeln oder Drucktastern, die in einer Kabine um den Fahrersitz herum oder außerhalb der Kabine auf einer Funksteuerung angeordnet sind.

Patentrecherche

In den Bereichen Auslegerspitzensteuerung sowie intuitive Kransteuerungs-Konzepte mit und ohne Funk existiert eine Reihe von nationalen und internationalen Patenten. Einige Patente, die im Kontext der intuitiven Laststeuerung zu finden sind, werden in Tabelle 2-5 exemplarisch aufgeführt. Es wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass die aufgeführten Patente keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Die Anzahl und Art dieser Patente lassen entsprechende Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten bei den beteiligten Industrieunternehmen vermuten und verdeutlichen die Relevanz des Themas.

Tabelle 2-5: Ausgewählte Patente im Kontext der intuitiven Laststeuerung (nach Veröffentlichungsdatum)

Patentnummer	Patenttitel	Datum	Anmelder	Erfinder
DE 10132243A1	Kabelloses Interaktionssystem für Anwendungen der virtuellen Realität	23.01.2003	Fraunhofer Gesellschaft (DE)	Ulrich Häfner, Andreas Rösler
DE 10207880C1	Steuereinrichtung zum Steuern eines Hebezeugs	31.07.2003	DEMAG Cranes & Components GmbH (DE)	Thomas Kohlenberg
DE 10240180A1	Vorrichtung zur Betätigung eines Knickmasts	11.03.2004	Putzmeister AG (DE)	Hartmus Benckert, Kurt Rau
US 2009152226A1	Lifting apparatus with compensation means	18.06.2009	Gorbel Inc. (US)	James Alday
DE 102007024157A1	Bedieneinrichtung zur Bedienung einer Werkzeugmaschine	02.07.2009	Siemens AG (DE)	Andreas Grözinger
CN 101718861	Device and method for detecting position of concrete pump truck and concrete pump truck	02.06.2010	Sany Heavy Ind. Co. Ltd. (CN)	Antao Chen, Jirui Zhou, Qiulian Deng, Xiang Zhou
DE 112009001162T5	Verfahrkranbetriebssteuervorrichtung und Verfahren	07.04.2011	Kito KK (JP)	Fukusawa Michio, Hashimoto Tsutomu et al.
CN 102561700	Mechanical arm control system, method and engineering machinery	11.07.2012	Sany Heavy Ind. Co. Ltd. (CN)	Deng Kann, Chen Antao, Xiang Yao
US 2015030424A1	Intelligent boom control hydraulic system	29.01.2015	Deere & Co. (US)	Calin Raszga, Henry Stulen
EP 2950631A1	Method and system for controlling the crane of a working machine by using boom tip control	09.12.2015	John Deere Forestry Oy (FI)	Mikko Palmroth, Simo Laitinen, Vesa Siltanen, Timo Käppi
DE 102016106406A1	Kartesische Steuerung einer Mastspitze eines Großmanipulators	12.10.2017	Schwing GmbH (DE)	Johannes Henikl, Rainer Vierkkotten

2.3.3. Laststeuerungen: Konzepte aus der Forschung

Neben den genannten industriellen Anwendungsbeispielen existieren einige Ansätze in der Forschung, die das Ziel haben, Kranbedienung einfacher und intuitiver zu machen und so eine geringere Bedienerbelastung, kürzere Umschlagzeiten und geringere Fehlerzahlen zu realisieren. Die im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Auslegerspitzensteuerungen bilden hierfür eine wesentliche Grundlage. Bak et al. [Bak-2011], Chakraborty et al. [Cha-2016], Krus et al. [Kru-1992], Pedersen et al. [Ped-2010] sowie Prorok et al. [Pro-2003] beschreiben verschiedene modellbasierte Ansätze, Auslegerspitzensteuerung von hydraulischen Hebemitteln (Ladekrane, Rückzüge etc.) regelungstechnisch robust umzusetzen. Löfgren [Löf-2009] zeigt – zusätzlich zur Entwicklung entsprechender Steuerungs- und Regelungsalgorithmen – auf, dass Auslegerspitzensteuerungen speziell bei Forstmaschinen zu kürzeren Einlernzeiten und geringerer mentaler Belastung des Bedieners führen. Manner et al. [Man-2017] bestätigt die vielversprechenden Potenziale von Auslegerspitzensteuerungen bei hydraulischen Kranen für den Forstbetrieb in einer Studie mit Novizen: Zykluszeiten und Fehlerzahlen sind mit Auslegerspitzensteuerungen signifikant geringer als mit herkömmlichen Freiheitsgradsteuerungen. Sowohl bei Löfgren als auch bei Manner et al. erfolgt die Steuerung des Hebemittels von einem festen Platz in der Kabine aus.

Während das Konzept der Auslegerspitzensteuerung lediglich die Ausgabeseite bei der Kranbedienung, also die Ansteuerung und Bewegung des Hakens, behandelt, existieren ferner zahlreiche Ansätze, die Eingabeseite, also die Aufnahme des Benutzerwunsches, zu optimieren. Die Kombination einer möglichst bedienergerechten Eingabe mit einer maschinengerechten Ausgabe führt letztendlich zum Gesamtpaket einer gegenüber herkömmlichen Kransteuerungen verbesserten Last- bzw. Hakensteuerung.

Peng et al. zeigen in verschiedenen Arbeiten Potenziale alternativer Eingabemöglichkeiten zur Hakensteuerung auf. Beim sog. Magic Wand [Pen-2009b] befindet sich oberhalb des Hakens an einem Brückenkran eine Kamera. Mit Hilfe entsprechender Bildverarbeitung kann das System einen reflektierenden Marker, der sich am Ende eines Stabs befindet, lokalisieren und mit der Hakenbewegung der Markerbewegung folgen. Bewegt sich der Kranbediener mit dem Stab, folgt der Haken seiner Bewegung. Ein anderer Ansatz, der auch auf Bewegungsverfolgung basiert, wird in [Pen-2009c] bzw. [Pen-2012] vorgestellt: Statt einem Marker auf einem Stab folgt der Haken einem aktiven RFID-Tag, der entweder vom Bediener in der Hand gehalten wird, oder der als Teil eines Handschuhs direkt vom Bediener getragen wird. Hierzu sind der Kran und seine Umgebung mit einigen RFID-Empfängern ausgestattet. Durch eine Laufzeitmessung kann die Position des Tags und damit das Ziel des Hakens über Triangulation ermittelt werden. Probandenstudien zur Evaluation der Hakensteuerung mit Hilfe eines RFID-Tags finden sich in [Pen-2013].

Die genannten Arbeiten von Peng et al. 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 von Hebemitteln 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 Umrechnung zwischen Bediener- und Maschinenkoordinatensystem die Fehlerzahl erheblich, da die Wahrscheinlichkeit von Fehlbedienungen durch verbesserte Kompatibilität zwischen Benutzer und Maschine sinkt. Die Steuerung der Hakenbewegung durch optisches oder elektromagnetisches Tracking ist jedoch nicht in allen Anwendungsfällen problemlos möglich: Kamerabasiertes Tracking reagiert gegebenenfalls relativ empfindlich auf stark veränderte Lichtverhältnisse oder große Reichweiten, während RFID-Tracking räumlich verteilte RFID-Empfänger und somit entsprechende Infrastruktur in der Umgebung des zu steuernden Krans benötigt.

Weiterführend existieren mit den Arbeiten von Kivila [Kiv-2013a] bzw. Kivila et al. [Kiv-2013b][Kiv-2014] sowie Sorensen et al. [Sor-2007] und Suter et al. [Sut-2007] Untersuchungen zur Steuerung von Hakenbewegungen mit Hilfe von berührungsempfindlichen Eingabegeräten (Touch-Bildschirme). 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, und so der Aufwand bei der Kranbedienung steigt, 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, ergeben sich signifikante Verbesserungspotenziale zu bestehenden Kransteuerungen.

Kivila untersucht zudem die Potenziale von mit dem Benutzer mitdrehenden Steuerungs-Koordinatensystemen, die dem Bediener eine Steuerung des Hakens direkt aus seiner Perspektive ermöglichen. Hierfür nutzt er eine RFID-basierte Nutzerlokalisierung, um die Relativposition vom Bediener zum Haken zu bestimmen. 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 grundsätzlich aus anderen Bereichen bekannte Zusammenhänge zwischen Kompatibilität, Benutzerorientierung und Gebrauchstauglichkeit (siehe z. B. bei Fitts et al. [Fit-1953] und Worryingham et al. [Wor-1989]) speziell im Kontext der Kranbedienung.

Campeau-Lecours et al. [Cam-2016], Kazerooni et al. [Kaz-2004] sowie Colgate et al. [Col-2003] 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 aufgebrachten 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 Manipulation⁴ 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.

Einen ganz anderen Ansatz verfolgen Frigola et al. [Fri-2003]. 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 Systeme bieten ein großes Potenzial, jedoch ist Ihre Anwendung bei Hebemitteln im Außenbereich aufgrund stark wechselnder Lichtverhältnisse, begrenzter Reichweiten und einer hohen Verschmutzungsgefahr gründlich abzuwägen.

Noch über die Anwendung von formalisierten Gesten hinaus gehen Majewski et al. [Maj-2017], 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 die vorgestellten modernen Verarbeitungsalgorithmen an ihre Grenzen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Verbesserung herkömmlicher Freiheitsgrad-Steuerungen für Hebemittel Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben war und ist. Die untersuchten Ansätze streuen dabei thematisch sehr breit. Im Gegensatz zu den industriellen Anwendungsbeispielen werden in der Forschung jedoch nicht nur hauptsächlich die Hakenbewegung und die Ansteuerung in Form einer Auslegerspitzensteuerung betrachtet, sondern in besonderer Weise die Art sowie die Gestaltung der Benutzereingabe. Hierbei werden auch Interaktionsparadigmen untersucht, die zur Eingabe des Benutzerwunsches über die herkömmlichen Eingabemittel, also über die bekannten koordinatengebenden Eingabemittel Linearhebel, Joystick und Taster, hinaus gehen.

⁴ In der Robotik spricht man von physical human-robot interaction.

2.3.4. Mögliche Interaktionsparadigmen

Die Vielzahl von Möglichkeiten, mit Hilfe unterschiedlicher Technologien den Benutzerwunsch für die Bewegung einer Lasthebemaschine aus einer Benutzereingabe abzuleiten, werden als Interaktionsparadigmen bezeichnet. Folgende Interaktionsparadigmen sind für die Bedienung von Lasthebemitteln von Bedeutung:

- **Koordinatengebende Eingabegeräte**

Mit Hilfe eines Positionierelements und ggf. eines Schaltelements können Bewegungen nach Richtung und Intensität vorgegeben werden. Klassische Beispiele sind Joysticks oder die Computer-Maus. [Ver-2015]

- **Physische Mensch-Maschine-Interaktion**

Die Interaktion basiert auf der Messung von extern (durch den Nutzer) auf das System eingebrachte Kräfte oder Momente und der anschließenden Umsetzung der gewünschten Bewegung durch das Gerät.

- **Tracking-Methoden**

In diesem Fall wird über die Messung von Positionsveränderungen z. B. des Nutzers, der Bewegungswunsch erfasst, und die Maschine folgt dem Benutzer. Häufig werden zur Unterstützung Marker eingesetzt, die von der Maschinensensorik leicht erfasst werden können.

- **Gesten-/Bewegungssteuerung**

Dieses Interaktionsprinzip verwendet formalisierte Gesten, die der Benutzer ausführt. Die Gesten werden beispielsweise durch Kameras erfasst und in entsprechende Steuerbefehle übersetzt. [Ama-1999]

- **Spracherkennung**

Bei diesem Interaktionsprinzip werden verbale Befehle über ein Mikrofon von der Maschine aufgenommen und über entsprechende Algorithmen die Befehlsmerkmale extrahiert. Diese Merkmale werden anschließend zur Berechnung der gewünschten Bewegung genutzt.

Das Interaktionsparadigma beschreibt somit die Art und Weise, wie eine vom Benutzer eingegebene und von der Steuerung erfasste Messgröße ausgewertet wird, um aus dem Wunsch des Benutzers eine korrespondierende Bewegung des Krans abzuleiten. Das Interaktionsparadigma kann somit nicht ohne das Interaktionsmedium und die entsprechende Messgröße betrachtet werden.

Eine Übersicht über für die Kranbedienung sinnvolle Interaktionsmedien, Messgrößen und Interaktionsparadigmen findet sich bei der ergonomischen Auslegung der intuitiven Laststeuerung in Kapitel 4.1.

2.4. Mensch-Maschine-Schnittstellen aus angrenzenden Fachbereichen

Neben Lasthebemitteln existieren eine Reihe anderer Prozesse und Geräte, bei deren Bedienung ähnliche Schwierigkeiten auftreten wie bei der herkömmlichen Steuerung von Kränen, deren Zweck aber nicht primär die Förderung von Stückgut mit/durch eine Vertikalbewegung ist. Auch in diesen Fällen ist die ergonomische Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle Gegenstand aktueller Entwicklungs- und Forschungstätigkeiten. Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über Mensch-Maschine-Schnittstellen, deren Ansätze auch im Hinblick auf Lasthebemittel vielversprechend erscheinen.

2.4.1. Mobile Arbeitsmaschinen

Es existieren einige Bedienkonzepte für mobile Arbeitsmaschinen, die im Blick auf erhöhte Intuitivität und verbesserte Kompatibilität entwickelt wurden.

Hayn [Hay-2012] stellt in seiner Dissertation ein haptisch unterstütztes Bedienkonzept für Hydraulikbagger vor. Statt der Ansteuerung einzelner Freiheitsgrade des Baggerarms kommen verschiedene ergonomisch optimierte Eingabegeräte zum Einsatz, die es ermöglichen, durch ein Master-Slave-System direkt die Bewegung und Position der Baggerschaukel zu steuern. Die Umrechnung der gewünschten Schaufelbewegung auf die Bewegungen der einzelnen Freiheitsgrade entfällt somit. In einer Probandenstudie zeigt Hayn anschließend auf, dass die verbesserte Bedienung zu geringeren Zykluszeiten und Fehlerzahlen führt.

Die Firma Vemcon verfolgt mit der Steuerung uniGRIP [Vem-2019b] (vgl. Abbildung 2-8) für Bagger, Grader, Planiertrauben und Radlader ein ähnliches Konzept: Durch Joysticks mit Kipp- und Drehfreiheitsgraden 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. Währenddessen können mit der freien linken Hand, per Standard-Joystick, Zusatzfunktionen der Maschine (z. B. Fahren) übernommen werden. Dies stellt eine große kognitive Entlastung dar und erleichtert und beschleunigt so das Erlernen der Steuerung.

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 Freiheitsgrade (i. d. R. sechs) und des großen



Abbildung 2-8: uniGRIP System mit 6 Freiheitsgraden [Vem-2019b]

Arbeitsraums stehen Bediener von Autobetonpumpen bei der Auslegersteuerung vor ähnlichen Problemen wie Kranfahrer, da die gewünschte Bewegung des Endschlauchs als Summe aller Freiheitsgradbewegungen entsteht und häufig ebenfalls mit Funksteuerungen gearbeitet wird. Auch hier bieten intuitive Bedienkonzepte in Form einer Auslegerspitzensteuerung in Verbindung mit einem kompatiblen Eingabegerät großes Potenzial, die Bedienung wesentlich zu vereinfachen.

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 (Kernkraft, Luft- und Raumfahrt).

Die Übertragbarkeit der im Rahmen des vorliegenden Berichts vorgestellten Steuerungskonzepte auf andere Anwendungsfälle und Maschinentypen wird in Kapitel 7.4 diskutiert.

2.4.2. Robotik und Werkzeugmaschinen

In der Robotik und bei der Steuerung von Werkzeugmaschinen kommen bereits seit vielen Jahren Steuerungen mit Rückwärtskinematik zum Einsatz. Anstatt jeden Freiheitsgrad einzeln anzusteuern, gibt der Benutzer bei der manuellen Bedienung lediglich die Bewegung des Tool Center Point (TCP) vor, also der Werkzeugaufnahme an der Spitze des Roboters bzw. der Werkzeugmaschine. Die Maschinensteuerung errechnet hieraus die optimalen Bewegungen aller Freiheitsgrade, die dann simultan angesteuert werden. Verschie-

dene 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, sodass der Roboter seine Pfadplanung im Automatikbetrieb darauf abstimmen kann. Eine Steuerung der Einzelgelenke, wie sie bei Kranen derzeit noch üblich ist, ist bei Robotern schon viele Jahre überholt und nur noch in Sonderfällen hilfreich.

Hierfür existieren verschiedene Eingabemöglichkeiten. Besonders verbreitet ist die Steuerung über eine 3D-Maus, die je drei translatorische und rotatorische Freiheitsgrade besitzt. Untersuchungen zur Teleoperation, also in gewisser Weise der Funksteuerung von modernen Robotersystemen, finden sich beispielsweise bei Nitsch [Nit-2011], Rodriguez-Sedano [Rod-2019] und Yu [Yu-2019].

Weiterführend existieren eine ganze Reihe von Steuerungs- und Regelungsansätzen für Assistenzroboter, die den Menschen durch physische Mensch-Maschine-Interaktion beim Handling von schweren Lasten unterstützen. Beispielhaft zu nennen sind hier die Dissertation von Gruber [Gru-1992] oder die Publikationen von Gosselin et al. [Gos-2013] und Krüger et al. [Krü-2009]. Ein gleichartiger Anwendungsbereich für Assistenzroboter ist die Unterstützung von Menschen mit Mobilitätseinschränkungen. Auch hier kommen Robotersysteme zum Einsatz, deren Intuitivität Gegenstand aktueller Untersuchungen ist [Vu-2017].

Bedingt durch die hohe Komplexität moderner Werkzeugmaschinen existieren ferner verschiedene Publikationen, die sich mit der nutzergerechten Gestaltung der Eingabeseite für diese Maschinen befassen, so z. B. Herbst [Her-2015], Wollschläger [Wol-2017] oder Brecher et al. [Bre-2017]. Fokus bei diesen Untersuchungen sind die optische und haptische Gestaltung der Eingabeoberflächen und -stellteile.

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

- Steuerung für Hobbydrohnen durch Kippbewegungen eines Smartphones
- Sprach- und Gestensteuerung zur Menüführung in PKW

- Gamepads für Computer und Spielekonsolen: Je nach Aufgabe kann der Benutzer ein für ihn intuitiv passendes Bedienelement auswählen und konfigurieren.

Die genannten Beispiele zeigen auf, dass intuitive 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.

3. Forschungslücke und Forschungsbedarf

3.1. Defizite aktueller Steuerungslösungen

Aktuelle Kransteuerungen sind entweder als Freiheitsgrad-Steuerungen oder – seltener – als Auslegerspitzensteuerungen ausgeführt. Die Bewegung einer Last mit Hilfe einer manuellen Steuerung erfordert dabei vom Bediener die Durchführung mehrerer Schritte.

Bei den bestehenden Freiheitsgrad-Steuerungen muss zunächst die gewünschte Hakenbewegung in Bewegungen der Krangelenke umgerechnet werden. Anschließend müssen diese Bewegungen über Icons oder die Erfahrung des Kranführers den Stellteilen zugeordnet werden, bevor diese schließlich in der erforderlichen Reihenfolge betätigt werden können. Um die Effizienz zu steigern, können mehrere Stellteile gleichzeitig bewegt werden. Eine solche mehrdimensionale Steuerungsaufgabe, bei der eine getrennte Ansteuerung der Gelenke – häufig simultan – erfolgt, stellt eine erhebliche mentale Belastung für den Bediener dar. Dies reduziert die Sicherheit im Umgang mit dem System, was sich wiederum auf die Effizienz der Entscheidungsprozesse während der Nutzung auswirkt.

Herkömmliche, achsbasierte Kransteuerungen repräsentieren das Systemmodell eines Krans und widersprechen dem mentalen Modell des Menschen, das sich auf die Bewegung der Last und nicht auf die Bewegung der einzelnen Antriebe des Krans konzentriert. Die so erforderliche gedankliche Umrechnung führt zu verschlechterter Intuitivität und damit zu mehr Fehlern. Da die Umrechnung von der gewünschten Bewegung in die erforderliche Steuereingabe permanent und für jede Bewegung neu erfolgen muss, stellt sich nur sehr langsam ein Gewöhnungseffekt ein.

Aus diesen Gründen hilft eine Vereinfachung der inneren Umrechnung und eine Anpassung der Kransteuerung an das mentale Modell des Menschen, Zeit zu sparen, die Einlernphase zu verkürzen und Fehler zu reduzieren. Auslegerspitzensteuerungen leisten hierzu einen wertvollen Beitrag, da die Inkompatibilität zwischen Stellteil- und Hakenbewegung gelöst wird: Die Umrechnung 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 Icons oder durch Erfahrungseffekte den Stellteilbewegungen zugeordnet werden. Bei der Bedienung von einem festen Fahrerplatz aus handelt es sich hierbei nichtsdestotrotz um eine wesentliche Verbesserung. Wird stattdessen eine Funksteuerung verwendet, kann sich der Bediener frei relativ zum Krankoordinatensystem bewegen, und das Bedienerkoordinatensystem ist in der Regel nicht deckungsgleich mit dem Krankoordinatensystem. Auch in diesem Fall ist also eine gedankliche Umrechnung auf Seiten des Bedieners notwendig, nämlich zwi-

schen dem „Vorne“ des Kranfahrers und dem „Vorne“ des Krans. Da diese Umrechnung für jeden Zeitpunkt und jede Bewegung neu durchgeführt werden muss, kommt es hier trotz der Verbesserungspotenziale durch die Auslegerspitzensteuerung zu unnötiger mentaler Belastung, die sich durch Gewöhnungseffekte nur sehr langsam verringert. Es existiert derzeit kein Konzept, das gleichzeitig die Vorteile einer Auslegerspitzensteuerung und die Lösung des Kompatibilitätsproblems zwischen Funksteuerung (Nutzerkoordinatensystem) und Maschinenkoordinatensystem für den Einsatz an einem Hebemittel industrietauglich vereint.

Nichtsdestotrotz weisen die im Stand der Forschung vorgestellten Auslegerspitzensteuerungen mit innovativen Eingabeparadigmen vielversprechende Ansätze zur Verbesserung der aktuellen Steuerungssituation bei Kranen auf. Die bisher vorgestellten Lösungen erfordern jedoch alle entweder zusätzliche Infrastruktur im Bedienumfeld (ganzes oder teilweises Ausleuchtung des Arbeitsbereichs mit Kameras, RFID-Readern etc.), eine ständige Zugänglichkeit der Last oder eine feste Bedienerposition, zum Beispiel in der Kabine. Eine industrietaugliche Teleoperation der entsprechenden Krane und damit eine Verbindung der direkten, zielorientierten Vorgabe der gewünschten Bewegungsrichtung aus dem Blickwinkel des Benutzers, verbunden mit den zahlreichen Vorteilen einer Funksteuerung findet bisher bei keinem der Konzepte statt. Insbesondere das Problem der robusten Ortung der Bedienerausrichtung ist nicht zufriedenstellend gelöst, ohne auf umfassende räumliche Infrastruktur angewiesen zu sein. Aus diesen Gründen eignen sich alle bisherigen Ansätze nicht für einen flächendeckenden, flexiblen Einsatz an allen Arten von funkgesteuerten Lasthebemitteln.

3.2. Basisanforderungen an die intuitive Laststeuerung

Aus dem Stand der Forschung und Entwicklung lassen sich folgende grundsätzliche Anforderungen („Basisanforderungen“) an eine nutzerzentrierte, intuitive Steuerung für Lasthebemaschinen mit Hilfe einer Funksteuerung ableiten:

1. Direkte Vorgabe der Hakenbewegung, d. h. Kompatibilität zwischen Benutzereingabe und Hakenbewegung durch ein ergonomisch günstiges und technisch robust umsetzbares Interaktionsparadigma
2. Steuerung mit freier Bedienerbewegung d. h. durch Nutzung einer Funksteuerung
3. Überbrückung von unzugänglichen Bereichen, d. h. keine dauerhafte Haken- oder Maschinenberührung durch den Bediener nötig, um auch an Kranen mit großen Reichweiten und Hubhöhen applizierbar zu sein
4. Kompatibilität zwischen internem Nutzer-Referenz- und Hakenkoordinatensystem, d. h. „Vorne“ des Benutzers ist zu jedem Zeitpunkt „Vorne“ am Kran

5. Keine aufwendige Infrastruktur im Umfeld des Krans, d. h. weder großräumige Kamera- oder RFID-Readerausleuchtung des gesamten Arbeitsbereichs noch anderweitiges externes (kostenintensives) Equipment
6. Steuerung von Kranen mit unterschiedlich vielen rotatorischen und translatorischen Freiheitsgraden möglich
7. Funktionsfähigkeit im Innen- und Außenbereich, d. h. unabhängig von GPS-Signalen, Witterungsbedingungen etc
8. Industrietauglichkeit (Robustheit, Genauigkeit, Arbeitsbereichsgröße, Lichtverhältnisse, Lärm, ...)
9. Umsetzbarkeit an einer Arbeitsmaschine im industriellen Umfeld, d. h. außerhalb einer Laborumgebung (proof of concept)

Abgesehen von den ergonomischen und technischen Basisanforderungen ist darauf zu achten, dass eine neuartige Steuerungslösung ökonomisch sinnvoll umsetzbar ist.

3.3. Forschungslücke

Es zeigt sich, dass bisher derzeit kein Konzept existiert, das alle Basisanforderungen erfüllt. Besonders sichtbar wird die Forschungslücke, wenn man die bestehenden Ansätze den Basisanforderungen an eine industrietaugliche, intuitive, zielorientierte Laststeuerung mit Hilfe einer Funksteuerung gegenüberstellt. In Tabelle 3-1 werden hierzu die vorhandenen Lösungsansätze aufgeführt und hinsichtlich der Erfüllung der Basisanforderungen an eine intuitive, zielorientierte Laststeuerung mit Hilfe einer Funksteuerung bewertet.

Es wird auch deutlich, dass bisher keine intuitive, funkbasierte Eingabemöglichkeit in Kombination mit einer Auslegerspitzensteuerung existiert, die alle Basisanforderungen erfüllt. Es fehlt eine Funksteuerungslösung, sich generell bei allen Arten von industriellen Lasthebemitteln, unabhängig vom Einsatzzweck und -ort, robust und effizient einsetzen lässt (steuerungstechnische Anforderungen), und die gleichzeitig die ergonomischen Nachteile bisheriger Freiheitsgrad-Steuerungen hinsichtlich Kompatibilität, Gebrauchstauglichkeit und Intuitivität behebt (ergonomische Anforderungen).

Die Leitfrage, die im Rahmen des Forschungsprojekts beantwortet werden soll, lautet demnach:

Wie sieht eine Mensch-Maschine-Schnittstelle für funkbediente Lasthebemittel aus, die sowohl die steuerungstechnischen als auch die ergonomischen Anforderungen an eine intuitive, zielorientierte Steuerung erfüllt?

Tabelle 3-1: Bewertung bisheriger Steuerungsansätze hinsichtlich der Basisanforderungen

		Spalte Nr.									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		Vorgabe der Hakenbewegung möglich (Kompatibilität zw. Stellteil- und Hakenbewegung)	Bedienung mit freier Bedienerbewegung möglich ("Funk")	Überbrückung von unzugänglichen Bereichen möglich (d. h. keine Hakenzugänglichkeit nötig)	Kompatibilität zwischen Nutzer- und Hakenkoordinatensystem	Ohne aufwendige Infrastruktur im Umfeld des Krans	Steuerung von vielen Freiheitsgraden möglich (rotatorisch und translatorisch)	Verwendung im Innen- und Außenbereich möglich	Industrietauglichkeit (Robustheit, Genauigkeit, Arbeitsbereichsgröße, Lichtverhältnisse, Lärm, ...)	Proof of Concept an einer Arbeitsmaschine im industriellen Umfeld (nicht Laborumgebung)	
achs- basiert	Linearhebel (Funksteuerung)										
	Joysticks (Funksteuerung)		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
	Taster (Funksteuerung)										
	HBC-pilot	[HBC-2019a]		✓	✓		✓		✓	✓	
Haken- steuerungen (Industrie)	Intelligent Boom Control	[Joh-2013]									
	Tip Control	[Tec-2019]	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Lennix Pro	[Leh-2019]									
	Crane Tip Control	[HIA-2018]									
	Smart Control	[Eps-2018]	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
	Smart Boom Control	[Pal-2019]									
Hakensteuerungen (Forschung)	Auslegerspitzensteuerungen für Ladekrane, Rückezüge	[Bak-2011] [Cha-2016] [Kru-1992] [Ped-2010] [Pro-2003] [Löf-2009] [Man-2017]	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Magic Wand	[Pen-2009b]	✓	✓		✓	✓	✓			
	RFID-Tag	[Pen-2009c] [Pen-2012]	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
	Touchscreen mit Imitation konvent. Bedienelemente	[Kiv-2013b] [Kiv-2013a] [Sut-2007]	✓	✓	✓		✓	✓	✓		
	Touchscreen mit Imitation konvent. Bedienelemente und Orientierungsanpassung	[Kiv-2014] [Kiv-2013b] [Kiv-2013a]	✓	✓	✓	✓		✓			
	Touchscreen mit Bildverarbeitung (Zielvorgabe)	[Sor-2007]	✓	✓	✓	✓		✓			
	physische Mensch-Maschine-Interaktion	[Cam-2016] [Kaz-2004] [Col-2003] [Dem-2019]	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
	Gestenerkennung	[Fri-2003]	✓	✓	✓	✓		✓	✓		
	Spracherkennung	[Maj-2017]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Angrenzende Fachbereiche	Master-Slave-System für Hydraulikbagger	[Hay-2012]	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	UNIGRIP	[Vem-2019]									
	Autobetonpumpen	[Hen-2016], div. Hersteller	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
	TCP-Steuerungen (Robotik)	[Sic-1990] [Sic-2016] [Sci-2000] [Bia-2008] [Cha-1995] [Fah-2009] [Smi-1998]	✓		✓		✓	✓	✓	✓	
	Teleoperation (Robotik)	[Nit-2011] [Rod-2019] [Yu-2019]	✓	✓	✓			✓	✓	✓	
	Assistenzroboter mit physischer Mensch-Maschine-Interaktion	[Gru-1992] [Gos-2013] [Krü-2009] [Vu-2017]	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
	Werkzeugmaschinen	[Her-2015] [Wol-2017]	✓		✓		✓	✓	✓	✓	
Konsum- güter	Drohnensteuerung		✓	✓	✓		✓	✓	✓		
	Sprach- und Gestensteuerung		✓		✓	✓	✓				
	Gamepads		✓	✓	✓		✓	✓			

3.4. Forschungsfragen

Zur Beantwortung der Leitfrage werden die folgenden Forschungsfragen detailliert untersucht:

3.4.1. Ergonomische Fragestellungen

1. **Eingabemodalität:** Welche Bedien-/Stellteile und Interaktionsparadigmen eignen sich für die intuitive, zielorientierte Vorgabe der gewünschten Lastbewegung?
Das Interaktionsparadigma berücksichtigt das mentale Modell des Bedieners sowie die Grundsätze der Dialoggeschaltung. Intuitiv bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Steuerung möglichst lernförderlich ist, damit sich ein Bediener – möglichst unabhängig von der Vorerfahrung – die Systemfunktion durch Ausprobieren mit möglichst wenig Fehlern erschließen kann.
→ Kapitel 4.1
2. **Kompatibilität:** Wo befindet sich das interne Referenzkoordinatensystem der Nutzer(-gruppen)? Wie und wann verändert es sich?
Diese Beantwortung dieser Frage zielt darauf ab, das Kompatibilitätsproblem so zu lösen, dass dem mentalen Modell des Bedieners möglichst exakt entsprochen wird.
→ Kapitel 4.3
3. **Evaluation:** Wie unterscheiden sich neue Steuerungskonzepte im Vergleich zu herkömmlichen Funksteuerungssystemen hinsichtlich objektiver (Effizienz und Effektivität) und subjektiver (Nutzerzufriedenheit und Akzeptanz) Kriterien?
Die Bewertung der Intuitivität, die durch Lernförderlichkeit und Kompatibilität sichergestellt werden soll, erfolgt folglich mit Hilfe der Gebrauchstauglichkeit.
→ Kapitel 6

3.4.2. Steuerungstechnische Fragestellungen

1. **Orientierung:** Wie kann man aus der Eingabe eines bewegten Benutzers unter Berücksichtigung der aktuellen Benutzerorientierung die gewünschte Bewegungsrichtung der Last ermitteln?
Durch die Beantwortung dieser Frage wird angestrebt, das bei Kran-Funksteuerungen bisher existierende Kompatibilitätsproblem aufzulösen.
→ Kapitel 5.4
2. **Steuerung & Regelung:** Welche Steuerungs- (Rückwärtskinematik) und Regelungsansätze eignen sich für die Umsetzung eines intuitiven Steuerungskonzepts an einem beliebigen Kran?

Wird die Interaktion dem mentalen Modell des Menschen angepasst, ist es notwendig, dass die Maschine durch entsprechende Steuerungs- und Regelungsintelligenz befähigt wird, die Benutzereingaben in entsprechende Bewegungen umzusetzen.

→ Kapitel 5.7

3. **Umsetzung:** Wie muss eine Steuerungsarchitektur (Hard- und Software) aussehen, welche die Bewegungsvorgabe für den Haken eines Lasthebemittels mittels einer Funksteuerung auf die Einzelbewegungen der Antriebe umrechnet?

Die Beantwortung dieser Frage ermöglicht die Umsetzung des neuen Steuerungskonzepts (proof of concept).

→ Kapitel 5.8

3.5. Wissenschaftliche Methodik

3.5.1. Probandenstudien

Die Beantwortung der ergonomischen Forschungsfragen erfolgt im Wesentlichen iterativ und nutzerzentriert gemäß DIN EN ISO 9241 (vgl. Abbildung 3-1) durch eine strukturierte Generierung von Bedienkonzeptvarianten, deren Umsetzung und Evaluation in mehreren Probandenstudien. Optimiert wird hierbei auf die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit, Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung (vgl. Abschnitt 2.1.3).

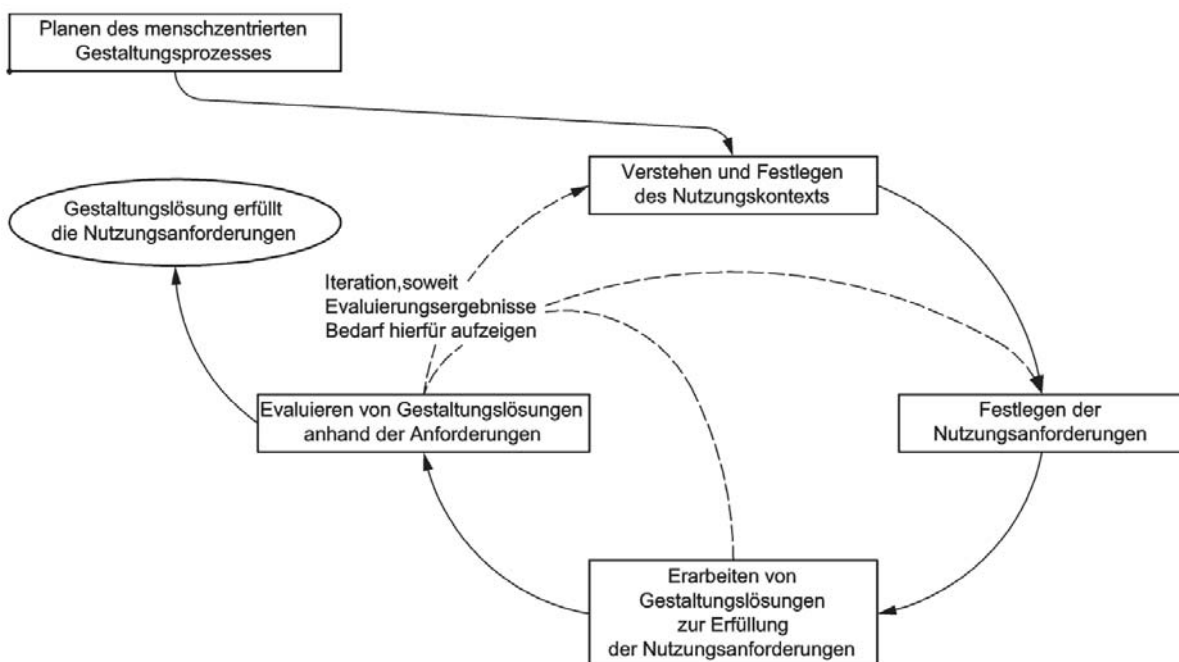


Abbildung 3-1: Iterativer Prozess zur menschenzentrierten Gestaltung nach [Deu-2011a]

Im konkreten Anwendungsfall wird je nach Fragestellung ein adäquater Prototyp entwickelt, der die zu veranschaulichende Funktion darstellt und mit geeigneten Methoden evaluiert, sodass die Forschungsfrage beantwortet und die gewonnenen Erkenntnisse in die nächste Generation der Prototypen aufgenommen werden können.

3.5.2. Vorgehen bei der Entwicklung

Zur Beantwortung der steuerungstechnischen Forschungsfragen erfolgt aufbauend auf die ergonomische Auslegung der intuitiven Laststeuerung die technische Umsetzung. Zu diesem Zweck kommt das in Abbildung 3-2 dargestellte V-Modell zum Einsatz. Nach der Anforderungsdefinition und der Konzeptentwicklung (Systementwurf) werden zunächst notwendige Sensorik-, Steuerungs- und Regelungskonzepte entwickelt und anschließend implementiert und getestet (domänenspezifischer Entwurf). Wo notwendig, wird entsprechende Hardware ausgewählt und beschafft. Die so entstehenden Subsysteme werden anschließend in ein Gesamtsystem („Demonstrator“) integriert. Nach Abschluss der Systemintegration erfolgt der Funktionsnachweis für den Demonstrator.

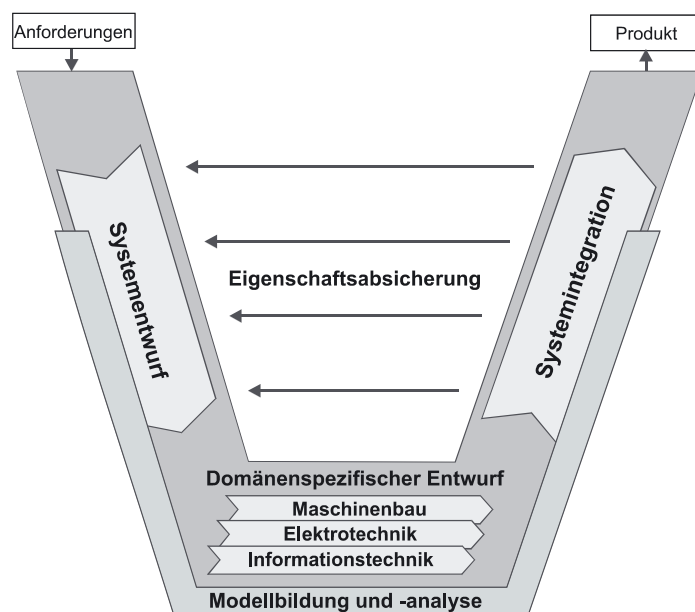


Abbildung 3-2: V-Modell als Makrozyklus [Ver-2004]

Das V-Modell ist gemäß VDI-Richtlinie 2206 eine anerkannte, praxisorientierte Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme und besonders geeignet innovative Produkte, die ein „interdisziplinäres Zusammenwirken von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik“ [Ver-2004, S.2] erfordern. Damit ist es geeignet für die Entwicklung von Kransteuerungen, die sich an der Schnittstelle von Mechanik (Kran), Elektronik (Sensorik/Aktorik/Funk) und Informationstechnik (Automatisierung) befinden.

4. Ergonomische Auslegung der intuitiven Laststeuerung

4.1. Entwurf

4.1.1. Systemergonomische Analyse

Wie bereits erläutert ist die Steuerung von Kranen, insbesondere mit Funkfernsteuerungen, häufig komplex. Aus diesem Grund dürfen Unternehmer gemäß der DGUV Vorschrift 52 Krane § 29 [Bun-2013b] nur solche Versicherte mit dem selbstständigen Führen eines Kranes beschäftigen,

1. die das 18. Lebensjahr vollendet haben,
2. die körperlich und geistig geeignet sind,
3. die im Führen oder Instandhalten des Kranes unterwiesen sind und ihre Befähigung hierzu nachgewiesen haben, und
4. von denen zu erwarten ist, dass sie die ihnen übertragenen Aufgaben zuverlässig erfüllen.

Die 3. Regel ist in Deutschland allgemein unter dem Begriff Kranführerschein bekannt.

Zur Ansteuerung der einzelnen Freiheitsgrade eines Kranes dienen als Bedienelemente Drucktaster, Linearhebel, Meisterschalter (auch: Joysticks) oder eine beliebige Kombination davon (vgl. Abbildung 2-5 auf Seite 22). Die Bedienelemente unterscheiden sich überwiegend in der Anzahl der Freiheitsgrade (Achsen, Gelenke) eines Kranes, die damit angesteuert werden können (vgl. Tabelle 2-3 auf Seite 16).

Häufig ist das Steuerpult eines Lasthebemittels fest mit diesem verbunden und an einer zentralen Position angebracht, um dem Bediener einen guten Überblick über den Arbeitsplatz zu verschaffen. Dies ist beispielsweise bei den Krankabinnen von Turmdrehkranen auf Baustellen der Fall.

Der Vorteil eines mit dem Lasthebemittel fest verbundenen Steuerpults besteht darin, dass die Position des Bedieners, relativ zum Lasthebemittel, bei jedem Steuervorgang dieselbe ist. Somit ist stets gewährleistet, dass es zu keiner Verletzung der internen Kompatibilität nach Bubb, Bengler et al. [Bub-2015] kommt, sodass die Steuerung nach ausreichend Erfahrung fehlerfrei und reproduzierbar angewendet werden kann. Der Nachteil dieser Steuerungsvariante besteht darin, dass diese Art von Steuerung sehr komplex ist, da alle Freiheitsgrade des Lasthebemittels separat angesteuert werden müssen. Der Bediener

muss die gewünschte Bewegung des Endeffektors (Haken) aus den einzelnen Gelenkbewegungen superponieren, und für jedes Gelenk das entsprechende Stellteil in der richtigen Richtung mit der Intensität auslenken. Zur Vereinfachung dieser ortsgebundenen Steuerungsaufgabe existieren bereits unterschiedliche Ansätze, beispielsweise der uniGRIP von Vemcon (vgl. Kapitel 2.4), der die intuitive Steuerung eines Baumaschinen-Werkzeugs mit Hilfe einer Rückwärtskinematik ermöglicht.

Eine weitere Möglichkeit der Steuerung ist die Funksteuerung. Auch hier dienen Drucktaster, Linearhebel und Meisterschalter als Bedienelemente, mit dem Unterschied, dass das Steuerpult nicht mehr mit dem Lasthebemittel verbunden ist, sodass sich der Bediener mit dem Steuerpult frei bewegen kann. Vorteil dieser Steuervariante ist, dass der Bediener sich ein besseres räumliches Bild von der vorliegenden Steuerungssituation verschaffen und eine optimale Sicht auf die Last einnehmen kann (zu den weiteren Vorteilen von Funksteuerungen vgl. Kapitel 2.3). Nachteil von Funksteuerungen ist, dass dabei das Koordinatensystem des Bedieners vom Koordinatensystem des Lasthebemittel abweichen kann. Diese Abweichung stellt eine Verletzung des sogenannten Kompatibilitäts-Postulats nach Bubb et al. [Bub-2015] dar und hat eine höhere kognitive Belastung zu Folge. Dies führt zu einer erhöhten Fehlerzahl, verminderter Leistung und vermindertem Vertrauen in das System [Her-2013].

Eine Möglichkeit für eine intuitivere Steuerung besteht nach Peng [Pen-2009a] in der Steuerung durch Tracking des Benutzers. Dieser Ansatz erlaubt dem Bediener die Last mit natürlichen Handbewegungen zu steuern und kommt gänzlich ohne Bedienelemente aus. Diese Art der Steuerung stellte sich als äußerst intuitiv heraus und führte in von Peng durchgeführten Probandenversuchen zu Zeiteinsparungen von bis zu 50% im Vergleich zu herkömmlichen Steuerungen. Trotz dieses Vorteils wohnen diesem System auch Nachteile inne. Unter anderem setzt diese Steuerung eine fest installierte Sensorik zur Erkennung von Last und Bediener voraus. Dies erfordert fest installierte Hardware, die sensorisch den gesamten möglichen Bewegungsbereich des Bedieners abdeckt, was bei mobilen Lasthebemitteln wie Lkw-Kranen nur schwer realisierbar ist. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass Last und Hand des Bedieners sich stets in unmittelbarer Nähe zueinander befinden müssen. Dies ist problematisch, wenn der Arbeitsbereich nicht vollständig für den Bediener zugänglich ist, zum Beispiel wenn Lasten auf Gebäude oder über Baugruben gehoben werden müssen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer Laststeuerung, welche die Effizienz der Tracking-Steuerung, die Bewegungsfreiheit der Funksteuerung und die inverse Kinematik des uniGRIP vereint, ohne dabei deren Nachteile aufzuweisen. Hierfür soll eine intuitive Laststeuerung zur Teleoperation entwickelt werden, welche automatisch die Ausrichtung des Kranführers erkennt und das Lasthebemittel mit inverser Kinematik ent-

sprechend steuert. Der Bediener muss sich somit nicht mehr in das Lasthebemittel hineinsetzen, sondern kann den Kran derart bedienen, als würde er die Last selbst (und nicht den Kran) steuern.

4.1.2. Generierung von Bedienkonzeptvarianten

Zur Generierung geeigneter Bedienkonzeptvarianten wurden zwei Methoden aus der Produktentwicklung angewendet, die Funktionsanalyse bzw. Function Analysis System Technique (FAST) und der morphologische Kasten. Das FAST-Diagramm (vgl. Abbildung 4-1) fragmentiert die Funktion (Gut bewegen) in eine Wie/Warum-Beziehung und ermöglicht so die Identifikation von Voraussetzungen. Als entscheidende Schwachstelle wird hierbei die Umwandlung des Bewegungswunsches auf die Antriebe identifiziert (rot).

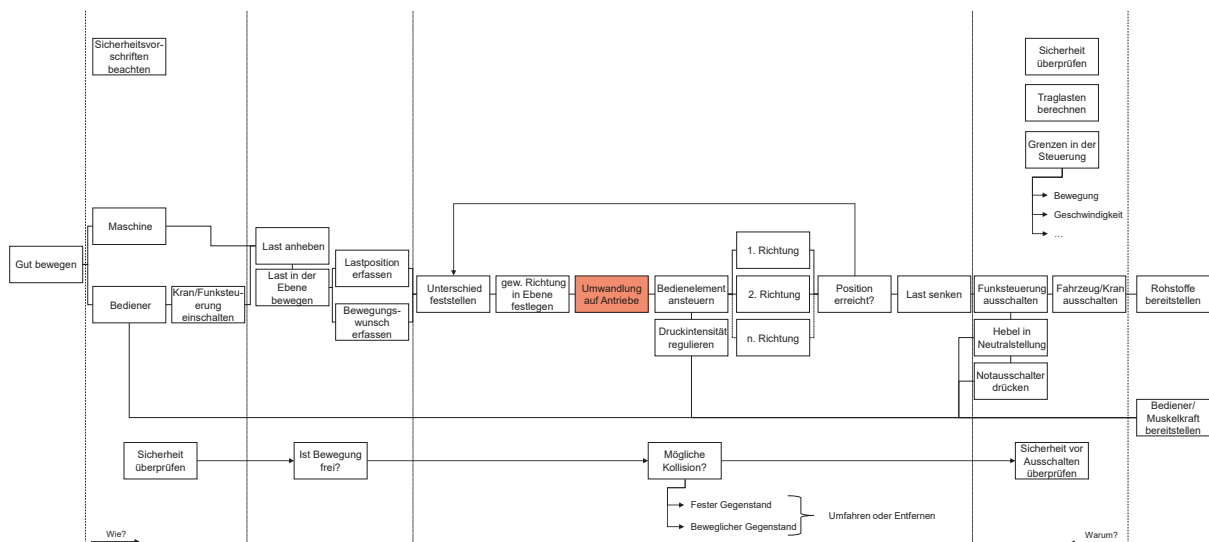


Abbildung 4-1: Kranbedienung aktuell (FAST-Diagramm) [Hel-2018]

Das Problem lässt sich in diesem Fall in folgender Frage formulieren: *Wie teile ich dem Kran möglichst effektiv, effizient und zufriedenstellend mit, wo die Last hinbewegt werden soll?*

Zur Beantwortung dieser Frage wurden zunächst die möglichen Eingabemodalitäten systematisiert (vgl. Abbildung 4-2), anschließend verschiedene neuartige oder althergebrachte Bedienkonzeptvarianten mittels des morphologischen Kastens abgeleitet (vgl. Abbildung 4-3) und diese Varianten abschließend im Rahmen einer Expertenbewertung auf Umsetzbarkeit, Kosten, Robustheit und Intuitivität (in bisherigen Systemen) bewertet (vgl. Abbildung 4-4). Die 18 Lösungsalternativen des morphologischen Kastens (je Alternative eine blaue Linie) wurden zu Illustrationszwecken mit Symbolen versehen und von links nach

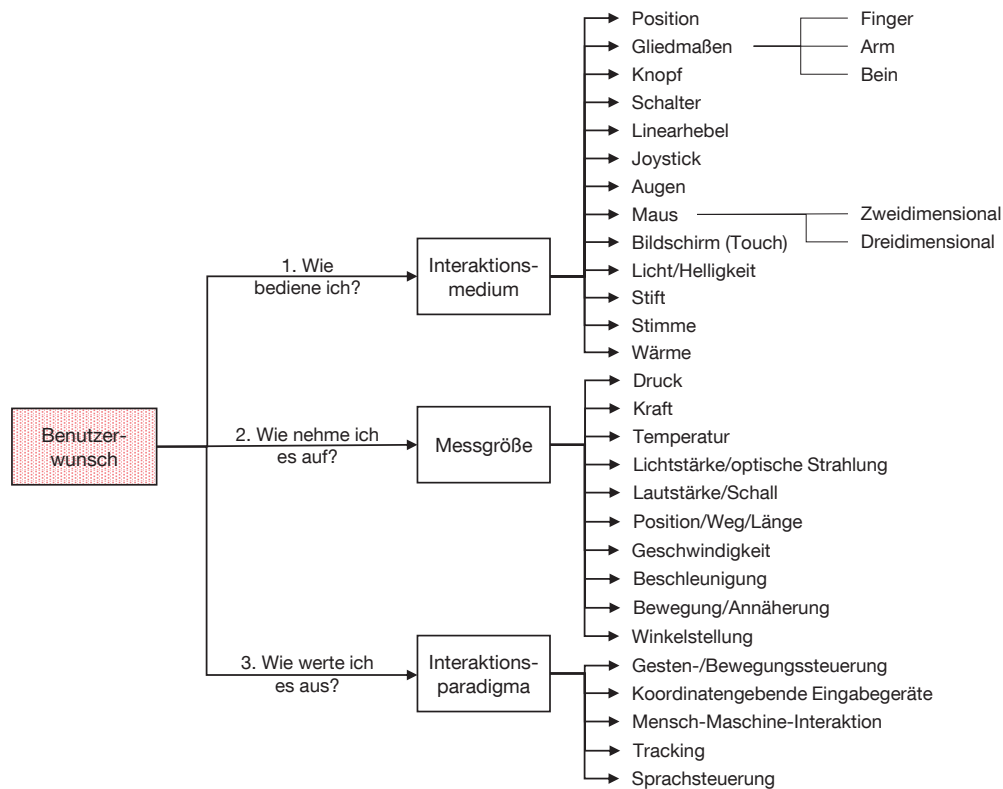


Abbildung 4-2: Mögliche Eingabemodalitäten: Lösungsansätze für die Eingabe des Benutzerwunsches (in Anlehnung an [Hel-2018])

rechts nummeriert (bewertete Alternativen 1-18). Der morphologische Kasten schlüsselt alle möglichen Lösungen des Problems vorurteilsfrei auf.

Aus der Bewertung der Lösungsalternativen ergeben sich in absteigender Reihenfolge die Favoriten:

1. Steuerung mit Hilfe eines touchfähigen Eingabegerätes (Tablet mit Stift- oder Fingerbedienung)
2. Tracking einer Person (Positionstracking)
3. Richtungsvorgabe durch Meisterschalter (Joysticksteuerung)
4. ...

Aufgrund der hervorragenden Bewertung in Abbildung 4-4 der Joysticksteuerung (Alternative Nr. 16) hinsichtlich Umsetzbarkeit, Kosten und Robustheit wird dieses System als Basissystem für die intuitive Laststeuerung gewählt. Die schlechte Bewertung in der Kategorie Intuitivität kommt zustande, weil Joysticks bisher keine direkte Vorgabe der Lastbewegung ermöglichen, und damit die bereits erläuterten Kompatibilitätsprobleme auftreten. Die intuitive Laststeuerung adressiert genau dieses Problem, und lässt daher in der Kategorie Intuitivität eine erhebliche Verbesserung erwarten: Die Kombination einer Joystickeingabe (Richtung, Alternative 16) mit der Orientierungsmessung (Umrechnung der Richtung auf den Kran bzw. die Last, Alternative 5) ermöglicht eine Steigerung der erwarteten Intuitivität

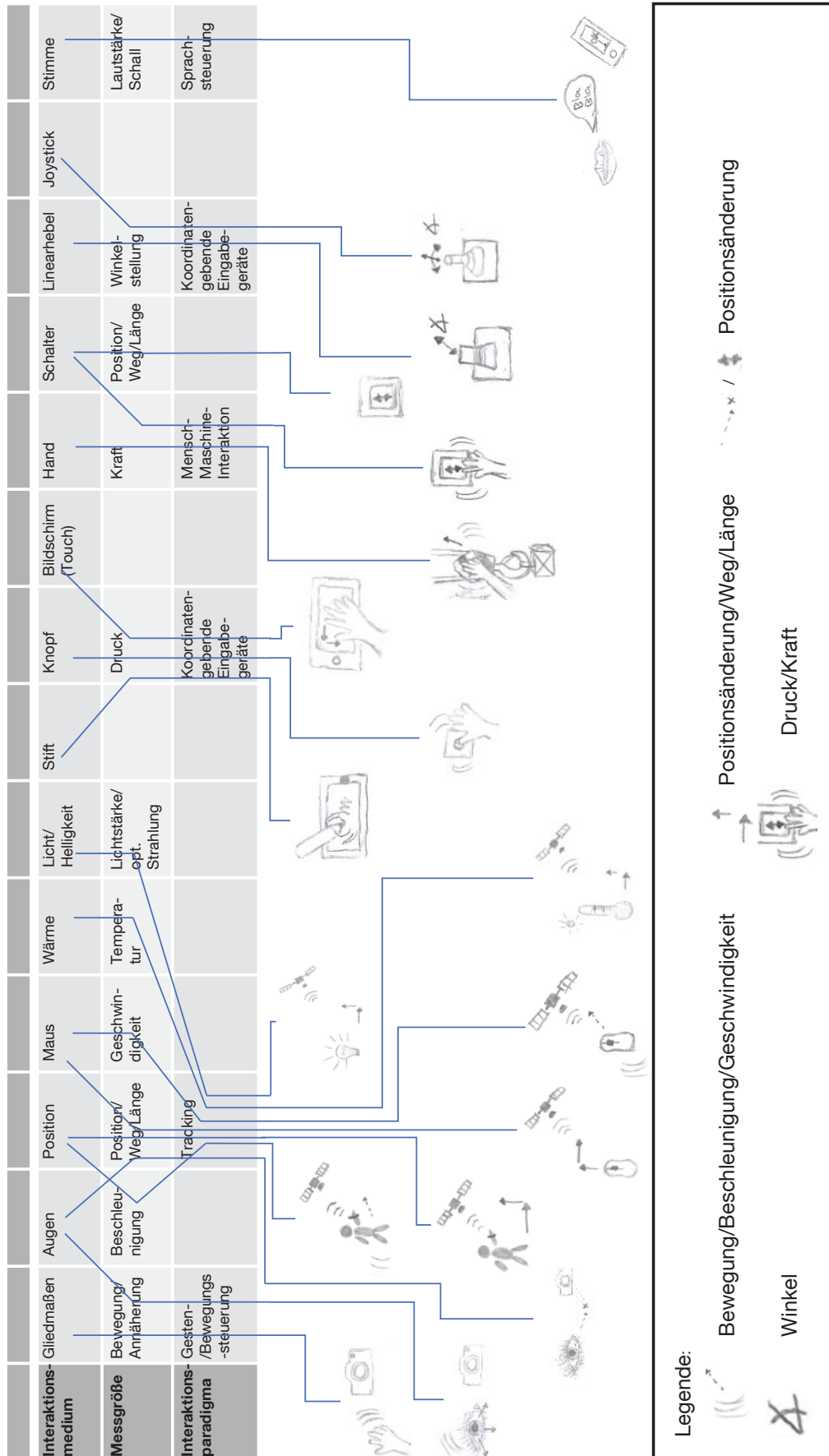


Abbildung 4-3: Bedienkonzeptvarianten als morphologischer Kasten (in Anlehnung an [Hel-2018])

	Sieger je Zeile	KE	KE MMI	KE	GBS _T		
18.		--	--	--	++	4	10
17.		0	-	-	++	8	7
16.		++	++	++	--	12	3
15.		++	++	++	--	12	3
14.		++	++	++	--	12	3
13.		++	++	++	--	12	3
12.		++	++	+	++	15	1
11.		+	++	++	--	11	4
10.		++	++	+	++	15	1
9.		-	--	--	++	5	9
8.		0	+	-	++	10	5
7.		0	-	--	++	7	8
6.		++	++	-	++	13	2
5.		++	+	0	++	13	2
4.		0	0	-	++	9	6
3.		--	--	--	++	4	10
2.		--	--	--	++	4	10
1.		++	-	-	++	10	5
Umsetzbarkeit							
Kosten							
Robustheit							
Intuitivität							
Summe							
Platz							
T							sehr schlecht ≙ 0 Punkte
GBS							schlecht ≙ 1 Punkte
KE							neutral ≙ 2 Punkte
MMI							gut ≙ 3 Punkte
Spracherkennung (nicht untersucht)							sehr gut ≙ 4 Punkte

Abbildung 4-4: Expertenbewertung der Bedienkonzeptvarianten (in Anlehnung an [Hel-2018])

und resultiert somit in einem Konzept, bei dem die Orientierung des Bedieners getrackt und zur Umrechnung der Steuerbefehle genutzt wird (Tracking), zeitlich das Bedienelement jedoch einen Joystick darstellt (koordinatengebendes Eingabegerät), mit dem sich zweidimensionale Bewegungen hervorragend nachvollziehen lassen.

Die Kombination dieser beiden Systeme stellt die intuitive Laststeuerung dar, wie sie im Rahmen dieses Projekts entwickelt wird.

4.1.3. Lösungsansatz: intuitive Laststeuerung

Bei der neu entwickelten intuitiven Laststeuerung gibt der Bediener durch die Betätigung eines Bedienelements die gewünschte Bewegungsrichtung der Last aus seiner Perspektive vor. Er bewegt den Stellhebel nur von der aktuellen Last- in Richtung der Zielposition (blauer Pfeil „Eingabe“ in Abbildung 4-5). Das System ermittelt durch die integrierte Sensorik die Ausrichtung des Nutzers relativ zur Last (Winkel Δ_{Nutzer} und $\varphi_{\text{Ausleger}}$) sowie die aktuelle Stellung des teleoperierten Krans ($\varphi_{\text{Ausleger}}, r_{\text{Haken}}, z_{\text{Haken}}$) und steuert dessen Antriebe durch Verwendung einer Rückwärtskinematik so an, dass die Bewegungsrichtung der Last (blauer Pfeil „Ausgabe“) parallel zur tatsächlich vom Bediener vorgegebenen Richtung des Bedienelements erfolgt. Die Bewegung eines Stellhebels in Richtung der gewünschten Zielposition führt somit zu einer Lastbewegung in die vorgegebene Richtung bei gleichzeitiger Wirkung mehrerer Antriebe.

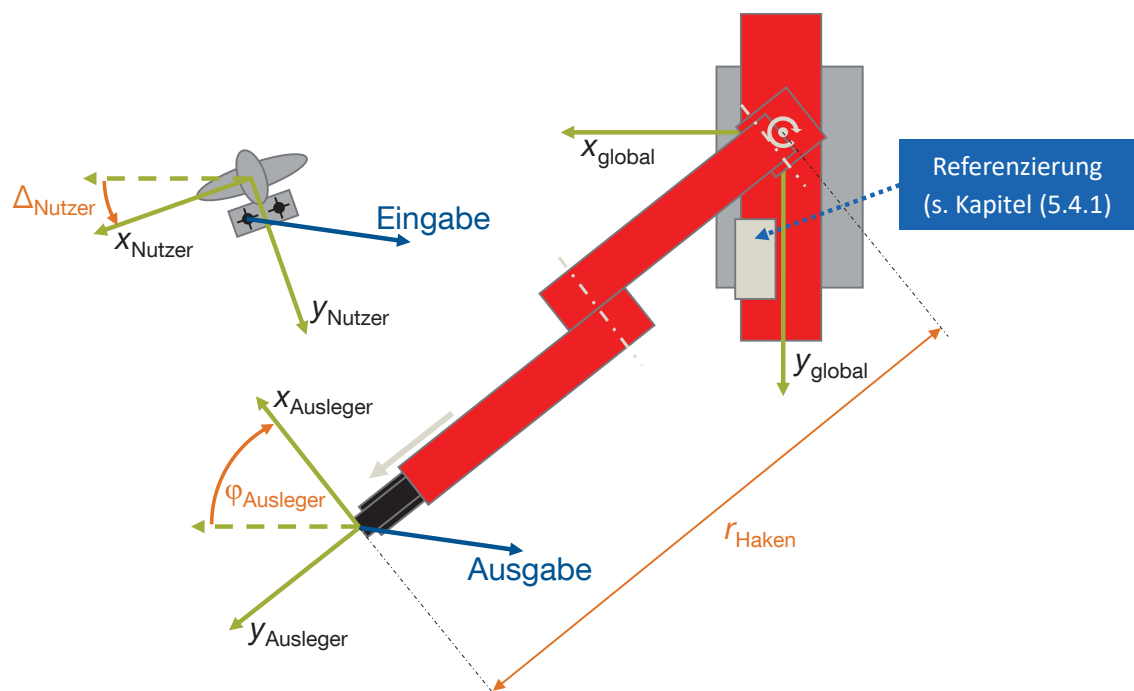


Abbildung 4-5: Intuitive Laststeuerung (Draufsicht, schematisch)

Für die Bestimmung der Maschinenposition sowie der aktuellen Ausrichtung des Krans wird auf die bereits an den meisten Geräten vorhandene Sensorik zurückgegriffen: Die

Maschinenposition lässt sich über lokale bzw. globale Messsysteme erfassen oder (bei ortsfesten Systemen) manuell eingeben. Die aktuelle Stellung des Krans ergibt sich aus der kinematischen Kette aller Freiheitsgrade, deren Positionen durch die geräteinterne Sensorik erfasst werden (Drehgeber, Längenmesser etc.).

Die Messung der aktuellen Ausrichtung des Benutzers erfordert ein zusätzliches Messsystem, das bisher nicht Teil der Steuerung von teleoperierten Kransystemen ist. Es ist ausreichend, die Ausrichtung Δ_{Nutzer} des Benutzers relativ zum globalen Koordinatensystem x_{global}, y_{global} mit Hilfe eines passenden Messsystems zu erfassen, um so die Auslenkung der Bedienelemente an der Funksteuerung und damit die gewünschte Bewegungsrichtung der Last vom Benutzerkoordinatensystem x_{Nutzer}, y_{Nutzer} zunächst in das globale Koordinatensystem x_{global}, y_{global} und dann mit Hilfe von $\varphi_{Ausleger}$ sowie den geometrischen Größen des Krans auf das auslegergebundene Koordinatensystem $x_{Ausleger}, y_{Ausleger}$ umrechnen zu können. Voraussetzung für eine zuverlässige und damit sichere Funktion des Systems ist, dass die Orientierungsmessung auch unter widrigen Bedingungen die Ausrichtung des Benutzers mit der erforderlichen Genauigkeit korrekt ermittelt.

Im Rahmen der Lösungsfindung mit Hilfe der systemergonomischen Analyse werden zwei Grundfragestellungen identifiziert, die – neben der technischen Umsetzung und Evaluation der intuitiven Laststeuerung – im weiteren Verlauf des Projekts untersucht werden:

- Welches innere Koordinatensystem zur Führung der Last nutzen Bediener in einem Laststeuerungsverfahren mit Rückwärtskinematik, das der Steuerung innenliegende oder eines dem menschlichen Bediener innenliegende (Kopf oder Hand)?
- Welche Führungskontinuität wird in einem solchen Falle intuitiv angenommen, diskrete (innerhalb eines Bedienungsschritts fixiert) oder kontinuierliche (steter Abgleich zur aktuellen Position des Nullpunktes des Koordinatensystems des Bedieners), vor allem in einem beiderseitig dynamischen Fall, also bei gleichzeitiger Bewegung des Nutzers und des Krans?

Die intuitive Laststeuerung repräsentiert einen Paradigmenwechsel: Anstatt wie bisher die Lasthebemaschine zu bewegen, wird nun direkt die Last bewegt.

4.2. Potenzial

4.2.1. Expertenbefragung

Im Rahmen einer ausführlichen Expertenbefragung zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden verschiedene Nutzergruppen mit dem vorgestellten intuitiven Steuerungskonzept und dem Forschungsansatz vertraut gemacht. Anschließend wurden sie hinsichtlich der Anforderungen an die teleoperierte Steuerung von Lasthebemitteln befragt und um eine

Beurteilung des Konzepts gebeten. Es wurden bedienerseitig sowohl Experten (Vollzeit-Kranfahrer von Turmdrehkränen, Ladekränen, Mobilkränen und Raupenkränen) als auch Gelegenheitsnutzer (Montagemitarbeiter mit Hallenkranzugriff) befragt. Weiterhin wurden gezielt verantwortliche Entscheidungsträger sowohl bei Kranbetreibern (Mitarbeiter mit Personal- und Ressourcenverantwortung in Kranverleih bzw. Bauunternehmung) als auch bei Kran- und Komponentenherstellern (Entwicklung, Produktmanagement) befragt. Der vorgestellte Ansatz wurde von allen Experten positiv beurteilt. Experten- und Gelegenheitsbediener erwarten durch die intuitive Steuerung eine erhebliche Verringerung der kognitiven Belastung und folglich eine geringere Ermüdung im Arbeitsalltag. Die verantwortlichen Kranbetreiber beurteilen das neue Steuerungskonzept aufgrund der erhöhten Intuitivität als deutlichen Sicherheitsgewinn im Vergleich zu aktuell etablierten Steuerungsansätzen, da die Wahrscheinlichkeit von Fehlbedienungen und folglich die Wahrscheinlichkeit von Schäden an Mensch und Material reduziert werden. Zudem ist eine Zeiteinsparung bei der Lastmanipulation und damit ein wirtschaftlicher Vorteil zu erwarten. Die Experten der Kran- und Komponentenhersteller bestätigen die Beurteilungen der Bediener und Betreiber und betonen zusätzlich mögliche Marktvorteile durch die Implementierung des innovativen und intuitiven Bedienkonzepts.

4.2.2. Online-Fragebogenstudie

Nach einer detaillierten Recherche und Analyse aktueller Bedienkonzepte für Lasthebelmittel mit entkoppelter Bedienerposition wurden die beiden Steuerungskonzepte Meisterschalter und Linearhebel als Basis zu untersuchender Systeme identifiziert. Diese beiden Steuerungskonzepte wurden – ausgehend von realen, auf dem Markt befindlichen Funksteuerungen – aus Gründen der Übersichtlichkeit, der besseren Vergleichbarkeit und zur Realisierung einer Analyse zur Intuitivität zunächst vereinfacht. Die Linearhebelsteuerung wird für die Fragebogenstudie als herkömmliche Einzelgelenksteuerung (d. h. jeder Linearhebel steuert eine Gelenk des Krans) verwendet, während die Meisterschaltersteuerung intuitiv eingesetzt wird (d. h. Joystickbewegung ist parallel zur Lastbewegung).

Sie bildeten zwei archetypische Ausprägungen von Bedienlösungen, deren ergonomische Eigenschaften im Folgenden mit einer breit gefächerten Nutzerstudie, realisiert mittels eines Onlinefragebogens, erörtert wurden. Zum Einsatz kam das professionelle Onlinebefragungstool LimeSurvey auf am Lehrstuhl für Ergonomie gehosteten Servern zum Schutz der Daten. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht die Analyse und anschließende Gestaltung der Systemreaktion auf Bewegungseingaben unterschiedlicher Nutzergruppen. Um größtmögliche Repräsentativität der Aussagen gewährleisten zu können, wird der Fragebogen an die gesamte mögliche Nutzerklientel – von Laien über technisch versierte bis hin zu Expertennutzern – verteilt. Mit Hilfe des Fragebogens und geeigneter Auswertung wird

die Erwartungshaltung sowie die Sicherheit der Steuereingabe für die beiden erwähnten Konzepte abgebildet. Über randomisiert dargebotene Videos verschieden schwieriger Bewegungsaufgaben, sollten vom Nutzer Steuerungseingaben für beide Steuerungskonzepte getätigt und bezüglich ihrer Intuitivität bewertet werden. Mit Hilfe der Simulationssoftware Blender wurden dabei vier unterschiedliche Perspektiven sowie drei unterschiedliche Verfahrenswege visualisiert. Anzahl der Fehler, benötigte Zeit zur Eingabe der Steuerungsbefehle sowie allgemeine Fragen zur Nutzerzufriedenheit, Akzeptanz und Intuitivität zeichnen dabei ein umfassendes Bild des Status Quo und beleuchten mögliche Potenziale zur Verbesserung.

Zur Untersuchung der Frage, welches Systemverhalten bei einer dynamischen Steuerung des Ladekrans am besten dem mentalen Modell des Menschen (vgl. Abschnitt 2.1.1) entspricht, wurde im Rahmen von [Xu-2018] eine Onlinestudie durchgeführt.

Hypothesen

Zur Beantwortung der Fragestellung wurden zwei Hypothesen gebildet, die – aufbauend auf einem Vergleich eines klassischen Linearhebelsystems mit einem intuitiven Meisterschaltersystem – die Potenziale der neuen Lösung bezüglich deren Gebrauchstauglichkeit aufzeigen sollen:

- H_1 Das neue Meisterschaltersystem ist effizienter, schneller zu erlernen und stellt die Benutzer zufriedener als das klassische Linearhebelsystem.
- H_2 Das neue Meisterschaltersystem ist sowohl für Novizen als auch Erfahrene effizienter, schneller zu erlernen und stellt die Benutzer zufriedener als das klassische Linearhebelsystem.

Da mentale Modelle zeitlich veränderliche, durch Lernprozesse gebildete, adäquate Effrenzkopien (vgl. [Bub-2015]) der realen Welt darstellen, ist hierbei besonders darauf zu achten, dass auch erfahrene Bediener mit dem neuen System gut zurecht kommen. Dies gilt besonders, da Vorerfahrung über die Zeit das mentale Modell verändern kann [Nie-2010].

Unabhängige Variablen

Entsprechend den zur Forschungsfrage gebildeten Hypothesen ergeben sich mit der Vorerfahrung und dem Steuerungskonzept zwei unabhängige Variablen (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Unabhängige Variablen der Online-Fragebogenstudie

Variable	Ausprägungen	Zuordnung
Vorerfahrung	Novizen, Erfahrene	between-subjects
Steuerungskonzept	Linearhebel, Meisterschalter	within-subjects

Abhängige Variablen

Zur Beantwortung der Hypothesen werden im Versuch sechs abhängige Variablen systematisch erhoben. Diese dienen zur Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit der beiden Systeme (siehe Tabelle 4-2). Die subjektiv erhobenen Daten zur Zufriedenstellung während der Nutzung werden hiermit analog zu Abbildung 2-3 in Abschnitt 2.1.3 mit dem *System Usability Questionnaire* [Bro-1996] erhoben.

Tabelle 4-2: Abhängige Variablen der Online-Fragebogenstudie

Variable	Einheit	Kommentar
Korrektheit der Eingabe	[%]	
Zeit	[s]	
Lerneffekt	Δt [s]	zum Zeitpunkt t_1, t_2, t_3
Sicherheit	[0-100]	subjektive Sicherheit bzgl. der eigenen Antworten
System Usability Scale	[0-100]	Likert-Skala [1-5] aggregiert
Präferenz	Ranking	

Versuchsaufbau

Da das neue Meisterschaltersystem eine innovative Entwicklung dieses Projekts darstellt, reichen die verfügbaren Informationen nicht aus, um die Hypothesen zu beantworten. Angesichts der Eigenschaften eines mentalen Modells – objektiv nicht messbar [Nie-1997] und von Mensch zu Mensch unterschiedlich – muss eine empirische Untersuchung der mentalen Modelle von einer massiven Population durchgeführt werden. Eine Fragebogenstudie mit geschlossenen Fragen kann dafür ein adäquates Ergebnis liefern. Im Vergleich zu anderen Datenerhebungsinstrumenten ermöglicht der Online-Fragebogen eine größere Stichprobemenge und kürzere Erhebungszeit [Moo-2012].

Um die abhängigen Variablen (AV) wie Richtigkeit, Steuerungszeit bzw. Sicherheit der eigenen Eingaben von den Probanden wirklichkeitsnah zu erheben, war es nötig, die Kranbewegungen im Online-Fragebogen anschaulich darzustellen. Texte, Bilder und andere klassische Aufgabentypen haben nur eine begrenzte Fähigkeit, den komplexen Steuerungsvorgang wiederzugeben. Daher wurde der Hauptteil des Fragebogens in Form von Animationsvideos präsentiert. Mit den eigens erstellten Videos können die Kranbewegungen

lebensecht in der Ich-Perspektive nachgebildet werden, sodass die Befragten die Steuerungsvorgänge persönlich an Stelle des Bedieners sehen und die dadurch erhobenen Daten möglichst weit mit den Ergebnissen echter Steuerungen übereinstimmen.

Als Muster für die Animation wurde der Ladekran PK 6500M von Palfinger gewählt. Das gewählte Modell besteht aus Kransockel, Kransäule, Hubarm, Knickarm, zwei Schubstücken und zwei Paar Hubzylindern. Die Kransäule kann sich auf horizontaler Ebene drehen. Hubarm und Knickarm sind in der Lage, sich unter Beschränkung der Hubzylinder auf vertikaler Ebene zu drehen. Schubstücke leisten Translationen in eigener Richtung. In der Realität ist der Ladekran häufig auf einem LKW montiert, in den Animationsvideos jedoch wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit hierauf verzichtet (vgl. Abbildung 4-6).

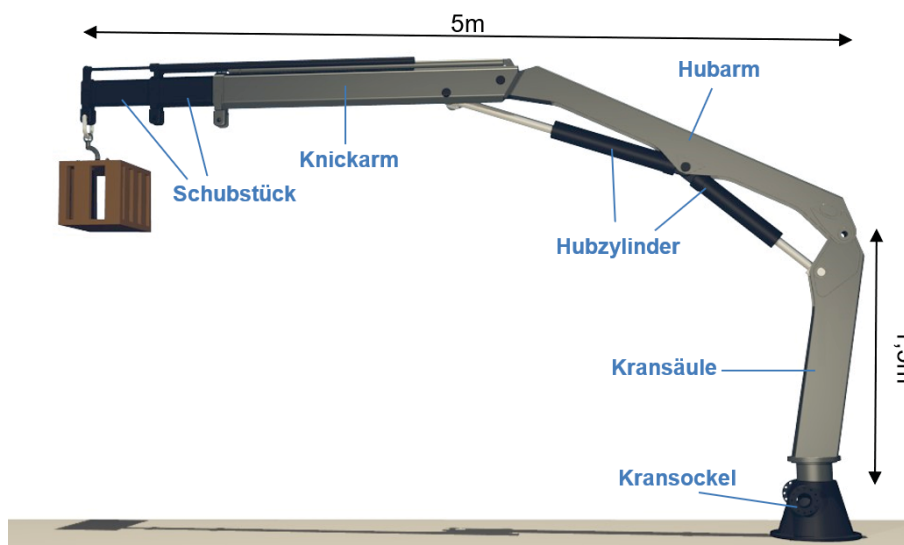


Abbildung 4-6: Das in den Animationsvideos verwendete Kranmodell PK 6500M der Firma Palfinger.

Da aufgrund der fehlenden Referenzpunkte in der Umwelt der Videos eine dynamische Bewegung der Ego-Perspektive zu Verwirrung geführt hätte, unterschiedliche Winkel und Entfernungen zum Kran und zur Last in der Realität aber den Alltag darstellen, wurden vier verschiedene Bedienerpositionen gewählt, aus denen die drei Bewegungen je Steuerungssystem dargestellt wurden. Eine Übersicht der implementierten Bewegungen sowie Bediener- bzw. Kamerapositionen ist Abbildung 4-7 zu entnehmen. Zu bemerken ist, dass zur Vereinfachung der Bedienung gänzlich auf Bewegungen in z-Richtung verzichtet wurde und lediglich eine Bewegung parallel zur x-y-Ebene dargestellt wurde. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der vollzogenen Bewegung wurden Start- und Endposition mit einem roten bzw. blauen 3D Marker versehen. Die Bewegung wurde zusätzlich mit einem Pfeil am simulierten Boden der Umgebung veranschaulicht. In der unteren rechten Ecke eines jeden Videos war zeitgleich die Bewegung aus der Vogelperspektive zu sehen, sodass sichergestellt war, dass alle Probanden die korrekte Kranbewegung erfassen konnten (für einen Screenshot aus einem der Videos siehe Abbildung 4-8).

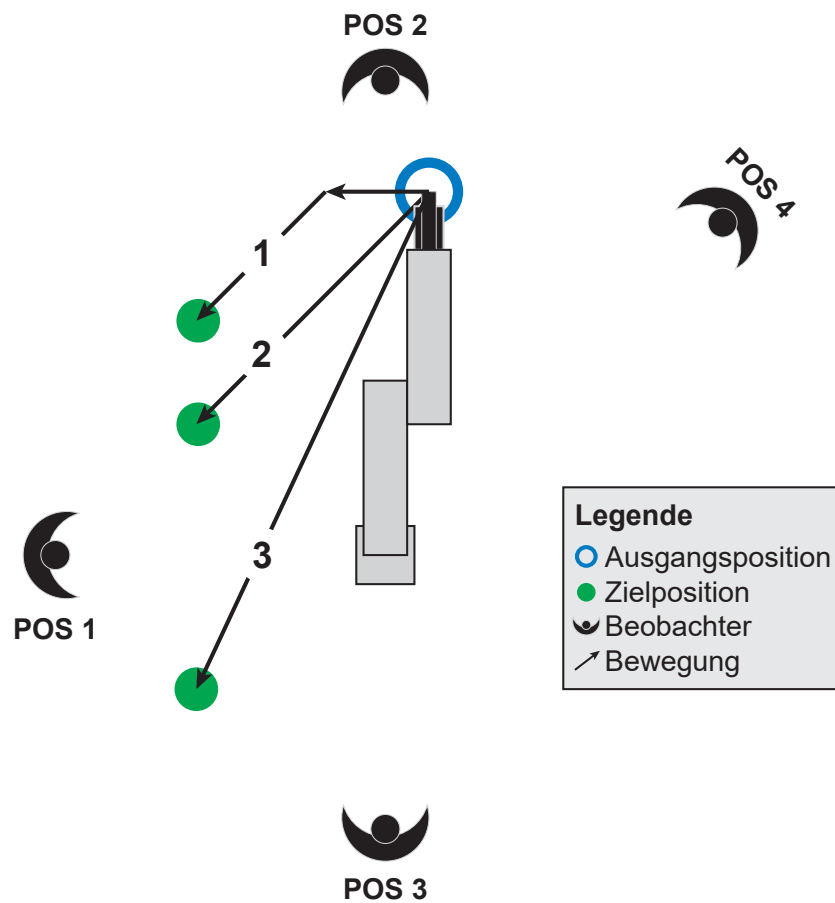


Abbildung 4-7: Die drei in den Videos dargestellten Bewegungen und relativ dazu die vier verwendeten Positionen.



Abbildung 4-8: Screenshot aus einem der Animationsvideos. Konkret wird Bewegung 3 aus Position 4 dargestellt (vgl. Abbildung 4-7). Von der Startposition (roter Marker) sollte die Last ca. in einem 120 deg Winkel zur Zielposition (blauer Marker) bewegt werden. Unterstützend werden ein Pfeil am Boden sowie die Vogelperspektive der Bewegung gleichzeitig animiert angezeigt.

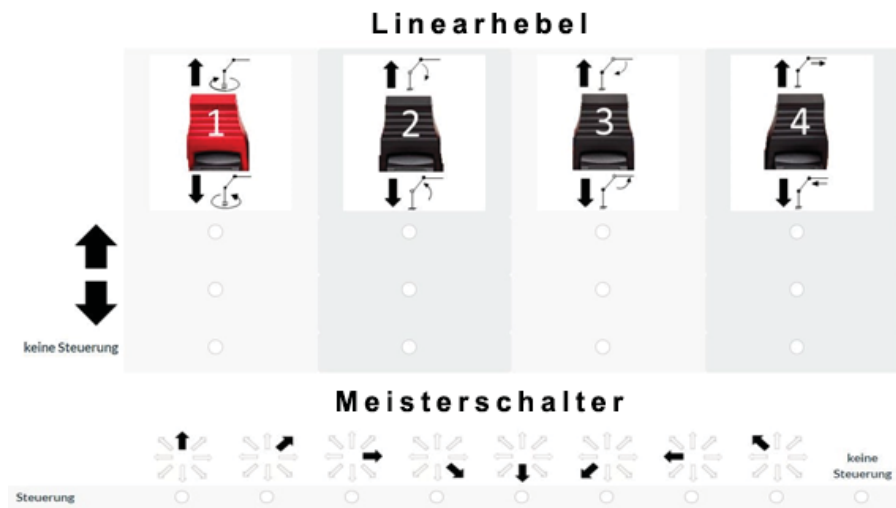


Abbildung 4-9: Antwortoptionen des Onlinefragebogens. Linearhebel (oben) und Meisterschaltersteuerung (unten) wurden jeweils unter den entsprechenden Bewegungsvideos (vgl. Abbildung 4-8) präsentiert.

Um empirische Daten wie Richtigkeit und Steuerungszeit zu gewinnen, wird von den Probanden verlangt, die Kranbewegungen wie in der Realität mit den zwei Steuerungselementen darzustellen. Im Fragebogen wird verlangt, die im Video gezeigte Bewegung durch Auswählen der für das aktuelle Steuerungssystem korrekten Antwortoptionen nachzustellen. Die Steuerungszeit wird hierbei während der Beantwortung automatisch detektiert. Durch den Vergleich der Antworten mit den Musterlösungen kann die Richtigkeit des jeweiligen Steuerungssystems berechnet werden.

Die Antwortoptionen des klassischen Linearhebelsystems sollen der echten Darstellung eines Linearhebelsystems entsprechen. Ein klassisches Linearhebelsystem zum Ladekran PK 6500M besteht aus vier Hebeln, die vier Antrieben entsprechen. Abbildung 4-9 zeigt die Darstellung der Antwortoptionen für beide Steuerungsalternativen. Oben in Abbildung 4-9 sind die vier Hebel der Linearhebelsteuerung aufgeführt. Die Symbole am Hebel zeigen entsprechend den Freiheitsgrad und die Bewegungsrichtung, wenn der Hebel vor- oder zurückgedrückt wird. Unter jedem Hebel gibt es drei Optionen, die jeweils nach vorne drücken, zurückziehen und keine Steuerung repräsentieren.

Das neue Meisterschaltersystem weist außer dem Hinzufügen der Übersetzungsfunktion der Koordinaten ansonsten den gleichen Aufbau wie normale Meisterschalter auf, einen auf 30° kontinuierlich auslenkbaren Stellhebel. Aber aufgrund der abgeschlossenen Fragen, die einerseits weniger aufwendig zu beantworten und andererseits eindeutig vergleichbar sind, wird die kontinuierliche Drehung des Meisterschalters in acht Richtungen diskretisiert und im Uhrzeigersinn im Antwortfeld dargestellt (vgl. Abbildung 4-9 unten).

Jedem Probanden werden beide Steuerungssysteme gezeigt. Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen und zufällige Eingaben zu kompensieren, werden drei Steuerungs-

aufgaben zu jeder Stufe präsentiert. Zur Vermeidung von Lern- und Reihenfolgeeffekten weisen alle drei Aufgaben eine unterschiedliche Bewegung auf und sind aus drei randomisierten Positionen repräsentiert. Insgesamt dürfen zwei Videos nicht komplett identisch sein. Da mit jedem Steuerungssystem die drei Bewegungen einmal durchgeführt werden heißt das, jede Bewegung wird in den zwei Steuerungssystemen aus verschiedenen Positionen dargestellt. Zum genauen Ablauf siehe auch Abbildung 4-10.

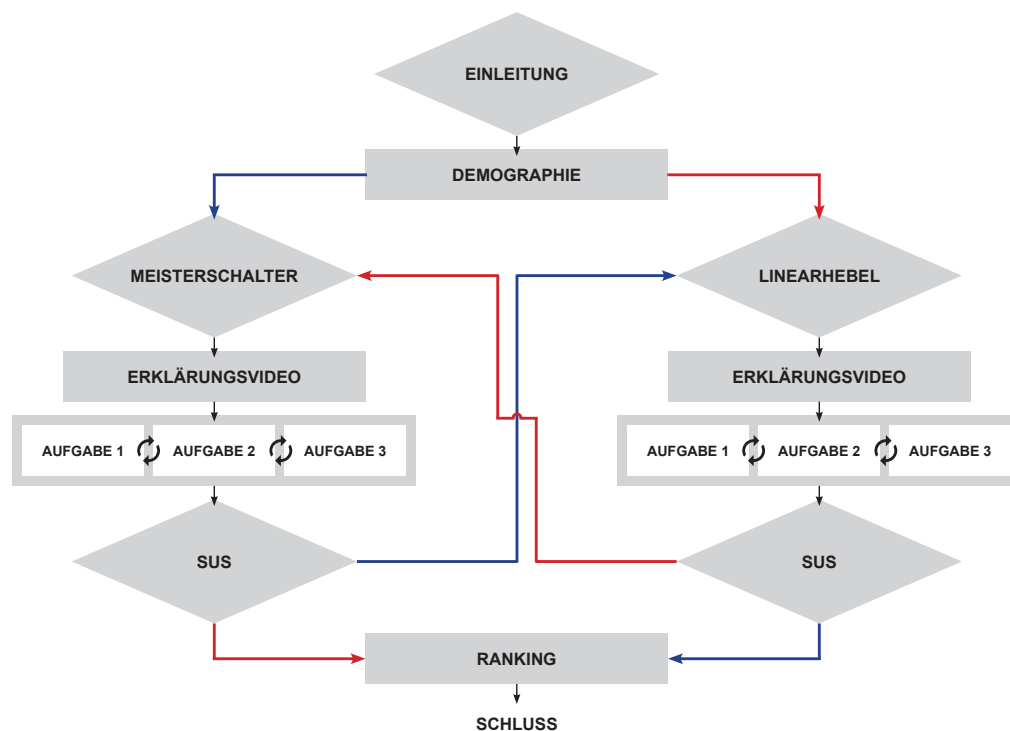


Abbildung 4-10: Ablauf des Online-Fragebogens. Der blaue, bzw. rote Pfad repräsentiert die Randomisierung des zuerst getesteten Systems. Innerhalb der beiden Systeme (Linearhebel oder Meisterschalter) wurden die drei zu lösenden Aufgaben ebenfalls in randomisierter Reihenfolge präsentiert.

Neigungen hin zu bestimmten Bewegungen und Positionen bzw. deren Reihenfolge können nicht völlig vermieden werden. Um bekannte und unbekannte personengebundene Störungen gleichmäßig zu verteilen, sind Randomisierungen notwendig. Drei Aufgaben in einem Steuerungssystem kommen in randomisierter Reihenfolge vor. Die Reihenfolge der zwei Steuerungssysteme ist ebenfalls randomisiert, was bedeutet, dass die Hälfte der Probanden zuerst Aufgaben vom Linearhebelsystem bekommt und die andere Hälfte zuerst vom Meisterschaltersystem. Somit kann ein Einfluss des Lerneffekts auf die Gesamtheit möglichst vermieden werden.

Um ausschließen zu können, dass Effekte aufgrund nicht-verstandener Interaktionsmöglichkeiten mit dem Fragebogen auftreten, wird vor Beginn einer Beantwortung der Aufgaben zu jedem Steuerungssystem ein Erklärungsvideo präsentiert. Jedes Video ist knapp

zwei Minuten lang und mit Ton im Fließtext synchronisiert. Es stellt Probanden zuerst die Funktionsweise des jeweiligen Steuerungssystems vor. Anschließend wird in dem Video anhand Beispielbewegung erklärt, wie die gewünschte Steuerung in den Antwortoptionen ausgewählt werden kann. Der genaue Wortlaut der Erklärung findet sich in Anhang B.

Da sich der Versuch mit intuitiver Steuerung beschäftigt, wird am Ende beider Erklärungsvideos noch einmal betont: *„Sollten Sie sich einmal nicht sicher sein, keine Panik. Beantworten Sie die Fragen am besten einfach möglichst spontan, aus dem Bauch heraus. Sie selbst können nichts falsch machen.“*

Ergebnisse

Probandenkollektiv: In einer vierwöchigen Erhebung wurden insgesamt 150 vollständige Antworten für die statistische Analyse gesammelt. Neben 150 vollständigen Antworten gab es noch eine große Menge unvollständiger Antworten.

Zur Ermöglichung der statistischen Methoden, die auf einem balancierten Versuchsdesign aufbauen, wurden alle innerhalb eines Steuerungssystems unvollständigen Datensätze aus der Auswertung entfernt. Aufgrund des Ausschlusses eines weiteren Probanden aus dem Datensatz der 150 vollständigen Antworten (die Steuerungszeiten waren allesamt geringer, als die Abspielzeiten der Bewegungsvideos) wurden schließlich insgesamt 149 Datensätze analysiert.

Das Probandenkollektiv bestand aus 45 Experten und 104 Novizen im Alter von 16 - 66 Jahren (MW = 31,62; SD = 11,93).

Korrektheit: Als eine AV wird jedem Probanden aus den drei Aufgaben zur Kransteuerung eine Richtigkeit pro Steuerungssystem zugeordnet. Bei Vergleichen aller drei Antworten mit der Musterlösung bestehen vier Möglichkeiten: Alle drei Aufgaben sind richtig, zwei davon sind richtig, eine ist richtig bzw. keine ist richtig. Entsprechend folgt eine prozentuale Richtigkeit von 100 %, 66.67 %, 33.33 % oder 0 %. Eine Aufgabe wird nur als richtig beurteilt, wenn alle Optionen der Aufgabe mit der Musterlösung übereinstimmen.

Abbildung 4-11 zeigt relative Häufigkeitsverteilungen der Korrektheit der vier kombinierten Stufen. Es zeigt sich, dass die Richtigkeit in beiden Vorerfahrungsgruppen bei Nutzung des Linearhebelsystems relativ gleichmäßig verteilt ist. Bei der Nutzung des Meisterschalersystems hingegen zeigt sich eine deutliche Tendenz hin zu höherer Korrektheit.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktorstufen Vorerfahrung (between) und Steuerungssystem (within) zeigt einen signifikanten Effekt des Steuerungssystems auf

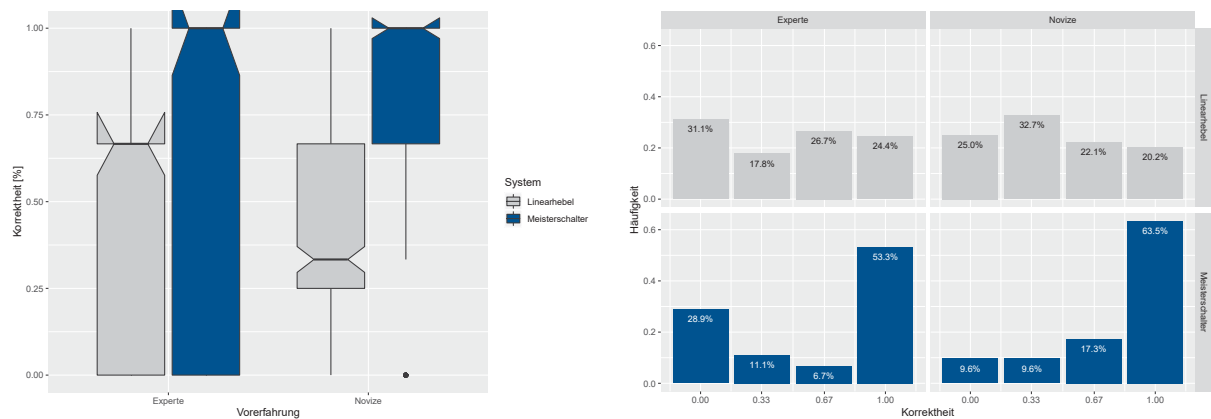


Abbildung 4-11: Links: Boxplots der Korrektheit, geteilt in die Vorerfahrung und das Steuerungssystem. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands. Rechts: Histogramm der korrekten Eingaben, aufgeteilt in die Vorerfahrung (Experte vs. Novize) und das Steuerungssystem (Linearhebel vs. Meisterschalter).

Tabelle 4-3: ANOVA für Gruppenunterschiede bzgl. der Korrektheit

	df	F	p	η^2
System	1, 147	26.98	<.001	.114
Vorerfahrung	1, 147	2.14	.146	.007
System * Vorerfahrung	1, 147	4.68	.032	.012

die Korrektheit der Eingabe ($F(1,147) = 26.98$, $p < .001$, $\eta^2 = .114$). Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass Nutzer mit dem Meisterschaltersystem häufiger richtig liegen als mit dem Linearhebelsystem. Die Vorerfahrung zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Korrektheit (vgl. Tabelle 4-3). Der Interaktionseffekt zwischen Vorerfahrung und Steuerungssystem zeigt einen signifikanten Einfluss auf die Korrektheit der Eingabe ($F(1,147) = 4.86$, $p = .032$, $\eta^2 = .012$). Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass Experten wie Novizen mit dem Linearhebelsystem annähernd gleich häufig richtig liegen. Doch während beide Gruppen mit dem Meisterschaltersystem häufiger richtige Eingaben treffen, liegen Novizen mit dem Meisterschaltersystem signifikant häufiger richtig als Experten.

Steuerungszeit: In LimeSurvey wird der Zeitverbrauch für jede Seite automatisch detektiert. In diesem Fragebogen verteilen sich alle Steuerungsaufgaben auf eine einzelne Seite, deswegen kann die Bedienzeit für jede Frage durch eine Sammlung der detektierten Zeiten pro Seite ermittelt werden. Die Bedienzeit pro Aufgabe beinhaltet Zeiten bezogen auf das Videoabspielen, das Verstehen, Überlegen, Beurteilen bis zum Auswählen der Antwortoptionen. Diese entsprechen genau der Steuerungszeit in der Wirklichkeit, welche auch aus der Vorstellung der Bewegung, Anpassung an das System, Umsetzung usw. besteht.

Abbildung 4-12 zeigt links Boxplots der jeweiligen Steuerungszeit, abhängig von Vorerfahrung und Steuerungssystem. Zu erkennen ist, dass beide Nutzergruppen mit dem Meisterschaltersystem geringere Steuerungszeiten aufweisen als mit dem Linearhebelsystem.

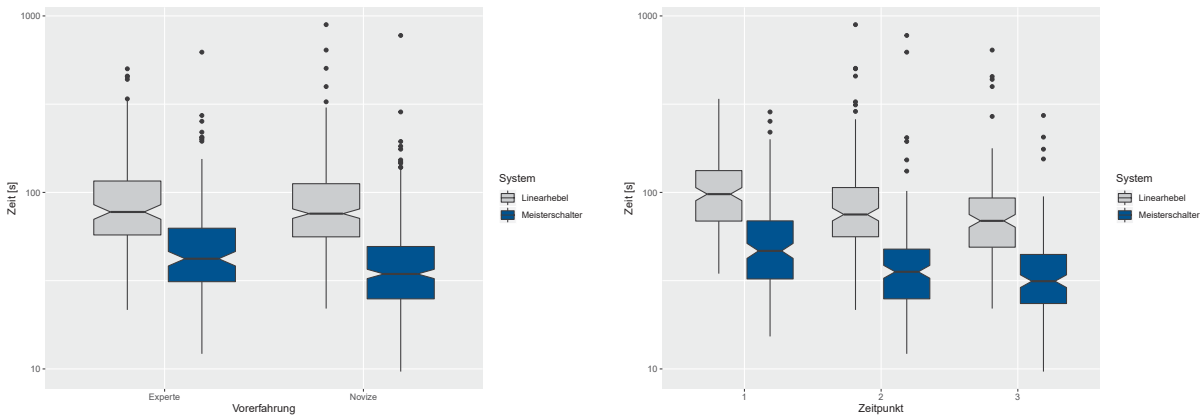


Abbildung 4-12: Links: Boxplots der Steuerungszeit, geteilt in die Vorerfahrung und das Steuerungssystem. Rechts: Boxplots der Steuerungszeit, geteilt in den Versuchszeitpunkt und das Steuerungssystem. Abgebildet sind der Median mit einem 95%-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands. Man beachte die aufgrund der Ausreißer logarithmierte Y-Achse.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktorstufen Vorerfahrung (between) und Steuerungssystem (within) zeigt einen signifikanten Effekt des Steuerungssystems auf die Steuerungszeit ($F(1,147) = 117.74$, $p < .001$, $\eta^2 = .107$). Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass Nutzer mit dem Meisterschaltersystem schneller antworten als mit dem Linearhebelsystem. Die Vorerfahrung zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Steuerungszeit. Ebenso wenig ist ein Interaktionseffekt zwischen Vorerfahrung und Steuerungssystem vorhanden (vgl. Tabelle 4-4 links).

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktorstufen Steuerungssystem (within) und Erhebungszeitpunkt (within) zeigt einen signifikanten Effekt des Steuerungssystems ($F(1,148) = 118.5$, $p < .001$, $\eta^2 = .107$) und des Steuerungszeitpunkts ($F(2,592) = 9.88$, $p < .001$, $\eta^2 = .016$) auf die Steuerungszeit. Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass Nutzer mit dem Meisterschaltersystem schneller antworten als mit dem Linearhebelsystem. Ebenso zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme zwischen den drei Bedienzeitpunkten unabhängig vom Steuerungssystem. Es ist kein Interaktionseffekt zwischen Vorerfahrung und Steuerungssystem vorhanden (vgl. Tabelle 4-4 rechts).

Gebrauchstauglichkeit: Die Gebrauchstauglichkeit wurde in dieser Studie mit zwei Erhebungsmethoden erfasst. Zum einen dem System Usability Scale, zum anderen einer subjektiven Einschätzung der Probanden nach jeder Bewegungsaufgabe zu ihrer Sicherheit bezüglich der abgegebenen Antwort (vgl. Abschnitt Versuchsaufbau auf Seite 53).

Tabelle 4-4: ANOVA für Gruppenunterschiede bzgl. der Steuerungszeit und Lerneffekte

	Steuerungszeit					Lerneffekt			
	df	F	p	η^2		df	F	p	η^2
System	1, 147	117.74	<.001	.107	System	1, 148	118.5	<.001	.107
Vorerfahrung	1, 147	3.50	.063	.006	Zeitpunkt	2, 592	9.88	<.001	.016
System * Vorerfahrung	1, 147	0.11	.741	.000	System * Zeitpunkt	2, 592	0.14	.866	.000

Abbildung 4-13 zeigt links Boxplots des jeweiligen Ergebnisses des System Usability Scale, abhängig von Vorerfahrung und Steuerungssystem. Zu erkennen ist, dass beide Nutzergruppen dem Meisterschaltersystem eine höhere Gebrauchstauglichkeit attestieren als dem Linearhebelsystem. In derselben Abbildung rechts sind Boxplots der jeweiligen Sicherheit bezüglich der abgegebenen Antworten, abhängig von Vorerfahrung und Steuerungssystem, abgebildet. Es zeigt sich, dass sowohl Novizen als auch Experten sich bei ihren Antworten beim Meisterschaltersystem gegenüber dem Linearhebelsystem sicherer waren.

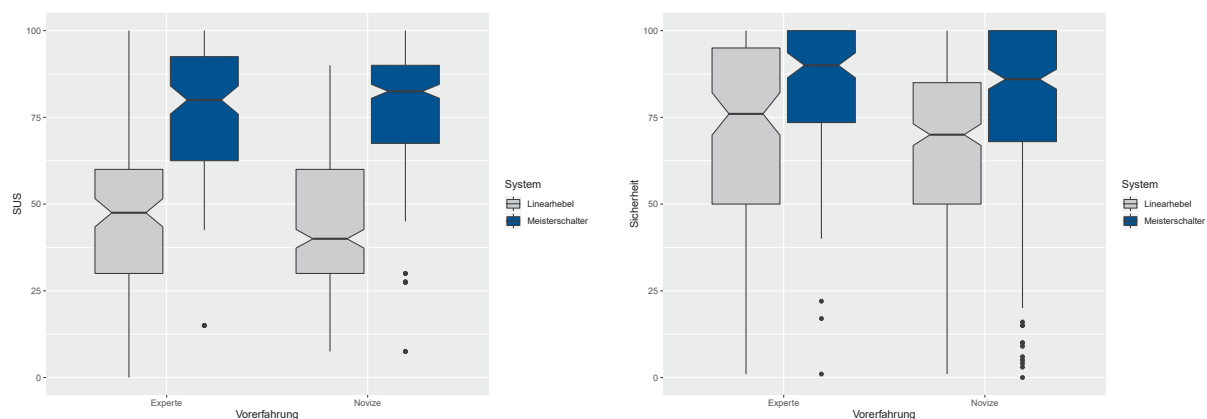


Abbildung 4-13: Links: Boxplots der Gebrauchstauglichkeit erfasst via System Usability Scale, geteilt in die Vorerfahrung und das Steuerungssystem. Rechts: Boxplots der Sicherheit in die eigenen Antworten, erfasst via Schieberegler, geteilt in die Vorerfahrung und das Steuerungssystem. Abgebildet sind der Median mit einem 95%-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktorstufen Vorerfahrung (between) und Steuerungssystem (within) zeigt einen signifikanten Effekt des Steuerungssystems auf die Gebrauchstauglichkeit ($F(1,147) = 202.68$, $p < .001$, $\eta^2 = .387$) und die Sicherheit bezüglich der gegebenen Antworten ($F(1,147) = 40.03$, $p < .001$, $\eta^2 = .055$). Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass Nutzer das Meisterschaltersystem als gebrauchstauglicher empfinden und sich sicherer bezüglich ihrer Antworten sind, als mit dem Linearhebelsystem. Die Vorerfahrung zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Steuerungszeit. Ebenso wenig ist ein Interaktionseffekt zwischen Vorerfahrung und Steuerungssystem vorhanden (vgl. Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: ANOVA für Gruppenunterschiede bzgl. der Gebrauchstauglichkeit (SUS) und der Sicherheit in die eigenen Antworten

	SUS				Sicherheit			
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2
System	1, 147	202.68	<.001	.387	1, 147	40.03	<.001	.055
Vorerfahrung	1, 147	0.02	.9	.000	1, 147	2.05	.155	.008
System * Vorerfahrung	1, 147	0.81	.369	.002	1, 147	0.01	.908	.000

4.2.3. Fazit

Basierend auf den Analysen lässt sich folgende Aussage treffen: Das intuitive Meisterschaltersystem entspricht dem mentalen Modell des Menschen generell besser als das klassische Linearhebelsystem. Diese Schlussfolgerung ist sowohl ein objektives Ergebnis der Auswertung der Steuerungsaufgaben als auch eine subjektive Beurteilung der Probanden. Durch eine Analyse der AV Richtigkeit, Bedienzeit und Zufriedenheit (SUS + Sicherheit in die eigenen Angaben) lassen sich beide in Abschnitt 4.2.2 postulierten Alternativhypothesen annehmen. Das heißt, das neue Meisterschaltersystem ist effektiver und effizienter und zufriedenstellender in beiden untersuchten Bedienergruppen mit evtl. unterschiedlichen mentalen Modellen. Zur leichteren Interpretation der Gebrauchstauglichkeit, lässt sich der SUS-Score den üblichen Bewertungsklassen von A, B, C usw. zuordnen, die jeweils einem Notenintervall von zehn entsprechen [Ban-2008]. Hierbei fällt das Linearhebelsystem in die Klasse F (inakzeptabel). Das Meisterschaltersystem wird Klasse C (gut) zugeteilt und zeigt sich als ein gebrauchstaugliches System.

Überraschend ist das Ergebnis des Lerneffekts. Dieser unterscheidet sich für beide Benutzergruppen unabhängig vom System nicht. Zwar ist das Meisterschaltersystem grundsätzlich schneller zu bedienen, jedoch zeigen beide Systeme in beiden Gruppen eine signifikante Abnahme der Zeit abhängig vom Messzeitpunkt. Die Hypothesen vermuten, dass Novizen beim klassischen Linearhebelsystem schlechtere Ergebnisse zeigen als Erfahrene. Als Maßstab werden die gleichen Variablen analysiert, Richtigkeit, Steuerungszeit und Sicherheit der Antworten. Aber darunter haben Erfahrene nur bei der Sicherheit der Antworten signifikant höhere Werte gezeigt und bei den anderen zwei Variablen nicht. Vor allem bei der Richtigkeit, die als grundsätzliches Bezugsmaß einer Steuerung gilt, sind die Ergebnisse beider Erfahrungsgruppen nicht signifikant unterschiedlich. Dafür gibt es vermutlich zwei Hauptgründe:

Zunächst verfügen die meisten Probanden über eine hohe Lernfähigkeit. Da den Novizen das Linearhebelsystem fremd war, spielt die Lernfähigkeit bei ihnen eine besonders wichtige Rolle. Laut den persönlichen Informationen haben über 70 % der Probanden mindestens einen Abiturabschluss. Über die Hälfte der Probanden ordnen sich dem technischen

Bereich zu. Es ist entsprechend nachvollziehbar, dass die Novizen unserer Stichprobe ein besseres Ergebnis aufweisen als in der Grundpopulation zu erwarten.

Zweitens könnte die Untersuchungsmethode über Videos am Computer einen großen Einfluss darstellen. Erfahrene sind an die Kransteuerung im Alltag gewöhnt. Aber die Gestaltung der Kransteuerung in Form von computerbasierten Multiple-Choice-Fragen widerspricht der Realität. Statt kontinuierlicher Bedienung durch Vor- und Zurückbewegung der Linearhebel sowie entsprechender Rückmeldung durch Zustandsänderungen in der wirklichen Welt werden die erwünschten Steuerungen im Fragebogen mit diskreten Klicks der Maus umgesetzt. Entsprechend geht es um eine Nachvollzugs- statt einer Herstellungsaufgabe.

Da Erfahrene tatsächlich sicherer mit ihren Antworten zum Linearhebelsystem sind, ist nachvollziehbar, dass sie die Steuerungsaufgaben mit einem Selbstbewusstsein in gewöhnlicher Weise beantwortet haben. Zwei Erfahrene haben die Videos kommentiert. Einer meinte, dass „ein fester Bezugspunkt das Denken noch mehr unterstützt“. Und der andere vertritt die Meinung, dass „die Bewegungen des Kranarms in den Videos nicht ganz identifizierbar sind“. Der ständige Wechsel von Bezugspunkten kann Verwirrung hervorrufen. Hauptsächlich war die unklare Bewegung des Kranarms. Anders als Novizen, die den Erklärungsvideos folgen und diese dann ebenfalls mit Hilfe der Vogelperspektive nachstellen, konzentrieren sich die Erfahrenen mehr auf die einzelnen Bewegungen. Die einzelnen Bewegungen könnten aufgrund Beschränkung der Animation ohne die Vogelperspektive anders interpretiert werden. Infolgedessen ist das schlechtere Ergebnis der Erfahrenen verständlich.

Vor allem im Hinblick auf die Bewegungsvideos gibt es weitere Limitationen. Die Erklärungsvideos dienen dazu, eine vollumfängliche Verständlichkeit der zu tätigen Eingaben sicherzustellen. Aber zu konkrete Erklärungsvideos, vor allem bei dem neuen Meisterschaltersystem, können das Antwortverhalten beeinflussen. Insbesondere die Darstellung der Vogelperspektive und der Orientierungspfeile, können Probanden zu einer bestimmten Steuerungsrichtung mit dem neuen Meisterschaltersystem verleiten. Daher sollte noch eingehend untersucht werden, ob das neue Meisterschaltersystem tatsächlich so schnell erlernbar ist. Ein weiterer Faktor, der eine Abweichung der Testergebnisse von der Realität verursacht, ist der Lerneffekt. Es ist statistisch nachgewiesen, dass der Zeitbedarf bei beiden Steuerungssystemen stetig sinkt. Schnell ist gelernt, wie mit den Steuerungsaufgaben umzugehen ist. Da sich jedoch alle zu bearbeitenden Aufgaben voneinander unterscheiden (Position und Bewegungsrichtung, siehe Abschnitt 4.2.2) deutet dies darauf hin, dass die Lerneffekte auch auf das verbesserte Erlernen im Umgang mit dem Fragebogen zurückzuführen sein könnten. Außerdem fehlt bei computerbasierten Animationsvideos das visuelle

Feedback für die Steuerungseingaben, ergo die Möglichkeit, eigene Fehler zu erkennen und zu korrigieren.

Angesichts des überwältigenden Vorteils des Meisterschalters gegenüber dem Linearhebel aus der Fragebogenstudie kann die Forschungshypothese dennoch bestätigt werden:

Das neue Meisterschaltersystem ist sowohl für Novizen als auch Erfahrene effizienter, schneller zu erlernen und zufriedenstellender als das klassische Linearhebelsystem.

Die Fragestellung über das Systemverhalten, das dem mentalen Modell des Menschen bei dynamischer Steuerung am besten entspricht, kann also wie folgt beantwortet werden: Bei dem neuen Meisterschaltersystem, also einem System mit Joysticks, wobei direkt eine Vorgabe der Hakenbewegung erfolgt (= Auslegerspitzensteuerung), und das sich auf die Perspektive des Nutzers zur Last einstellt, entspricht das Systemverhalten am ehesten dem mentalen Modell des Bedieners.

4.3. Untersuchung des Nutzer-Referenz-Koordinatensystems (NRK)

Zur Untersuchung der Frage, welches Nutzer-Referenz-Koordinatensystem bei einer dynamischen Steuerung des Ladekrans am besten dem mentalen Modell des Menschen (vgl. Abschnitt 2.1.1) entspricht, wurde im Rahmen der Studienarbeit von Nico Hermann [Her-2019] eine Probandenstudie in der virtuellen Realität durchgeführt.

4.3.1. Position des NRK

Aufgrund der bereits beschriebenen Notwendigkeit der Orientierung des Koordinatensystems am Nutzer und der Tatsache, dass sich Nutzer mit einer Funksteuerung frei um die Last bewegen können, stellt sich die Frage, wo exakt der Mensch sein inneres Koordinatensystem verortet.

Hypothesen

Ziel dieser Studie ist es herauszufinden, an welchem Koordinatensystem sich Personen bei der Steuerung von Lasten orientieren, wenn ihnen kein externes Koordinatensystem durch das Lasthebemittel aufgezwungen wird. Eine erste Möglichkeit ist ein Koordinatensystem mit Ursprung im Kopf. Diese Möglichkeit erscheint als wahrscheinlich, da für die Orientierung wichtige Sinneseindrücke wie Sehen, Hören und Gleichgewicht von der Ausrichtung

unseres Kopfes abhängen und im Gehirn verarbeitet werden. Im Jahr 2005 entdeckten May-Britt Moser und Edvard Moser im Gehirn von Ratten spezielle Neuronen, sogenannte Rasterzellen, die für die Orientierung der Tiere verantwortlich sind [Haf-2005]. Diese Rasterzellen erzeugen im Gehirn eine räumliche Karte der Umwelt. Diese wegweisende Entdeckung, für die May-Britt Moser und Edvard Moser im Jahr 2014 der Nobelpreis für „Physiologie oder Medizin“ verliehen wurde, bestärkt die Vermutung, dass das Gehirn und damit der Kopf Ursprung des menschlichen Koordinatensystems ist.

Eine zweite Möglichkeit ist ein Koordinatensystem mit Ursprung in den Händen. Da eine Funksteuerung (Controller) in den Händen gehalten wird, bilden die Hände eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Lasthebemittel. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass ein Mensch sein internes Koordinatensystem bei der Bedienung eines Lasthebemittels in seine Hände verlagert, selbst wenn sich sein Koordinatensystem bei anderen Tätigkeiten nicht zwangsweise dort, sondern beispielsweise im Kopf befindet. Aus diesen beiden Möglichkeiten lassen sich für den Probandenversuch drei Hypothesen formulieren:

- H_1 Das Koordinatensystem Kopf benötigt geringere Bedienzeiten als das Koordinatensystem Controller.
- H_2 Das Koordinatensystem Kopf ermöglicht kürzere Fahrwege als das Koordinatensystem Controller.
- H_3 Das Koordinatensystem Kopf produziert weniger Fehlbedienungen als das Koordinatensystem Controller.

Unabhängige Variablen

Entsprechend den zur Forschungsfrage gebildeten Hypothesen ergibt sich mit dem verwendeten Koordinatensystem (Kopf oder Controller) eine unabhängige Variable, die im Between-Subjects-Design getestet wurde.

Abhängige Variablen

Zur Beantwortung der Hypothesen werden im Versuch drei abhängige Variablen systematisch erhoben. Diese dienen zur Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit der beiden Systeme (siehe Tabelle 4-6).

Versuchsaufbau

Der gesamte Versuch fand in den Räumen des Lehrstuhls für Ergonomie statt unter Zuhilfenahme der Virtual Reality Brille HTC VIVE Pro mit zwei Basistationen der zweiten Generation und einem VIVE Tracker 2018 in der virtuellen Realität (entwickelt in Unity). Der für

Tabelle 4-6: Abhängige Variablen der Probandenstudie in virtueller Realität

Variable	Einheit	Kommentar
Zeit	[s]	
Abweichung vom Idealweg	[-]	Durchschnittliche Abweichung von der Ideallinie
Fehlbedienung	[°]	Als Fehlbedienung zählt in diesem Probandenversuch eine Joystickauslenkung, die von der eigentlichen Zielrichtung der Last um mindestens 45° abweicht. Je stärker die Joystickauslenkung dabei in die falsche Richtung zeigt, als desto schwerwiegender wird die Fehlbedienung interpretiert.

den VR-Versuch verwendete Raum hat eine begehbare Grundfläche von 4 m × 4 m. Diese muss frei von herumliegenden, herabhängenden oder hervorstehenden Gegenständen sein, um Versuchspersonen während der Simulation nicht zu gefährden.

Als Controller dient ein DUALSHOCK 4 Controller für die Playstation 4. Damit der Controller auch in der virtuellen Realität während des Versuchs sichtbar ist, wird ein 3D-Modell des Controllers importiert und mit Hilfe eines Vive-Trackers in Position und Lage in die VR-Umgebung übertragen. Der Input des echten Controllers wird dabei zusätzlich auf das Modell des virtuellen Controllers gemappt, damit jede Raum-, Knopf- und Joystickbewegung des echten Controllers auch auf dem virtuellen Modell angezeigt wird. Des Weiteren wird im Versuch zur Bewegung der Last der rechte Joystick verwendet. Dies wird mit knapp über dem Controller schwebenden Pfeilen hervorgehoben (Abbildung 4-14).



Abbildung 4-14: Die virtuelle Entsprechung des real gehaltenen Controllers inkl. Veranschaulichung der Bewegungsrichtungen am rechten Joystick.

Für den Probandenversuch soll die Steuerung des Krans wahlweise von der Kopf- oder Controller-Ausrichtung abhängig sein. Die Ausrichtung des Kopfes wird durch das VR-Headset erkannt, die des Controllers durch den Tracker.

Kopf und Controller können nun getrackt und auf die in formulierten Hypothesen getestet werden. Durch die Verwendung von virtueller Realität werden annähernd reale Versuchsbedingungen geschaffen. Wie bei einer tatsächlichen Laststeuerung sollen Probanden während des Versuchs zwischen verschiedenen Standpunkten wechseln. In Abbildung 4-15 sind die vier möglichen Positionen der Bediener (A-D) sowie die acht möglichen Zielpositionen (1-8) links schematisch dargestellt. Rechts zeigt die Abbildung eine Vogelperspektive der letzten Endes verwendeten virtuellen Umgebung inklusive derselben vier Ausgangs- und acht Zielpositionen. Die Mitte des Kreises markiert die Ursprungsposition der Last, von der diese wegbewegt werden sollte.

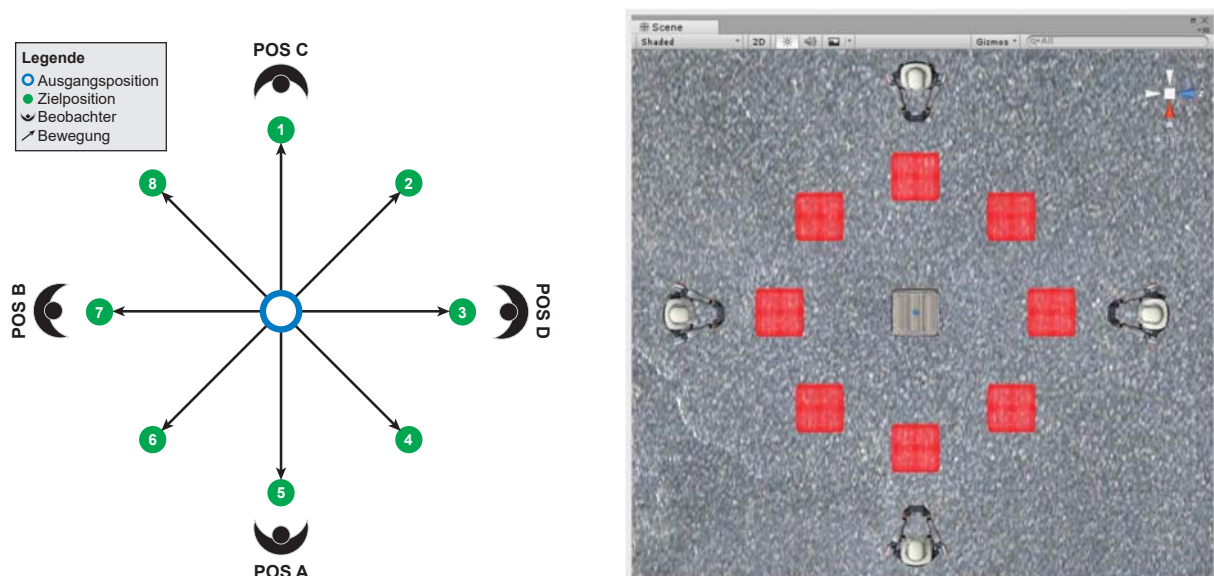


Abbildung 4-15: Links: Schematische Darstellung der Ausgangsposition und der acht möglichen Zielpositionen der Last sowie der 4 möglichen Bedienerpositionen. Rechts: Umsetzung in der virtuellen Realität.

Um die Systeme Kopf und Controller hinsichtlich der formulierten Hypothesen bewerten zu können, werden verschiedene Körperausrichtungen untersucht. Hierbei können beide Koordinatensysteme nur dann eindeutig unterschieden werden, wenn Kopf und Controller in verschiedene Richtungen zeigen. Deshalb wird neben der Probandenposition und dem Ziel der Last auch die Körperausrichtung variiert. Während der Versuche soll der Blick des Probanden stets auf die Last gerichtet sein, während der Controller abwechselnd in Richtung der Last oder nach links (aus Sicht des Probanden) zeigt. Um den Probanden beim Einnehmen der korrekten Körperausrichtung zu unterstützen, wird als Hilfestellung ein kleiner Roboter eingeblendet (Abbildung 4-16), der die richtige Körperausrichtung demonstriert. Während des Versuchs markiert ein weißer Kreis hinter dem Roboter die optimale Standposition des Probanden.

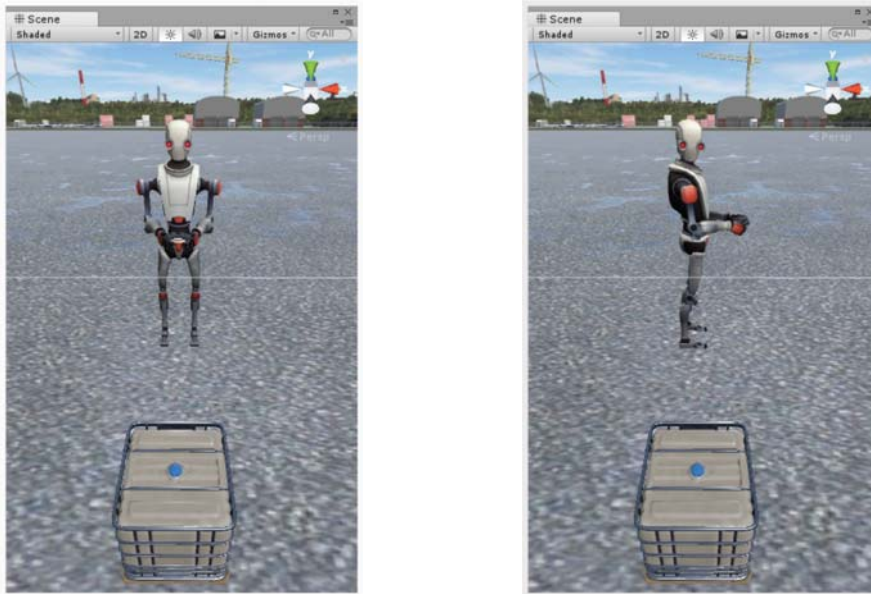


Abbildung 4-16: Der in der virtuellen Realität dargestellte Roboter, der Probanden die einzunehmende Körperposition veranschaulicht. (Links: gleich; Rechts: unterschiedlich)

Um dafür zu sorgen, dass Probanden während eines Durchlaufs stets die korrekte Position, Kopfausrichtung und Controllerausrichtung beibehalten, wurde der Status dieser drei Variablen stets in einem Indikatorfeld am oberen linken Rand des Gesichtsfeldes der Probanden veranschaulicht. Dieses besitzt die drei Felder *Position*, *Blickrichtung* und *Controllerausrichtung*. Sobald eines der drei Felder eine Abweichung zur derzeitigen Vorgabe erkennt leuchtet es rot, ansonsten grün. Sobald alle drei Bedingungen erfüllt sind, verschwindet das Indikatorfeld, um den Probanden nicht die Sicht zu versperren.

Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten werden Position, Ausrichtung und Ziel permutiert. Dies erfolgt mithilfe eines griechisch-lateinischen Quadrates der Ordnung 8. Die Kombination von Position (A, B, C, D) und Ausrichtung (gleich, unterschiedlich) ist dabei als eigenständige Variable zu betrachten, da sich griechisch-lateinische Quadrate nur mit 2 Faktoren aufstellen lassen. Als zweiter Faktor dienen die Zielpositionen (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Die Permutation ergibt 64 verschiedene Kombinationen.

Jeder Proband durchläuft auf jeder der vier Startpositionen (A-D) je zwei Durchläufe (Ausrichtung von Kopf und Steuerung gleich bzw. unterschiedlich). Nach jedem erfolgreich abgeschlossenen Durchlauf springt der Versuch automatisch zum nächsten Szenario. Nach Beenden des letzten Szenarios startet der Versuchsleiter dieselbe Testreihe erneut.

Ergebnisse

Probandenkollektiv: Insgesamt nahmen am Probandenversuch 34 Personen teil, 2 davon an Vorversuchen, die nicht in das Endergebnis einfließen. Von den 32 Probanden

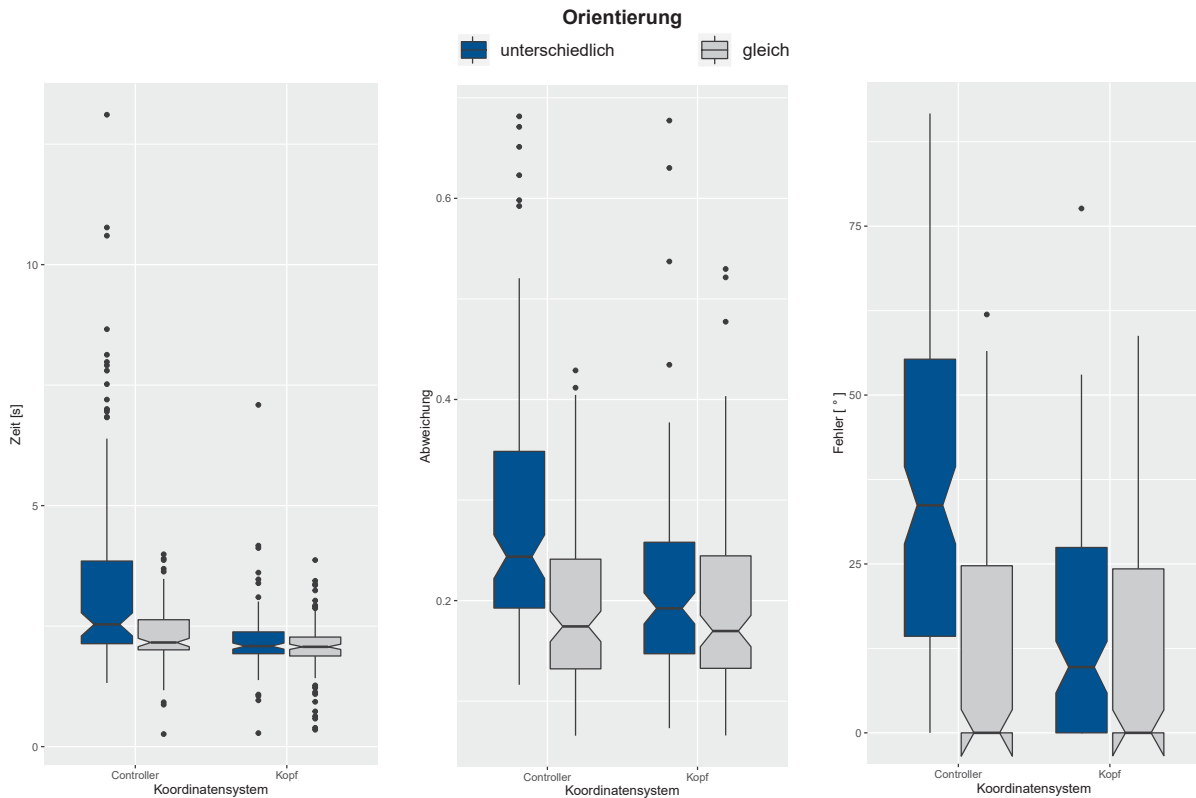


Abbildung 4-17: (Links: Zeit, Mitte: Abweichung; Rechts: Fehlbedienung) Boxplots, geteilt in das Koordinatensystem und das Steuerungssysteme Orientierung. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.

waren 21 männlich und 11 weiblich. Der jüngste Proband war 19 Jahre alt, der älteste 31 Jahre, wobei das Durchschnittsalter bei 23.72 Jahren lag und eine Standardabweichung von 3.48 Jahren aufwies.

Bedienzeit: Je kürzer die benötigte Zeit, desto effizienter ist die verwendete Steuerungsvariante. In Abbildung 4-17 links ist die benötigte Zeit der beiden Steuerungsvarianten Kopf und Controller aufgeteilt in die beiden Gruppen gleicher und unterschiedlicher Orientierung als Boxplot mit Ausreißern dargestellt. Ein t-test für unabhängige Stichproben nach Welch ergab zwischen den beiden Koordinatensystemen Kopf ($M = 2.88$; $SD = 1.68$) und Controller ($M = 2.14$; $SD = 0.62$) einen signifikanten Unterschied bezüglich der Bedienzeit ($t(322.96) = 6.614$; $p < .001$).

Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass Probanden bei der Bedienung mit dem Kopfkoordinatensystem weniger Zeit benötigen.

Verfahrweg: Je geringer die Abweichung von der Ideallinie, desto effektiver ist die verwendete Steuerungsvariante. In Abbildung 4-17 Mitte ist die Abweichung von der Ideallinie

für beide Steuerungsvarianten Kopf und Controller aufgeteilt in die beiden Gruppen gleicher und unterschiedlicher Orientierung als Boxplot mit Ausreißern dargestellt. Ein t-test für unabhängige Stichproben nach Welch ergab zwischen den beiden Koordinatensystemen Kopf ($M = 0.204$; $SD = 0.093$) und Controller ($M = 0.237$; $SD = 0.114$) einen signifikanten Unterschied bezüglich der Abweichung ($t(489.13) = 3.576$; $p < .001$).

Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass Probanden bei der Bedienung mit dem Kopfkordinatensystem weniger Abweichung zur Ideallinie produzieren.

Fehlbedienung: Je geringer die Abweichung von der Ideallinie, desto effizienter ist die verwendete Steuerungsvariante. In Abbildung 4-17 rechts sind die Fehlbedienungen für beide Steuerungsvarianten Kopf und Controller aufgeteilt in die beiden Gruppen gleicher und unterschiedlicher Orientierung als Boxplot mit Ausreißern dargestellt. Ein t-test für unabhängige Stichproben nach Welch ergab zwischen den beiden Koordinatensystemen Kopf ($M = 24.0$; $SD = 24.2$) und Controller ($M = 13.4$; $SD = 16.9$) einen signifikanten Unterschied bezüglich der Abweichung ($t(455.62) = 5.742$; $p < .001$).

Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass Probanden bei der Bedienung mit dem Kopfkordinatensystem weniger Fehler produzieren.

4.3.2. Ausrichtung und Veränderlichkeit des Nutzer-Referenz-Koordinatensystems

In Summe lässt sich also festhalten, dass Probanden mit dem Kopfkordinatensystem im Durchschnitt weniger Zeit benötigen, einen direkteren Weg zwischen Ausgangs- und Zielposition fahren und weniger gravierende Fehler produzieren. Der Mensch scheint sein Ich-Koordinatensystem also mit Ursprung im Kopf zu verorten. Entsprechend spräche aus numerischer Sicht alles dafür, eine Steuerung, die in der Lage ist den Kopf des Bedieners zu tracken und das Koordinatensystem entsprechend anzupassen, weiterzuverfolgen.

Die Autoren argumentieren jedoch, dass aus folgenden Gründen eine Verortung des Trackings und damit auch des Koordinatenursprungs in der Steuerung sinnvoll sein könnte:

- **Kein Unterschied beider Koordinatensysteme bei gleicher Ausrichtung**

Die Daten bilden ein Phänomen ab, das ebenso empirisch beobachtbar wie deduktiv nachvollziehbar ist. In der Ausrichtungsvariante *gleich* (graue Boxplots in Abbildung 4-17) ist zu erkennen, dass sich die beiden Koordinatensysteme bezüglich Ihrer Kenndaten nicht bzw. nur marginal unterscheiden. Dies ist insofern verständlich, da bei einer Haltung der Funksteuerung vor dem Körper mit Blick zur Last (vgl. Abbildung 4-16 links)

Kopf und Controller den selben Ursprung besitzen und damit die beiden Koordinatensysteme deckungsgleich sind. Nachdem die offizielle Vorgabe ist, dass bei Bedienung beständiger Sichtkontakt zur Last bestehen muss, ist davon auszugehen, dass dies den häufigsten Bedienfall darstellt.

- **Verminderte Nutzerakzeptanz**

Um die Kopfdrotation der Nutzer korrekt erfassen zu können, wäre nach derzeitigem Stand der Technik ein kopfgetragenes Messinstrument unumgänglich. Besonders bei Novizen ist davon auszugehen, dass dieses zusätzliche zur Bedienung notwendige Gerät die Nutzerakzeptanz verringern und damit zum bewussten Nicht-Einsatz der Steuerung führen könnte.

- **Sicherheitsaspekt bei unbewusster Kopfdrehung**

Baustellen bzw. Kraneinsatzgebiete generell sind oft hochdynamische, wenig kontrollierbare Umgebungen. Bei unerwarteten Bewegungen im Gesichtsfeld, einem Ausruf des Namens des Bedieners, einem Gefahrenhinweis oder anderer relevanter Reize besteht das nicht unerhebliche Risiko, dass Bediener den Kopf ebenjenem Reiz zuwenden, ohne dabei die Bewegung der Last und des Krans zu unterbrechen. In diesem Fall wäre das mentale Modell der Nutzer insofern ausgeprägt, dass der Kopf nicht als relevantes Stellteil für die Kransteuerung wahrgenommen wird. Entsprechend rechnen Nutzer mit einer kontinuierlichen Fortbewegung der Last auf der durch die Steuerbefehle festgelegten Trajektorie. In der Realität wäre aber eine scharfe Trajektorienänderung der Last, basierend auf dem rotierten Kopfkoordinatensystem der Fall, was zu Kollisionen führen kann.

4.3.3. Fazit

Aufgrund der Ergebnisse sowie der vorgebrachten Einwände ist zu empfehlen, einen Sensor innerhalb der Funksteuerung zu integrieren, der die Ausrichtung ebendieser relativ zur Last kontinuierlich ermitteln und somit beständig an eventuelle Richtungsänderungen anpassen kann.

Zu untersuchen bleibt, welche Art der Anpassung an Richtungsänderungen die von den Nutzern bevorzugte darstellt. Dies wird im Rahmen der Evaluation in Kapitel 6 behandelt.

5. Technische Umsetzung der intuitiven Laststeuerung

Im Rahmen der ergonomischen Konzeption im vorangegangenen Kapitel wurden die Art der Benutzereingabe (Joystick), das Potenzial sowie die Position des Nutzer-Referenzkoordinatensystems beleuchtet. Damit liegen alle Informationen vor, um das System der intuitiven Laststeuerung technisch umsetzen zu können. Zur Strukturierung des Entwicklungsprozesses kommt das V-Modell (siehe Abschnitt 3.5) nach VDI-Richtlinie 2206 [Ver-2004] zum Einsatz.

5.1. Anforderungsdefinition

Als erster Schritt ist im Rahmen des Entwicklungsprozesses eine strukturierte Anforderungsdefinition durchzuführen.

5.1.1. Anforderungen an die technische Umsetzung der intuitiven Laststeuerung

Neben den funktionalen Basisanforderungen, die aus dem Stand der Forschung und Entwicklung sowie den Defiziten aktueller Steuerungslösungen abgeleitet wurden, ergeben sich eine Reihe weiterer Anforderungen. Für die intuitive Laststeuerung sind dabei ergonomische, technische und ökonomische Aspekte zu berücksichtigen, weshalb alle Anforderungen mindestens einer dieser drei Kategorien zugeordnet werden. Jede Anforderung kann dabei mehr als einer Kategorie zugeordnet sein. Dies ist insbesondere bei vielen ergonomischen Anforderungen der Fall, da die ergonomische Anforderung direkten Einfluss auf die technische Umsetzung der intuitiven Laststeuerung hat, und sich somit auch eine technische Anforderung hieraus ableiten lässt.

Die Anforderungsermittlung erfolgte – zusätzlich zur fortlaufenden Recherche im gesamten Projektverlauf – im Rahmen eines mehrstündigen Workshops mit fünf Mitgliedsunternehmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA) [Top-2017b], in Expertengesprächen mit weiteren PA-Mitgliedern (u. a. [Top-2017a][Top-2018a]) sowie im Rahmen vieler weiterer Gespräche mit Wissenschaftlern, Herstellern, Betreibern und Anwendern im Bereich Kransteuerungen. Zusätzlich wurden die Anforderungen im Rahmen der Anforderungsdefinition mit Hilfe der MoSCoW-Methode in Muss-, Soll-, Kann- und Wunsch-Anforderungen priorisiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Anforderungen zudem in die Hauptgruppen Gesamtsystem, Hebemittel/Kran, Steuergerät, Funksen-

der/Funkempfänger/Funkstrecke/Funksteuerung, Stellteil/Bedienteil, Evaluierung und Projektergebnisse aufgeteilt.

Die so ermittelten ergonomischen, technischen und ökonomischen Anforderungen an die intuitive Laststeuerung sind in Tabelle 5-1 bis 5-3 dargestellt. Einige wenige der genannten Anforderungen berühren zusätzlich normative Aspekte und sind entsprechend markiert.

Die gesammelten Anforderungen bilden die Grundlage für die technische Umsetzung der intuitiven Laststeuerung und gleichzeitig den Maßstab für die Bewertung der Entwicklung am Projektende.

Tabelle 5-1: Anforderungen an die intuitive Laststeuerung

Hauptgruppe	Anforderung	Wert/Beschreibung	Muss	Soll	Kann	Wunsch	Ergonomisch	Technisch	Ökonomisch	Normativ	
Gesamtsystem	Entwicklung einer innovativen Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Lasthandling	mit Hilfe einer tragbaren Fernbedienung	X				X	X			
	Steuerung der Bewegungsrichtung des Hakens	automatische Berücksichtigung der Positionen von Last, Maschine und Bediener direkte Vorgabe der Hakenbewegung durch parallele Betätigung eines einzelnen Bedienelements	X				X	X			
	Verfügbarkeit	auf Abruf jederzeit		X				X			
	Berücksichtigung von Normen und Richtlinien	alle einschlägige Normen und Richtlinien (soweit sinnvoll möglich)		X				X		X	
	Sicherheit, Performance Level	Funktionale Sicherheit wie bei Serien-Hebmitteln erreichbar	X					X			
	Umgang mit Hindernissen	Hindernisse im Betrieb erkennen und signalisieren				X			X		
		Hindernisse im Betrieb erkennen und umfahren					X		X		
	Nachrüstbarkeit	Neues Konzept muss an bestehende Technik adaptierbar sein (BUS-Systeme)		X					X		
		an bestehende Hebmittel nachrüstbar			X				X		
		Herstellerunabhängige Nachrüstung (Kundenwunsch)			X				X		
	Arbeitsbereichsbegrenzung mit Teaching-Funktion	Abfahren des zulässigen Arbeitsraums zu Beginn der Arbeit, Bewegung nur in diesem Raum zulässig					X		X		
	Leichte Erlernbarkeit der Steuerung	lernförderndes System (Erlernen durch höchstens einmaligen Fehler)	X					X			
	Kosten	< 500 € Zusatzkosten in Anschaffung (vertretbar für Geräte, die nicht von Spezialisten bedient werden)		X					X	X	
		Wartungskosten minimieren			X				X	X	
	Betriebstemperaturbereich	-30 °C - +50 °C		X					X		
	Einsatzort	innen und außen		X					X		
	Wartungsaufwand	nicht höher als bei Funksteuerung bisher		X					X		
	Maschinenrichtlinie	Berücksichtigung aller möglichen Missbrauchsfälle		X					X		
	Bewegter Bediener	System funktioniert bei stehendem oder sich bewegendem Bediener		X				X	X		
	Industrietauglichkeit	im Bezug auf Robustheit, Genauigkeit, Arbeitsbereichsgröße, Lichtverhältnisse, Lärm etc.		X					X		
Zugänglichkeit	keine dauerhafte Haken- oder Maschinenberührung durch den Bediener notwendig		X				X	X			
Einsatzumgebung	industrielles Umfeld, d. h. außerhalb Laborumgebung		X					X			

Tabelle 5-2: Anforderungen an die intuitive Laststeuerung (Fortsetzung)

Hauptgruppe	Anforderung	Wert/Beschreibung	Muss	Soll	Kann	Wunsch	Ergonomisch	Technisch	Ökonomisch	Normativ
Hebemittel / Kran	Anzahl der Kran-Freiheitsgrade	beliebig viele rotatorische und translatorische Freiheitsgrade möglich	X					X		
	Bewegungsraum: Mindestlänge von Bewegung in der Ebene	> 6 m	X					X		
	Hublast	> 300 kg mind. (auch an der Spitze)		X				X		
	Bewegungsgeschwindigkeit in der Ebene	Orientierung an Turmdrehkran: Drehen 0.7 - 1 U/min; Katze < 40 m/min		X				X		
	Hubgeschwindigkeit	Orientierung an Turmdrehkran: < 50 m/min (Hakengeschwindigkeit)		X				X		
	Energiequelle Hebemittel	elektrisch oder hydraulisch	X					X		
	Lastaufnahmemittel	Haken (mit oder ohne Seil)	X					X		
	Schnittstelle für Funksteuerung	offen konfigurierbar, so dass "neue" Steuerung einfach anzubringen (BUS-Protokoll, Steckerspezifikation,...)		X				X		
	Hakenposition bekannt	Ausstattung aller Freiheitsgrade mit Messwertgebern, Ausgabe über standardisierte Schnittstelle	X					X		
	Antriebskoordination	Gleichzeitige Bewegung mehrerer Antriebe zur Realisierung der gewünschten Hakenbewegung	X					X		
Bewegung des Hakens von A nach B	auf kürzestem Weg möglich (unter Berücksichtigung vorhandener Hindernisse)	X					X			
Steuergerät	Hublasterkennung	Erkennung der aktuellen Hublast und Ausgabe auf Bus (für Rückspiegelung in Funksteuerung)		X				X		
	Ermöglichen kleiner Bewegungen des Benutzers	Winkelanpassung bei Benutzerdrehung diskretisieren auf 2-5° Genauigkeit	X				X	X		
	Logging der Stellteilbedienung	Stellteilbedienung in Datei schreiben, damit (Fehl-)Bedienrichtungen aufgezeichnet werden können	X					X		
	Logging des Hakenverlaufs	Hakenverlauf in Datei schreiben (x, y, z-Koordinate), so dass die genaue Trajektorie nachvollzogen werden kann	X					X		
	Berechnung des Bedienerwunsches	Zusammenführung von Ortungssignal (rotatorische Position) und Benutzerwunsch, Umrechnung in Bewegung (angegeben im KoSy des Hebemittels)	X					X		
	Berechnung der Hakenposition	Zusammenführung der Messwerte für die Hebemittel-Freiheitsgrade, Angabe der Hakenposition im KoSy des Hebemittels	X					X		
	Vergleich zwischen IST-Bedienerwunsch (= SOLL-Bewegung) und IST-Hakenposition	Ermittlung von SOLL und IST, Bewegung des Hakens in gewünschte Richtung	X					X		
	Ansteuerung der Antriebe	Gleichzeitige Bewegung mehrerer Antriebe zur Realisierung der gewünschten Hakenbewegung	X					X		
	Schnittstellenvariabilität	Eingangsschnittstellen variabel (passend zu Funksteuerungen, Hebemittelsensoren), Ausgabeschnittstellen variabel (passend zu Hebemittelantrieben)	X					X		
	Funksender / Funkempfänger / Funkstrecke / Funksteuerung	Umgang mit Hindernissen	keine unzulässige Beeinträchtigung durch Umgebungselemente wie Wände, Metallgegenstände, Vegetation und andere Feuchtigkeitsquellen	X					X	
Frequenzbereich		EU-Weit lizenzfrei (ISM) 2,4 GHz-Band		X		X		X		
Mechanismen zur Entstörsicherheit		Frequenz- und Leistungsmanagement (Frequency-Hopping Spread Spectrum u. Ä.)		X				X		
Reichweite		Groß genug für hohe Türme (> 150 m) und große Auslegerlängen Sichtweite (mind. 10 m, < 30 m)		X				X		
Feinpositioniermodus		Feinpositioniermodus vorhanden, z. B. durch Druck von Taster, solange Taster gedrückt				X	X	X		
Displayanzeige		Anzeige der Lastposition oder Freiheitsgradstellungen sowie der Hublast			X		X	X		
Speichern der aktuellen Hakenposition		Knopf zum Speichern der aktuellen Hakenposition vorhanden				X	X	X		
Annäherungshilfe an gespeicherte Lastposition		Vorgabe von Bewegungsrichtungen zum Erreichen der gespeicherten Lastposition				X	X	X		
Akkulaufzeit		Ausreichend für einen ganzen Arbeitstag (10 h)		X				X		
Automatikfunktion signalisieren		Bediener erhält Signal, wenn Automatikfunktion aktiv ist (optisch o. ä.)	X					X	X	
Überwachungsfunktion des Bedieners sicherstellen		kontinuierlich während des Betriebs (z. B. Totmannknopf)		X				X	X	
Gleichzeitigkeit: Bedienung Hebemittel und Anschlagen		Steuerung verstaubar, z. B. an Gurt	X					X	X	
Gewicht		Angepasst an Anwendung und Bediener (bisher: < 1 kg bis > 4 kg)	X					X	X	
Untersuchung der Messfrequenz		kontinuierliche oder diskrete Messung des Nutzer-Koordinatensystems implementieren	X					X		
Genauigkeit der Orientierungsmessung		mind. 5°, besser 1°	X					X		
Infrastruktur zur Ortung des Bedieners		keine aufwendige Infrastruktur im Umfeld des Krans (Kameras, RFID-Reader etc.)	X					X		

Tabelle 5-3: Anforderungen an die intuitive Laststeuerung (Fortsetzung)

Hauptgruppe	Anforderung	Wert/Beschreibung	Muss	Soll	Kann	Wunsch	Ergonomisch	Technisch	Ökonomisch	Normativ	
Funksempfänger / Funkstrecke / Funksteuerung	Bedienbare Freiheitsgrade	3 (Bewegung der Last in 3 Raumrichtungen)	X					X			
	Energiequelle Funksender	Akku	X					X			
	Robustheit gegen Umwelteinflüsse	Schmutz, Staub, Feuchtigkeit, Stoß, EMV	X					X			
	Not-Stop-Funktion	vorhanden	X					X			
	Schutz vor ungewollter Ingangsetzung	vorhanden	X					X			
	Bewegungseinschränkung des Bedieners	Funksteuerung darf Bewegungsmöglichkeiten des Bedieners nicht unzulässig einschränken	X				X	X			
	EMV-Test	Bestehen eines industriellen EMV-Tests (Messkammer)		X				X			
	Schnittstellenvariabilität	Ausgangsschnittstellen variabel (passend zu Funksteuerung und Funkstrecke)	X					X			
Stellteil/Bedienteil	Handschuhbedienung	System kann mit Arbeitshandschuhen bedient werden	X				X	X			
	Fühlbare Bedienelemente	System muss bei entsprechender Erfahrung "ohne Hinsehen" bedient werden können	X				X	X			
	Stellteil für Hubfunktion mit haptischer Rückmeldung	Rasterung für Geschwindigkeitsstufen (sonst nur optische Erkennung möglich, ist schwierig)		X			X	X			
	Auswahlmöglichkeit für Stellteilbelegung	Hubfunktion rechts oder links nach Auswahl des Benutzers		X			X	X			
	Nullstellungszwang	Nullstellungszwang der Stellteile beim Loslassen	X				X	X			
	Zustimmenschalter	falls vorhanden: keine dauerhafte Betätigung durch Drücken o.ä.				X		X	X		
		falls vorhanden: Auslösung rein durch Handkontakt/Umgreifen				X		X	X		
	Bedienung mit verschiedenen Händen	Konfiguration der Stellteile möglich, so dass Hauptteil der Bedienung mit stärkerer Hand erledigt wird		X			X	X			
	Haptische Rückmeldung	vorsehen				X		X	X		
		Stärke der Rückmeldung ist durch Bediener einstellbar				X		X	X		
	Proportionalsteuerung	Bewegungsgeschwindigkeit ist proportional zur Hebelauslenkung		X				X			
	Bedienung	mit ein oder zwei Händen		X				X	X		
Bedienung	mit einer Hand			X			X	X			

5.1.2. Normative Anforderungen

Zusätzlich zu den ergonomischen, technischen und ökonomischen Anforderungen, die sich aus dem Forschungsvorhaben ergeben, existiert eine Vielzahl von normativen Vorgaben, die im Rahmen von normativen Anforderungen zu betrachten sind. Aus diesem Grund wurde im Hinblick auf die intuitive Laststeuerung eine ausführliche Normenrecherche durchgeführt. Die normativen Anforderungen wurden anschließend in die drei Anforderungsgruppen Funksteuerung, Stellteile und Stellteilergonomie sowie Sicherheitsvorgaben unterteilt.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist das vollständige Ergebnis der umfangreichen Normenrecherche in Anhang A des Berichts dargestellt.

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass Normen zwar in aller Regel die derzeit anerkannten Regeln der Technik darstellen, die Verwendung aber grundsätzlich freiwillig ist¹. Da der Normungsprozess zudem mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden ist, kann es ferner sein, dass eine Norm zwar einerseits anerkannte Regeln der Technik

¹ Normen werden erst zur Pflicht, wenn ein konkreter Vertrag oder der Gesetzgeber die Anwendung in bestimmten Fällen vorschreibt.

abbildet, jedoch andererseits inhaltlich zum Anwendungszeitpunkt bereits überholt ist, und dass demzufolge Entwicklungen existieren, die erheblich vom Inhalt der Norm abweichen. Dies gilt insbesondere für Applikationen mit kurzen Entwicklungszyklen und steilen Innovationskurven.

Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass insbesondere bei disruptiven Entwicklungen, die eine wesentliche Abkehr von bisher umgesetzten Wirkprinzipien erfordern, die Verletzung von normativen Vorgaben grundsätzlich notwendig und möglich sein kann, um die Entwicklung überhaupt zu ermöglichen. In jedem Fall ist es zweckmäßig, Abweichungen von den genormten Vorgaben funktional und sicherheitstechnisch zu begründen.

Da es sich bei der Entwicklung der intuitiven Laststeuerung um eine mechatronische Neuentwicklung mit – im Vergleich zu bisherigen Lösungen – deutlich verändertem Wirkprinzip handelt, die eine wesentliche Veränderung zum aktuellen Stand der Technik darstellt, können die normativen Vorgaben nicht als alleinige Leitsätze fungieren, sondern dienen lediglich der Orientierung und insbesondere der sicherheitstechnischen Begutachtung.

Aus diesem Grund haben die normativen Vorgaben im Rahmen der intuitiven Laststeuerung zunächst informativen Charakter. Im Lauf des Entwicklungsprozesses wurden vielfältige Bestrebungen unternommen, so viele normative Anforderungen wie möglich zu berücksichtigen. Gleichzeitig bietet die Entwicklung der intuitiven Laststeuerung das Potenzial, Änderungsbedarf in der Normgebung zu identifizieren.

Die Definition der Anforderungen an die intuitive Laststeuerung ist somit abgeschlossen. Das V-Modell sieht nun im nächsten Schritt den Systementwurf vor. Ausgehend von der Spezifikation des Gesamtsystems werden anschließend die einzelnen Subsysteme (Domänen) entworfen.

5.2. Demonstratorkran

Die technische Umsetzung der intuitiven Laststeuerung erfolgt in Form eines Demonstrators, der anschließend für die ergonomische Evaluation im Rahmen der Probandenstudien sowie nach Projektende für den Ergebnistransfer genutzt wird. Ein wichtiger Teil des Gesamtsystems der intuitiven Laststeuerung ist der Kran, an dem die neue Steuerung appliziert wird. Zunächst wird daher ein geeigneter Kran ausgewählt.

5.2.1. Auswahl des Krans

Hierfür werden einerseits vorhandene Krane an den beteiligten Forschungsinstituten in Erwägung gezogen. Andererseits besteht die Möglichkeit, die intuitive Laststeuerung an ei-

dem Kranmodell umzusetzen oder auf einen Kran außerhalb der Forschungsstellen auszuweichen. In enger Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss werden die in Tabelle 5-4 aufgeführten Umsetzungsmöglichkeiten für die intuitive Laststeuerung identifiziert.

Tabelle 5-4: Mögliche Demonstratorlösungen

Kran	Standort	Verfügbarkeit	Baujahr	Antriebe	Bemerkung
Brückenkran (10t)	Lehrstuhl fml (Halle)	teilweise (Werkstattbetrieb)	1994	3	<i>Kran und Steuerung vorhanden</i>
Ladekran (75 kNm)	Lehrstuhl fml (Freifläche)	100 %	2018	4	<i>Kran und Steuerung vorhanden</i>
Kranbaukasten (Aluminiumschienen)	Lehrstuhl für Ergonomie (Labor)	teilweise (Werkstattbetrieb)	unbek.	3	<i>Kran und Steuerung vorhanden, Erweiterung notwendig</i>
Kran (Bestand)	Industriepartner	eingeschränkt (Produktion)		3	<i>Verfügbarkeit abhängig von Auslastung</i>
Kran (neu oder gebraucht)	z. B. Insolvenzmasse				<i>Beschaffung, Transport und Aufbau notwendig</i>
Kranmodell (Eigenbau)	Halle	100 %		3	<i>Eigenbau von Kran und Steuerung notwendig</i>
Kranmodell (Bausatz)	Halle	100 %		3	<i>Beschaffung von Kran und Steuerung notwendig</i>

Die intuitive Laststeuerung eignet sich grundsätzlich für alle teleoperierten Hebemittel. Um die neu entwickelte Steuerung realitätsnah testen zu können, ist die Applikation an einem realen Kran den Kranmodellen vorzuziehen. Zudem muss auf eine entsprechende Verfügbarkeit des Krans für die Entwicklungstätigkeiten sowie die Probandenstudien geachtet werden. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass der Demonstratorkran eine Steuerung besitzt, deren Architektur die Applikation einer weiteren Funksteuerungslösung erlaubt. Ferner ist ein existierender Kran einem neu zu beschaffenden Kran aus finanziellen Gründen vorzuziehen.

Als Demonstratorkran für die intuitive Laststeuerung wird daher aus den verfügbaren Möglichkeiten der stationäre Ladekran am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik ausgewählt. Der hydraulisch angetriebene Palfinger PK 7.501 SLD 5 besitzt vier Freiheitsgrade und wurde im Jahr 2018 gebaut. Der Kran besitzt folglich eine moderne Steuerungsarchitektur, die sich gut für die Applikation der intuitiven Laststeuerung eignet. Ferner wird der Kran nur sporadisch für andere Tätigkeiten benötigt, sodass die notwendigen Zeiteinheiten zur Implementierung und für die Probandenstudien kein Problem darstellen.

Zudem weisen Ladekrane typischerweise eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden (vier bis sieben Antriebe) auf, sodass die Kompatibilitätsprobleme zwischen Bediener, Stellteil und Kran besonders deutlich zu Tage treten. Weiterhin besitzen Ladekrane zudem sowohl rotatorische als auch translatorische Freiheitsgrade, was den Zusammenhang zwischen Hakenbewegung und den Bewegungen der einzelnen Freiheitsgrade in Kombination mit der hohen Freiheitsgradzahl zusätzlich verkompliziert. In der überwiegenden Zahl der Fälle erfolgt die Bedienung zudem mit Hilfe einer Funksteuerung. Die Bediener sind oft keine Vollzeit-Kranfahrer, sondern Gelegenheitsbediener. Eine verbesserte, intuitive Steuerung bietet folglich am Ladekran besonders hohes Potenzial.

Der ausgewählte Ladekran befindet sich auf der Versuchs-Freifläche des Lehrstuhls fml und ist dort stationär auf einer Stahlkonsole montiert (siehe Abbildung 5-1). Er besitzt vier Bewegungs-Freiheitsgrade q_1, q_2, q_3, q_4 : Drei rotatorische Gelenke (Drehwerk q_1 , Hubarm heben/senken q_2 , Knickarm heben/senken q_3) sowie ein translatorisches Gelenk (Teleskoparm ausfahren/einfahren q_4). Die Position der Gelenke ist in Abbildung 5-2 dargestellt.



Abbildung 5-1: Ladekran (Freifläche)

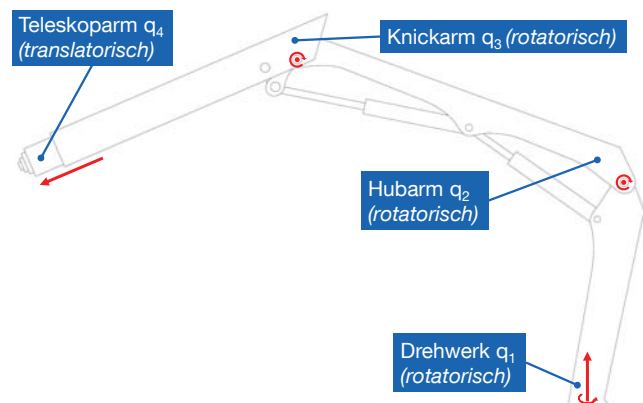


Abbildung 5-2: Ladekran (Zeichnung)

Der Ladekran besitzt eine maximale Ausladung von 11,1 m und ist um 360° schwenkbar. Die Steuerung erfolgt serienmäßig durch eine Funksteuerung mit Linearhebeln.

5.2.2. Systemarchitektur und Schnittstellen

Abbildung 5-3 zeigt eine schematische Darstellung der Systemarchitektur des Ladekrans in Form eines Blockschaltbilds. Neben der serienmäßigen Architektur des Ladekrans in der rechten Abbildungshälfte sind links auch die Modifikationen für die Umsetzung der intuitiven Laststeuerung dargestellt. Die Schnittstellen innerhalb des Systems – also alle vorhandenen Informations- und Stoffflüsse – sind in Form von farbigen Pfeilen dargestellt.

Das Hydraulikaggregat versorgt die Kran-Freiheitsgrade mit hydraulischer Leistung P_{hyd} (Druck p , Volumenstrom Q). Die Regelung der hydraulischen Leistung erfolgt durch einen

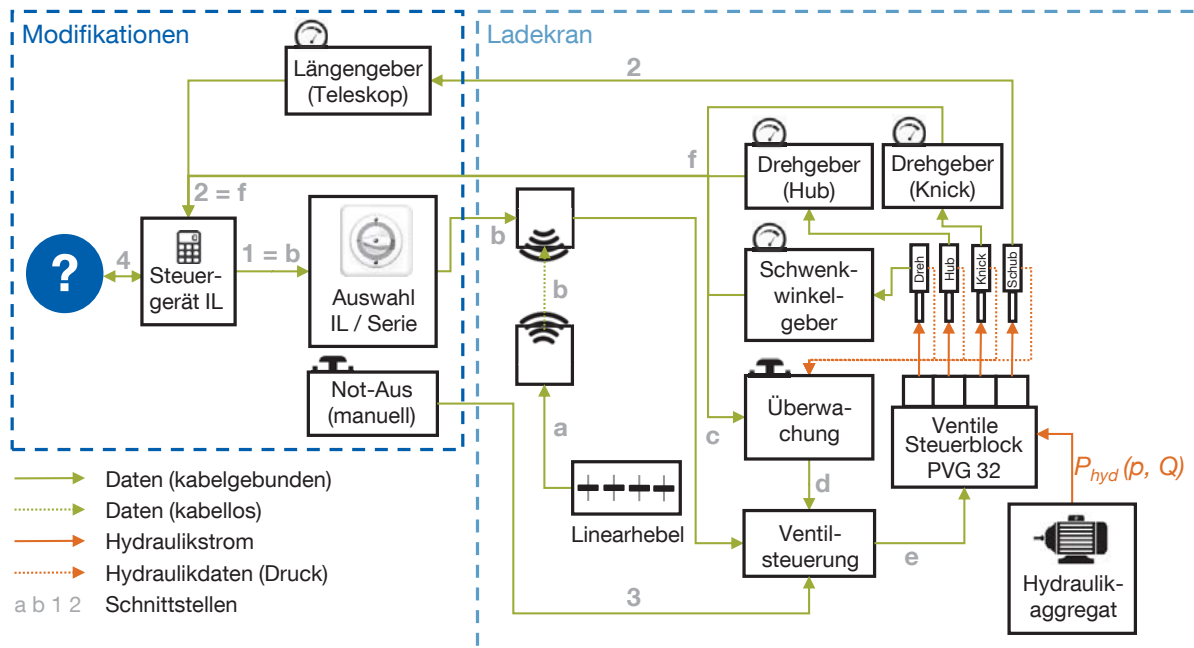


Abbildung 5-3: Systemarchitektur und Schnittstellen des Ladekrans

Steuerblock der Firma Danfoss vom Typ PVG 32 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 Eingabe des Bewegungswunsches durch den Benutzer erfolgt serienmäßig an der Funksteuerung über Linearhebel. Die Auslenkung des Hebels korrespondiert dabei mit der gewünschten Bewegungsgeschwindigkeit und -richtung des jeweiligen Gelenks. Die Hebelauslenkungen werden mit Hilfe von Potentiometern erfasst und an die Funksendeeinheit übergeben (Schnittstelle a). Von dort werden die Steuersignale drahtlos an den Funkempfänger übertragen (Schnittstelle b). Der Funkempfänger gibt die Bewegungswünsche aller Freiheitsgrade über ein internes Kommunikationsprotokoll an die Ventilsteuerung weiter (Schnittstelle c).

Die Ansteuerung der Ventile durch die Ventilsteuerung (Schnittstelle e) erfolgt elektrisch über ein Mittelspannungs-Steuersignal ($U = 12\text{ V} \pm 6\text{ V}$). Der Ventilsteuerung ist die kraninterne Überwachungslogik vorgeschaltet (Schnittstelle d). Sie greift bei Fehlern innerhalb der Steuerung ein, in dem alle Ventile drucklos geschaltet werden, sodass keine Kranbewegung mehr möglich ist. Im Überlastfall erfolgt die Ausgabe eines akustischen und optischen Warnsignals. Die Überwachungslogik erlaubt dann nur noch Gelenkbewegungen, die zu einer Verringerung der Überlastsituation führen. In beiden Fällen greift die Überwachung auf Druckmesser an den Kran-Freiheitsgraden sowie die Gelenksensoren zu, um den ak-

tuellen Zustand des Krans zu überwachen. Die Gelenksensoren geben die Stellung der Krangelenke dabei über das Bus-Protokoll CANopen-Safety² aus (Schnittstelle f).

Zusätzlich zum Serienzustand des Ladekrans wurden für die Implementierung der intuitiven Laststeuerung einige Modifikationen am Ladekran durchgeführt. Hierbei wurde bewusst darauf verzichtet, die Ventilsteuerung oder die Überwachungslogik zu verändern, um alle Sicherheitsfunktionen zu erhalten.

Der Anschluss der intuitiven Laststeuerung an die Steuerung des Ladekrans erfolgt über den Funkempfänger. Zu diesem Zweck wurde die serienmäßige Funkverbindung (Schnittstelle b) decodiert. Das Steuergerät der intuitiven Laststeuerung, das den Benutzerwunsch in die entsprechenden Einzelbewegungen der Krangelenke umwandelt sowie die Regelung übernimmt (siehe Kapitel 5.7), gibt die Steuersignale für die Gelenke in der gleichen Form aus (Schnittstelle 1) wie die serienmäßige Linearhebelsteuerung (Schnittstelle b). Über einen Auswahlschalter kann vorgewählt werden, ob die Seriensteuerung oder die intuitive Laststeuerung aktiv ist, sodass immer nur eine Steuerung gleichzeitig zu einer Kranbewegung führen kann.

Der Anschluss des Eingabegeräts für die intuitive Laststeuerung an das Steuergerät erfolgt über das weit verbreitete Kommunikationsprotokoll CANopen-Safety (Schnittstelle 4). Dabei handelt es sich um ein bei mobilen Arbeitsmaschinen bewährtes und sicherheitszertifiziertes Bus-Protokoll. Die Standardisierung der Kommunikation ermöglicht eine einfache Übertragung der intuitiven Laststeuerung auf andere Krantypen und gleichzeitig eine einfache Einbindung der Gelenksensoren (Schnittstelle f), die ebenfalls mit diesem Protokoll arbeiten.

Um im Steuergerät der intuitiven Laststeuerung die aktuelle Position des Hakens bzw. der Last berechnen zu können, muss zusätzlich der Teleskoparm des Krans mit einem Längenmesser ausgestattet werden. Hierfür kommt ein Seilzugsensor für Mobilhydraulikanwendungen der Fa. Waycon Positionsmesstechnik zum Einsatz. Auch dieser Sensor ist über CANopen-Safety an das Steuergerät angebunden (Schnittstelle 2).

Der Ladekran bietet mit den geschilderten Modifikationen nun alle Voraussetzungen, die intuitive Laststeuerung zu applizieren.

² Das 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 und ist für sicherheitskritische Anwendungen bis Level 3 zertifiziert.

5.2.3. Umgebung

Der Ladekran befindet sich auf der betonierten Versuchs-Freifläche des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) an der Technischen Universität München in Garching. Abbildung 5-4 zeigt ein Foto der Demonstrator-Umgebung.



Abbildung 5-4: Demonstrator-Umgebung auf der Versuchs-Freifläche am Lehrstuhl fml

Die Betonfläche ist für Schwerlastversuche (bis 100 t/m^2) konzipiert und zu diesem Zweck schwer armiert. Der Ladekran ist in der Mitte der betonierten Fläche so aufgestellt, dass er einen möglichst großen Teil der Betonfläche mit dem Haken erreichen kann. Die in Abbildung 5-4 sichtbare Kreislinie verläuft in einem Abstand um 10 m um den Krandrehpunkt.

Um die Betonfläche herum befinden sich Prüfstandsgebäude in Leichtbauweise mit Blech-Außenwänden, eine asphaltierte Straße sowie ein gemauertes Bürogebäude und ein kleiner Grünstreifen. Ferner befinden sich ein Büro- und Werkstattcontainer sowie einige temporäre Zeltaufbauten in unmittelbarer Nähe zum Kran. Es handelt sich somit um eine industriennahe Mischumgebung, wie sie in vielen Industriegebieten oder in der Umgebung vieler Baustellen vorkommt. Die Demonstrator-Umgebung kann somit als repräsentativ für eine industriennahe Applikation bezeichnet werden.

5.3. Gestaltung des Eingabegeräts

Die intuitive Laststeuerung soll für Experten, Gelegenheitsbediener und Novizen eine intuitivere Kranbedienung ermöglichen. In Abschnitt 4.1 wurde hierfür eine Funksteuerung mit zwei Joysticks als sinnvolle Lösung identifiziert. Basierend auf dieser Festlegung wird nun die Gestaltung der Funksteuerung durchgeführt. Zu diesem Zweck wird auf die DIN EN

ISO 9241-110 [Deu-2006] zurückgegriffen. Sie behandelt die „ergonomische Gestaltung von interaktiven Systemen³ und beschreibt Grundsätze der Dialoggestaltung, (...) die bei der Analyse, Gestaltung und Bewertung von interaktiven Systemen angewendet werden sollten“. Sie bezieht sich explizit auf die „Grundsätze der Dialoggestaltung, die sich auf die ergonomische Gestaltung des Dialogs zwischen Benutzer und interaktivem System beziehen“ und eignet sich daher hervorragend als Gestaltungsgrundlage für die Funksteuerung der intuitiven Laststeuerung.

Bei der Gestaltung der Funksteuerung werden insbesondere folgende Grundsätze der Dialoggestaltung berücksichtigt:

- **Aufgabenangemessenheit:** Dem Benutzer werden nur solche Informationen angezeigt, die er zum aktuellen Zeitpunkt für seine Aufgabe benötigt. Es werden nur Informationen abgefragt, die derzeit für die Erledigung der Aufgabe notwendig sind.
- **Selbstbeschreibungsfähigkeit:** Die Art und Richtung der Interaktion ist für den Benutzer zu jeder Zeit offensichtlich. Informationen, die dem Benutzer bereitgestellt werden, unterstützen und leiten ihn im Sinne einer erfolgreichen Interaktion.
- **Erwartungskonformität:** Das Verhalten des Systems in Relation zur Benutzeraktion entspricht zu jeder Zeit den Erwartungen. Die Rückmeldung ist unmittelbar.
- **Lernförderlichkeit:** Das System ist so gestaltet, dass der Benutzer beim Erlernen der Funktionalitäten unterstützt wird. Die Anzahl der zum Erlernen notwendigen Fehler ist minimal.
- **Fehlertoleranz:** Das System ist so gestaltet, dass es den Benutzer dabei unterstützt, Eingabefehler zu entdecken und zu vermeiden.
- **Individualisierbarkeit:** Der Benutzer kann die Mensch-Maschine-Interaktion an seine individuellen Fähigkeiten und Bedürfnisse anpassen.

Dabei wird auf die konfigurierbare Funksteuerungs-Plattform technos A der Firma HBC-radiomatic zurückgegriffen, aus deren Baukasten die Funksteuerung für die intuitive Laststeuerung nach ergonomischen Gesichtspunkten konzeptioniert wird. Die wichtigsten technischen Daten der Funksteuerung sind in Tabelle 5-5 am Ende dieses Abschnitts dargestellt.

Die konfigurierte Funksteuerung sowie beispielhafte Displayanzeigen für die unterschiedlichen Betriebsmodi sind in Abbildung 5-5 dargestellt. Zur Steuerung der Kranbewegungen besitzt die Funksteuerung zwei Joysticks mit je zwei Bewegungsfreiheitsgraden. Auf der Oberseite der Steuerung befinden sich neben den Joysticks ein Drehschalter für die Modusauswahl sowie ein weiterer Drehschalter für den Tausch der Joystickbelegung im intuitiven

³ Interaktives System: „Kombination von Hardware- und Softwarekomponenten, die Eingaben von einem Benutzer empfangen und Ausgaben zu einem Benutzer übermitteln, um ihn bei der Ausführung einer Arbeitsaufgabe zu unterstützen.“ [Deu-2006]

Modus. Die Beschriftung der Funksteuerung mit Hilfe farbiger Icons sorgt für eine eindeutige Zuordnung der Funktionen zu den Bedienelementen. Über zwei Displays werden dem Bediener – je nach Steuerungsmodus – die wichtigsten Informationen visuell dargestellt. 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.

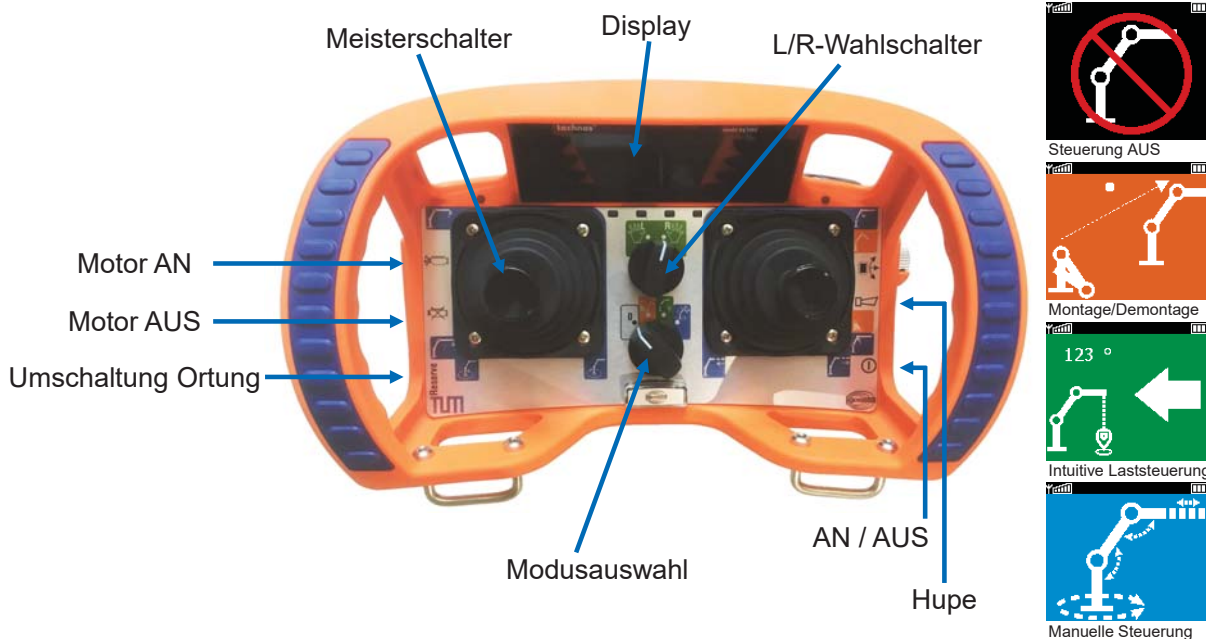


Abbildung 5-5: Funksteuerung: Eingabegerät für die intuitive Laststeuerung

Bei der Gestaltung wurden die fundamentalen Designprinzipien Mapping und Affordance [Nor-2013, S. 10ff, 20ff] für alle Funktionen, die zu einer Bewegung des Krans führen, konsequent weiterentwickelt, sodass der Benutzer einerseits auf einen Blick die Funktion eines Bedienelements erfassen kann (Selbstbeschreibungsfähigkeit), und andererseits ein klarer und natürlicher Zusammenhang zwischen den Bedienelementen und deren Auswirkung auf den Kran besteht (Erwartungskonformität).

Neben den üblichen Funksteuerungs-Funktionalitäten weist die ergonomisch optimierte Steuerung folgende Besonderheiten auf:

- **Farbcodierung der Modi**

(→ Selbstbeschreibungsfähigkeit, Lernförderlichkeit, Fehlertoleranz)

Die eindeutige Zuordnung von gut unterscheidbaren Farben zu den jeweiligen Betriebsmodi unterstützen den Benutzer bei der schnellen Informationsaufnahme und -verarbeitung. Bei der Farbgebung wurden zudem ergonomische Gesichtspunkte berücksichtigt, z. B. durch Vermeidung von chromatischer Aberration. Die Funktion der Modi wird mit Hilfe eines eindeutig identifizierbaren Icons im rechten der beiden Displays visualisiert und bietet zusätzlich zur Farbe einen eindeutigen Wiedererkennungseffekt.

- **Modusauswahl**

(→ Aufgabenangemessenheit, Erwartungskonformität, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Fehlertoleranz)

In Summe existieren vier verschiedene Modi für die intuitive Laststeuerung, die auf der Steuerung wie in Abbildung 5-5 dargestellt angewählt und visualisiert werden. Das Umschalten mittels des Drehwahlhebels entspricht einer logischen Folge des Kranbedienungsprozesses (Einschalten, Montage, intuitive Bewegung zum Zielort, im Bedarfsfall freiheitsgradgenaue Positionierung) im Uhrzeigersinn. Die Modi (inklusive Nullstellung, bzw. *aus*) haben folgende Eigenschaften:

Der Modus **0 – Betrieb aus** liefert zusätzliche Sicherheit durch explizite Auswahl eines Modus nach Einschalten der Steuerung. Hierdurch wird ebenfalls das Metapherverständnis der Bediener für die vier Modi gestärkt. Modus 0 bietet außerdem die Möglichkeit, in Menüstrukturen zu navigieren, ohne ein mögliches Verfahren des Krans in Kauf nehmen zu müssen.

Der Modus **Montage/Demontage** (orange) unterstützt den Benutzer gezielt beim Auf- und Abrüsten des Krans und führt die notwendigen Schritte automatisiert durch. Ist dieser Modus ausgewählt, kann mit Hilfe des rechten Meisterschalters der Aufbau (Meisterschalter nach oben) oder Abbau (Meisterschalter nach unten) automatisiert ausgeführt werden. Dabei wird der Grundsatz berücksichtigt, dass Bewegungen des Krans ausschließlich durch Joystickbewegungen ausgelöst werden. Die Zuordnung der Montage/Demontage-Bewegung zur Bewegungsrichtung des Joysticks erfolgt über ebenfalls orangefarbene Icons neben dem rechten Joystick. Der Fortschritt der Montage/Demontage wird zusätzlich im Bildschirm über einen Fortschrittsbalken dargestellt.

Im Modus **Intuitive Laststeuerung** (grün) steuert der Bediener mit einem Meisterschalter die Bewegung der Last in der Ebene und mit dem zweiten Meisterschalter die z-Komponente der Last (Hubrichtung). Die Lastbewegung erfolgt immer parallel zur Auslenkung der Meisterschalter – unabhängig von der Position und Orientierung des Bediener. Im Display wird zusätzlich zum aktuellen Modus die momentane Lastrichtung durch einen Pfeil angezeigt, um eine schnelle Überprüfung der korrekten Systemfunktion zu ermöglichen: Zeigt der Pfeil zur Last, funktioniert die Ortungssensorik fehlerfrei. Zusätzlich wird der aktuell gemessene Orientierungswinkel als Zahlenwert im Display dargestellt.

Im Modus **Manuelle Steuerung** (blau) kann der Benutzer für besondere Anwendungsfälle jeden Freiheitsgrad des Krans einzeln ansteuern. Dies ermöglicht ihm beispielsweise bei besonders engen Platzverhältnissen die gezielte Bewegung einzelner Gelenke. Im Display werden die angesteuerten Gelenke farblich hervorgehoben. Die Zuordnung der Joystickbewegungen zu den Kran-Freiheitsgraden erfolgt zusätzlich über ebenfalls blaue Icons neben den Joysticks.

- **L-/R-Wahlschalter**

(→ Individualisierbarkeit, Lernförderlichkeit)

Im Modus „Intuitive Laststeuerung“ kann über den L/R-Wahlschalter die Belegung der Meisterschalter vertauscht und somit den individuellen Bedürfnissen angepasst werden. Dieser Schalter hat nur in diesem Modus eine Funktion und ist daher ausschließlich mit grünen Icons beschriftet.

- **Vereinfachte Informationsdarstellung im Display**

(→ Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Individualisierbarkeit, Fehlertoleranz)

Dem Benutzer werden nur die Informationen im Display angezeigt, die den aktuellen Betriebszustand beschreiben. Weitere Informationen können individuell im Menü abgerufen werden. Hierfür wird der Dreh-/Drücktaster oberhalb der Hupentaste verwendet.

- **Zusattasten**

(→ Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit)

Zusatzfunktionen, die ständig und schnell zugänglich sein sollen, aber keine visuelle Erfassung durch den Bediener benötigen, sind auf seitlich angebrachte Funktionstasten ausgelagert und durch eindeutige Icons auf der sichtbaren Oberseite der Steuerung beschriftet. Hierzu gehören die Funktionen Motor AN/AUS für die Steuerung des Hydraulikaggregats, die Hupe, der EIN/AUS-Taster für die Funksteuerung sowie der Umschaltknopf für die Ortung, mit dem im Modus „Intuitive Laststeuerung“ zwischen der kontinuierlichen Orientierungsanpassung und der diskreten (d. h. bei Nulldurchgang der Joysticks) Orientierungsanpassung umgeschaltet werden kann. Die Oberfläche der seitlichen Taster ist leicht abgesetzt, sodass die Taster ohne Sichtkontakt mit dem Finger gefunden und betätigt werden können.

Auf weitere Zusattasten, die nicht zur unmittelbaren Kransteuerung benötigt werden, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. So ist zum Beispiel kein Zustimmung- oder Totmannschalter verbaut. Über in die Steuerung integrierte Inertialsensorik werden jedoch typische Störungen (herunterfallende Steuerung, Schockbelastung der Steuerung durch Schläge, Kippen der Steuerung über einen bestimmten einstellbaren Winkel) erkannt. In diesen Fällen werden alle Kranbewegungen automatisch stillgesetzt.

Die Funksteuerung der intuitiven Laststeuerung bietet als Weiterentwicklung etablierter Steuerungen die gleiche Funktionalität in der Bedienung bei gleichzeitig wesentlich erhöhter Intuitivität. Sie unterstützt damit die Verbesserung aller relevanten Prozessparameter (Effizienz, Fehlerzahl, Einlernzeit, subjektive Eingabesicherheit, subjektive Zufriedenheit) bei der Kranoperation durch das intuitive, zielorientierte Laststeuerungskonzept.

Gleichzeitig bietet der Funksender im Inneren genug Bauraum, die für die Messung der Bedienerorientierung notwendige Sensorik unterzubringen (siehe Kapitel 5.4). Zusätzlich handelt es sich um ein bewährtes Industrieprodukt, das den industriellen Anforderungen

(Robustheit, Temperatur, Feuchtigkeit, Batterielaufzeit etc.) gerecht wird und sich damit für den Einsatz in Industrie und Bau eignet.

Auf der Empfängerseite der Funksteuerung kommt ein Standard-Empfänger der Firma HBC-radiomatic vom Typ FSE 727 radiobus zum Einsatz. Der Empfänger gibt alle Steuerungssignale in Form eines CANopen-Safety-Bussignals aus und kann so direkt an das Steuergerät der intuitiven Laststeuerung angeschlossen werden.

Tabelle 5-5 fasst die wichtigsten technischen Daten der für die intuitive Laststeuerung gewählten Sender-/Empfängerkombination zusammen.

Tabelle 5-5: Technische Daten der Funksender/-empfänger-Kombination für die intuitive Laststeuerung (Auswahl) [HBC-2017a][HBC-2017b]

Sender	Typ	technos A
Sender	Versorgungsspannung	3,7 V
Sender	Akkutyp und -kapazität	Li-Ion; 6 Ah
Sender	Akkulaufzeit (Dauereinsatz)	ca. 20 h
Sender	Betriebstemperaturbereich	-20°C - 70°C
Sender	Abmessungen, Gewicht	255 mm x 162 mm x 169 mm; ca. 1,8 kg
Empfänger	Typ	FSE 727 radiobus
Empfänger	Versorgungsspannung	10 V DC - 30 V DC
Empfänger	Leistungsaufnahme	Max. 14 W
Empfänger	Schnittstelle	CANopen Safety
Empfänger	Betriebstemperaturbereich	-25°C - 70°C
Empfänger	Abmessungen, Gewicht	165 mm x 165 mm x 115 mm; ca. 2,6 kg
Sender + Empfänger	Sicherheitsfunktion	NOT-STOP: Performance Level d, Kategorie 3 nach [Deu-2016d]
Sender + Empfänger	Frequenzbereich	2,4 GHz (2402 - 2480 MHz)
Sender + Empfänger	Kanalraster	1 MHz
Sender + Empfänger	Schutzart	IP65

5.4. Entwurf notwendiger Sensorikkonzepte

Nach der Auswahl des Eingabegeräts werden die beiden für die intuitive Laststeuerung notwendigen Sensorikkonzepte entwickelt: Einerseits wird ein System benötigt, das die Verdrehung des Funksteuerungs-Koordinatensystems relativ zum globalen Koordinatensystem (Winkel Δ_{Nutzer} in Abbildung 4-5) zuverlässig und robust messen kann, um den

Bewegungswunsch des Benutzers (Eingabe an der Steuerung) mit Hilfe einer Rotationsmatrix in globale Koordinaten umrechnen zu können. Auf der anderen Seite ist es notwendig, die Hakenposition relativ zum globalen Koordinatensystem exakt zu bestimmen, um den Bewegungswunsch von den Globalkoordinaten in Krankoordinaten umrechnen zu können, damit sich mit Hilfe einer inversen Kinematik die hierfür notwendigen Gelenkgeschwindigkeiten berechnen lassen, sodass die gewünschte Hakenbewegung (Ausgabe) parallel zur Benutzereingabe resultiert. Die Bestimmung der Hakenposition kann dabei sowohl in Polarkoordinaten (Radius r , Auslegerwinkel $\varphi_{Ausleger}$, Hakenhöhe z) als auch in kartesischen Koordinaten erfolgen.

5.4.1. Messung der Bedienerorientierung

Die Untersuchungen zur Position des Nutzer-Referenz-Koordinatensystems in Kapitel 4.3 ergeben, dass das für die Bewegungsvorgabe durch den Bediener relevante Koordinatensystem mit der Funksteuerung verknüpft werden kann. Aus diesem Grund ist es notwendig, ein Sensorikkonzept zu entwickeln, das die Verdrehung des Funksteuerungs-Koordinatensystems relativ zum globalen Krankoordinatensystem (Winkel Δ_{Nutzer} in Abbildung 4-5) zuverlässig und robust messen kann. Der Verdrehwinkel der Funksteuerung gegenüber dem Krankoordinatensystem wird als Orientierung bezeichnet. Die Begriffe Gierwinkel und die englische Übersetzung Heading können synonym verwendet werden.

Anforderungen an die Orientierungsmessung

Die Anforderungen an das Messsystem sind in Tabelle 5-6 dargestellt. Sie ergeben sich aus den Basisanforderungen an die intuitive Laststeuerung und der Anforderungsliste aus Kapitel 5.1. Zusätzlich wurden einige Detailanforderungen in enger Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) oder auf Basis von Erfahrungswerten definiert.

Tabelle 5-6: Anforderungen an das Messsystem zur Messung der Funksteuerungsorientierung

Anforderung	Optimaler Wert	Kritischer (Mindest-)Wert	Quelle
Messkonzept	integriert in Funksteuerung	ohne aufwendige Umgebungsinfrastruktur	Basisanforderung
Genauigkeit (Richtigkeit)	1°	5°	Kapitel 5.1
Präzision (Wiederholgenauigkeit)	0,5°	2°	Festlegung PA
Updaterate	100 Hz	2 Hzt	Festlegung PA
Zeitverhalten (Drift)	< 2°/60 min	< 10°/90 min	Festlegung PA
Unabhängigkeit von räumlicher Orientierung	gegeben: Lageerfassung mit Überkopferkennung		Festlegung PA
Initialisierung	automatisch bei Inbetriebnahme	Auslösung durch Benutzer	Festlegung PA
Initialisierungszeit	< 2 s	< 10 s	Festlegung PA
Schutzart	IP 65 (wenn verbaut)	IP 44	Kapitel 5.1
Temperaturbereich	-30°C < T < 50°C	15°C < T < 25°C	Kapitel 5.1
Ausgabeschnittstellen	passend zu Gesamtsystem (Integrierbarkeit)	passend mit Hilfe von Schnittstellenwandlung	Kapitel 5.1
Energieversorgung	aus Akku der Funksteuerung	durch integrierten Zusatzakku	Kapitel 5.1
Energiebedarf	< 2 W	< 5 W	Festlegung PA
Kosten	< 100 €	< 400 €	Kapitel 5.1
Robustheit (mechanisch)	Sturz aus 1 m Höhe (wenn verbaut)	Sturz aus 0,2 m Höhe (wenn verbaut)	Kapitel 5.1
Störungsunempfindlichkeit	Metalle, Magnetfelder, Spannungsschwankungen, Störlicht, Schmutz, RF-Signale	Metalle, Magnetfelder, Schmutz, RF-Signale	Kapitel 5.1
Betriebsbedingungen	statischer und dynamischer Betrieb (Schrittgeschwindigkeit)		Kapitel 5.1
Verfügbarkeit	auf Abruf jederzeit		Kapitel 5.1

Auf Basis der Anforderungen soll ein tragbares System entstehen, dass sich im Idealfall in vorhandene Funksteuerungen integrieren lässt, mindestens aber ohne aufwendige Umgebungsinfrastruktur auskommt. Die Festlegungen für Präzision, Genauigkeit und Drift werden unter der Annahme getroffen, dass die Funksteuerung durch den Bediener auf 10° genau ausgerichtet gehalten werden kann (ergonomischer Erfahrungswert). Mit Blick auf wechselnde Einsatzorte, wie sie bei vielen Kranen üblich sind, soll das System nach dem Einschalten ohne vorhergehende Kalibrierung umgehend einsatzbereit und initialisierbar sein. Weiterhin bedingt der mobile Einsatz auch die Forderung nach einer entsprechenden Schutzart, mechanischer Robustheit (Stoß) sowie der Unempfindlichkeit gegen eine Vielzahl möglicher Störeinflüsse. Die Temperaturbereiche sind so gewählt, dass der Kran auch unter fordernden Bedingungen (optimaler Wert) betrieben werden kann, mindestens aber unter prototypentauglichen Bedingungen (kritischer Wert). Ferner werden die elektrischen Kennwerte so gewählt, dass aktuelle Lithium-Polymer-Akkumulatoren mit einer Betriebsspannung von 3,7 V, wie sie in der ausgewählten Funksteuerung verbaut sind, das System für mehrere Stunden betreiben können. Der Energiebedarf ist dabei möglichst klein zu halten, um die Akkulaufzeit nicht zu stark zu verkürzen.

Die aufgeführten Maximalkosten ergeben sich aus der Anforderung, dass die Sensorik an allen Krantypen ökonomisch sinnvoll verwendbar sein soll, also auch bei kleinen und damit kostensensitiven Krangrößen. Der Kostenrahmen ist zudem ein weiterer Grund, auf den Einsatz aufwendiger und damit kostenintensiver Infrastruktur in der Kranumgebung zu verzichten.

Die Anforderungen für die Updaterate sowie die Betriebsbedingungen (Bewegung maximal mit zügiger Schrittgeschwindigkeit) ergeben sich aus der Bewegung des Kranführers, die eine regelmäßige Aktualisierung der Bedienerausrichtung notwendig macht. Dies bedingt außerdem die vollständige, regelmäßige Übertragung aller Positionsdaten (Ausrichtung und ggf. Signalisierung von Überkopfbetrieb) in möglichst kurzen Zeitabständen.

Auswahl eines geeigneten Messkonzepts

Zur Auswahl eines geeigneten Messsystems werden verschiedene Messverfahren verglichen und gegeneinander abgewogen, sodass ein optimaler Sensorsatz für die gestellte Aufgabe gefunden werden kann. Tabelle 5-7 zeigt die betrachteten Messverfahren.

Tabelle 5-7: Übersicht über betrachtete Messverfahren zur Orientierungsbestimmung

Klasse	Messverfahren	Wirkprinzip	Kosten (ca.)	K.O.-Kriterium
MEMS-Inertialsensorik	Einzelsensoren: Gyroskop, Accelerometer, Magnetometer	Beschleunigungsmessung (linear oder angular), Magnetfeldmessung	40-200 €	
MEMS-Inertialsensorik	Verteilte Einzelsensoren mit bekanntem Abstand	räumlich getrennte Messung, Umrechnung in Gesamtbewegung	40 - 200 € je Sensor	
MEMS-Inertialsensorik	Kombinierte Sensoren (9 DOF MARG)	Beschleunigungsmessung (linear oder angular), Magnetfeldmessung	40 €	
MEMS-Inertialsensorik	Kombinierte Sensoren (9 DOF MARG) + Datenfusion	Beschleunigungsmessung (linear oder angular), Magnetfeldmessung, Fusionsalgorithmus	50 - 300 €	
Gyroskopbasiert	Mechanisches Gyroskop	Kreiselkräfte	500 € (gebraucht)	Kosten
Gyroskopbasiert	Optisches Gyroskop	Ringlaser, Faserlaser	K.O.	Kosten
Gyroskopbasiert	HRG-Gyrokompass	Corioliskraftbasierte Vibrationen in einem Quarzkristall, Beschleunigungsmessung, Datenfusion	K.O.	Kosten
Magnetfeldbasiert	Mechanischer Kompass	Permanentmagnet, Erdmagnetfeld	10 - 100 €	Störungen
Magnetfeldbasiert	Elektronischer Kompass	Hall-Effekt, Erdmagnetfeld	10 - 100 €	Störungen
Optisch	Laser- oder Infrarot-Trilateration	Entfernungsmessung durch Laufzeitunterschiede, Schnittpunktberechnung	K.O.	Kosten, Störungen, Reichweite
Optisch	Infrarot-Triangulation	Messung des Einfallswinkels von Infrarotlicht, Schnittpunktberechnung	K.O.	Kosten, Störungen
Optisch	Bildverarbeitung	Muster- und Farberkennung	50 - 300 €	Witterung, Licht
Optisch	LIDAR	Laser-Entfernungsmessung, Laufzeitunterschiede	> 500 €	Kosten
Akustisch	Ultraschall	Laufzeitmessung	10 - 200 €	Reichweite, Störungen
Funk	Radar, GPS, UWB, Bluetooth, ISM etc.	Laufzeitmessung, Schnittpunktberechnung	10 - 1000 €	Genauigkeit, Infrastruktur

Die dargestellten MEMS-Konzepte⁴ basieren auf der Messung von inertialen Größen (Drehbeschleunigung, Linearbeschleunigung) sowie dem Erdmagnetfeld in jeweils drei Raumrichtungen (Degrees of Freedom – DOF). Sie werden auch als MARG-Sensoren (engl: MARG – magnetic, angular rate, gravity) bezeichnet. Es kommen entweder Einzelsensoren zur Messung einer Größe zum Einsatz oder Sensorkombinationen. Sensorkombinationen liefern entweder unabhängige Messwerte der verschiedenen Größen (drei Messgrößen in je drei Raumrichtungen: 9 DOF MARG) oder besitzen eine integrierte Sensordatenfusion, die aus den unabhängigen Messwerten eine Gesamtmessung fusioniert und ausgibt (9 DOF MARG + Datenfusion).

Die angegebenen Preise ergeben sich auf Basis einer Kleinstmengendeckung für den Prototypenbau. Insbesondere bei den MEMS-Bausteinen kann eine größere Abgabemenge für eine Preisreduktion in mehreren Größenordnungen sorgen.

Es zeigt sich, dass ausschließlich MEMS-basierte Messverfahren nicht durch eines der K.O.-Kriterien, die sich aus den Anforderungen an das Messkonzept ergeben, ausscheiden. Insbesondere die Systemkosten, die Robustheit gegen Störungen im industriellen Umfeld (elektromagnetische Felder, Witterung, Lichtverhältnisse), die Genauigkeitsanforderungen sowie der Verzicht auf aufwendige Infrastruktur führen letztendlich zum Ausschluss aller anderen Messkonzepte. Aus diesem Grund wird für die intuitive Laststeuerung ein Messkonzept auf der Basis von MEMS-Sensorik mit Inertialsensoren und Magnetfeldmessung, das in die Funksteuerung integriert wird, untersucht. Zu beachten ist dabei, dass MEMS-Magnetometer im industriellen Umfeld der gleichen Störungsgefahr durch verzerrte Magnetfelder ausgesetzt sind wie mechanische und elektronische Komponenten. Daher sollte auf eine Kombination verschiedener MEMS-Sensoren zurückgegriffen werden, um entweder bei der Magnetfeldmessung auftretende Fehler kompensieren zu können oder eine Messung vollkommen ohne Magnetfeldauswertung zu ermöglichen, indem lediglich auf lineare Beschleunigungen und Drehbeschleunigungen (Inertialgrößen) zurückgegriffen wird.

Aus Gründen der Robustheit gegen externe Einflüsse und der erreichbaren Genauigkeit wird ein Messsystem mit integrierter Sensordatenfusion verwendet, das aus den Messwerten der einzelnen Sensoren mit Hilfe eines Micro-Controllers und entsprechender Fusions-Algorithmen einen Orientierungs-Messwert berechnet. Die Messung der Inertialgrößen (lineare Beschleunigung, Drehbeschleunigung) erfolgt dabei in aller Regel über schwingende Mikrostrukturen, deren Auslenkung zu Spannungsveränderungen im Messelement führt, die als Messsignal erfasst werden können. Mit Hilfe der Sensordatenfusion lassen sich unvollständige oder imperfekte Einzelmessungen zu einem plausiblen, robusten Messwert fusionieren, um die Qualität des Messergebnisses zu verbessern, indem redundante Daten

⁴ MEMS: Micro-elektro-mechanical System, dt. elektronisches Mikrosystem mit mechanischen Sensoren.

verschiedener Sensoren miteinander verknüpft werden. So lassen sich die Schwächen der einzelnen Sensortypen gezielt durch Stärken der anderen Sensoren kompensieren. Zu den allgemeinen Grundlagen der MEMS-Technologie und Sensordatenfusion sei an dieser Stelle auf einschlägige Literatur verwiesen, z. B. [Ber-2003][Ber-2014][Kem-2013][Koc-2014].

Messsystem zur Orientierungsmessung

Für die Messung der Benutzerorientierung mit Hilfe von MEMS-Sensorik wird auf ein kommerziell erhältliches System der Firma Xsens Technologies zurückgegriffen. Es handelt sich um den Sensorbaustein MTi-3 AHRS⁵ (siehe Abbildung 5-6). Ähnliche Elektronikbausteine existieren auch von anderen Herstellern.

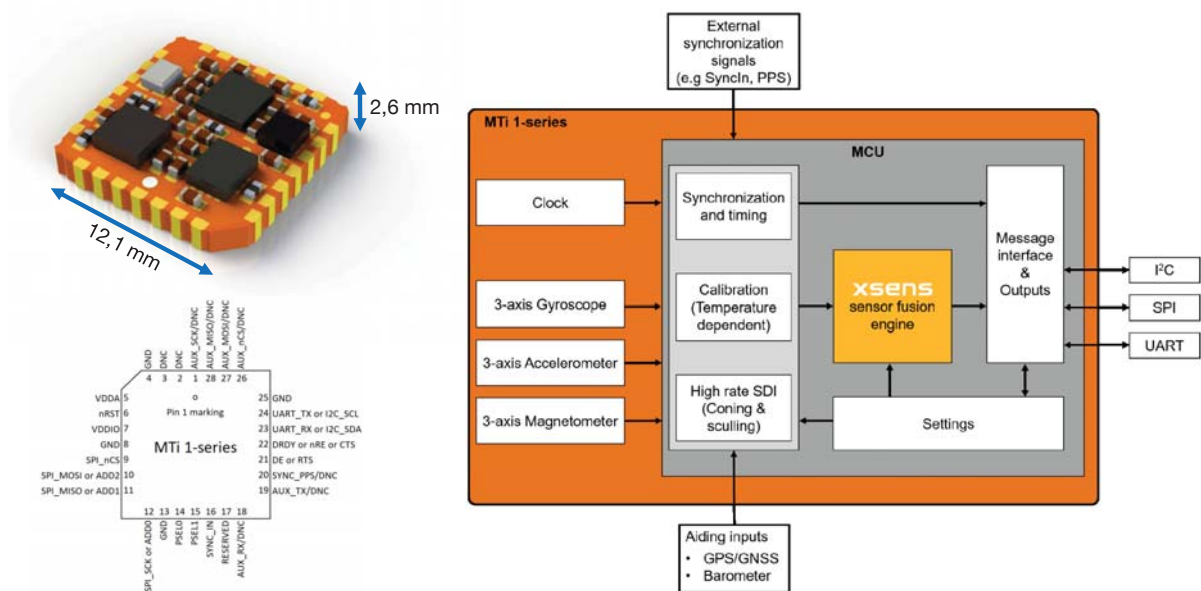


Abbildung 5-6: IMU-Sensorbaustein MTi-3 AHRS der Firma Xsens Technologies: Rendering (links oben), Pin-Belegung (links unten) und Moduldiagramm (rechts) [Xse-2018]

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 5-6 als schwarze Boxen dargestellt. Die Sensoren werden einer Micro-Controller-Einheit (MCU) ausgewertet und zu Roll-, Nick- und Gierwinkel fusioniert. Auch der MCU ist als schwarze Box in Abbildung 5-6 abgebildet. Die Ausgabe der Messrohdaten sowie der fusionierten Orientierungswinkel erfolgt über verschiedene digitale Schnittstellen (u. a. I²C, SPI, UART). Die Auswahl eines passenden Fusionsalgorithmus' sowie die Konfiguration der weiteren Einstellungen (Datenformat, Updaterate etc.) erfolgt über eine Konfigurationssoftware der Firma Xsens.

⁵ AHRS: Attitude Heading Reference System. Messsystem zur Bestimmung von Roll-, Nick- und Gierwinkel, wie es beispielsweise zur Steuerung von Flugzeugen eingesetzt wird.

Abbildung 5-6 zeigt zusätzlich die Pin-Belegung des Sensorbausteins sowie die Außenabmaße. Eine Integration in die Funksteuerung ist durch die kleinen Abmaße und die Kontaktierung über Elektronik-Pins problemlos möglich. Auf zusätzliche Eingangsgrößen, die von außen an den MTi-3 angeschlossen werden können (Synchronisation, GPS, Barometer etc.) wird verzichtet.

Die Sensorfusionsalgorithmen, aus denen ausgewählt werden kann, ermöglichen eine Vielzahl von Einstellungen. Beispielsweise ist es möglich, kurzzeitige Magnetfeldstörungen durch die höhere Gewichtung der Dreh- und Linearbeschleunigungen zu kompensieren, oder für die Berechnung von Roll-, Nick- und Gierwinkel vollständig auf die Auswertung des Magnetfelds zu verzichten. Der letzte Fall zeigt sich in ersten Vorversuchen als extrem robust gegenüber elektromagnetischen Feldern und anderen Störungen des Erdmagnetfelds (z. B. durch Stahlarmierung in Betonböden) und wird folglich im Rahmen der intuitiven Laststeuerung weiter verfolgt. Deshalb wird aus den verfügbaren Sensorfusionsprofilen *VRU_general* ausgewählt. Das Profil eignet sich sehr gut für Umgebungen mit durch äußere Einflüsse schwer gestörtem Magnetfeld [Xse-2018, S.19], wie es im industriellen Umfeld der Kranbedienung 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). Im weiteren Verlauf wird für dieses Problem eine einfache Lösung in Form eines festen Referenzpunkts präsentiert.

In Tabelle 5-8 sind die relevanten technischen Daten des MTi-3 AHRS aufgeführt. Die Daten sind der Herstellerdokumentation [Xse-2018] entnommen.

Der MTi-3 AHRS erfüllt somit bereits folgende Anforderungen an das Messkonzept zur Messung der Bedienerorientierung:

- Integrierbarkeit des Messkonzepts (Baugröße, Gewicht)
- Genauigkeit der Gierwinkelmessung
- Updaterate
- Lageerfassung
- Initialisierung
- Betriebstemperaturbereich
- Schnittstellen
- Energieversorgung
- Energiequelle und -bedarf
- Störungsunempfindlichkeit
- Betriebsbedingungen (statisch & dynamisch bis zügige Schrittgeschwindigkeit)

Vor der Integration des Messbausteins in die Funksteuerung wurden einige Vorversuche durchgeführt, um das Messkonzept im Hinblick auf die Anwendung bei der intuitiven Laststeuerung weiter zu untersuchen. Die Vorversuche fanden auf der Freifläche des Lehrstuhls fml statt, auf der sich der Demonstratorkran für die intuitive Laststeuerung befindet. Für die Vorversuche wird der MTi-3 an verschiedenen Stellen positioniert (statische Versuche) oder

Tabelle 5-8: Technische Spezifikation des verwendeten Sensorbausteins MTi-3 AHRS [Xse-2018]

Eigenschaft	Ausprägung (Wert)
Abmaße (L x B x H)	12,1 mm x 12,1 mm x 2,6 mm
Masse	0,6 g
Genauigkeit bei der Gierwinkelmes- sung	2°
Updaterate	max. 100 Hz
Zeitverhalten (Drift) des Gyroskops	< 10°/h
Ausgabe (u. a.)	Kalibrierte Werte für Roll-, Gier- und Nickwinkel (Lageerfassung).
Initialisierung	automatisch bei Spannungsversorgung
Betriebstemperaturbereich	-40°C - 85°C
Ausgabeschnittstellen	I ² C, SPI, UART
Betriebsspannung	2,16 V - 3,6 V
Energiebedarf	100 mW
Statischer und dynamischer Betrieb	möglich (dynamisch bis 2000°/s)

mit zügiger Schrittgeschwindigkeit in der Versuchsumgebung bewegt (dynamische Versuche). In beiden Fällen werden die Messergebnisse mit Hilfe eines Laptops erfasst und ausgewertet. Die Ergebnisse der Vorversuche sind im Folgenden zusammengefasst.

Vorversuche: Statisches Verhalten

Der Sensor wird an verschiedenen Stellen auf der Versuchsfläche positioniert und nicht mehr bewegt. Der gemessene Gierwinkel wird über die Zeit aufgezeichnet.

- Das Zeitverhalten des Sensors (Driftstabilität) ist sehr gut. Bei unveränderten äußeren Bedingungen (Temperatur, elektromagnetische Felder) ist der Gierwinkel-Drift kleiner als 2°/h.
- In der Nähe von eingeschalteten Quellen elektromagnetischer Felder (Elektromotor, Netzteile, Schaltschränke) sinkt die Driftstabilität deutlich ab. Platziert man den Sensor in einem faradayschen Käfig zur Abschirmung der äußeren elektromagnetischen Felder verbessert sich die Driftstabilität erheblich und liegt bei weniger als 2°/h. Lediglich die unmittelbare Nähe (< 70 cm) zum Drehstrommotor des Hydraulikaggregats (30 kW) sorgt trotz faradayschen Käfigs für eine Verschlechterung des Driftverhaltens auf ca. 5°/20 min. Die Messung der Benutzerausrichtung direkt am Elektromotor stellt jedoch einen vermeidbaren Sonderfall bei der Kransteuerung dar, sodass der faradaysche Käfig insgesamt für eine zufriedenstellende Driftstabilität des Sensors in der Gegenwart elektromagnetischer Felder sorgt.

- Elektromagnetische Störungen aus der Funkverbindung zwischen Funksteuerung und Funkempfänger sowie den Kran-Steuerbefehlen, die per Funk übertragen werden, haben keinen Einfluss auf die Driftstabilität und das Messergebnis, selbst wenn sich der Sensor im Inneren der Funksteuerung befindet.
- Stromlose Elektronikkomponenten in der Nähe des Sensors haben keinen Einfluss auf die Driftstabilität und das Messergebnis.
- Metallstrukturen (Kranbau, Stahlarmierung im Betonboden) haben keinen Einfluss auf die Driftstabilität und das Messergebnis.
- Bei starken Temperaturschwankungen während der Messung wird eine Verschlechterung der Driftstabilität beobachtet. Dies wird im Rahmen weiterer Messreihen mit dem in die Funksteuerung integrierten Sensor untersucht.
- Die Initialisierungszeit des Sensor bis zur Ausgabe des ersten Messwerts liegt unter 2 s.

Vorversuche: Dynamisches Verhalten

Der Sensor wird mit zügiger Schrittgeschwindigkeit (ca. 1,7 m/s) auf der Versuchsfläche bewegt. Nach jeweils einer Minute Bewegung wird eine vorher definierte Referenzposition angelaufen und der gemessene Orientierungswert dokumentiert. Vor der nächsten Bewegung wird der Sensor einige Minuten nicht bewegt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Unabhängig von der Gehgeschwindigkeit bewegt sich die Präzision (d. h. Wiederholgenauigkeit) des Gierwinkels an der Referenzposition auch bei vielfacher Wiederholung unterschiedlicher Bewegungsfolgen deutlich unter 1° .
- Die Messung des Orientierungswinkels erfolgt präzise und unabhängig von der Lage des Sensors, auch bei Überkopfbewegungen und Sensordrehungen um mehrere Achsen.
- Der Drifteinfluss des Sensors überwiegt den Präzisionsfehler deutlich.
- Die eingestellte Updaterate von 100 Hz für die Messergebnisse ist für eine echtzeitnahe Auswertung des Orientierungswinkels mehr als ausreichend.

Die Vorversuche belegen die grundsätzliche Eignung des MTi-3 AHRS für den Einsatz in der intuitiven Laststeuerung. Nach der Integration des Messsystems in die Funksteuerung und in das Gesamtsystem am Kran werden weitere Untersuchungen bezüglich der Driftstabilität empfohlen, um die korrekte Funktion der Orientierungsmessung zu validieren.

Integration in das Eingabegerät

Im nächsten Schritt wird der MTi-3 AHRS in die Funksteuerung integriert. Zu diesem Zweck wird eine einfache Prototypen-Platine gestaltet, die den Sensor mit Hilfe eines Standard-Sockets trägt (siehe Abbildung 5-7).

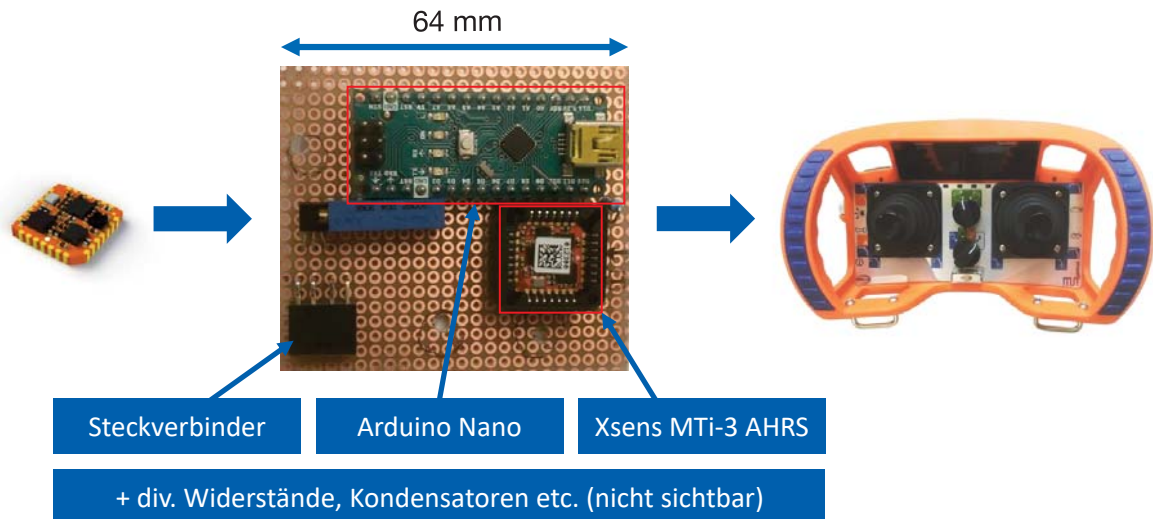


Abbildung 5-7: Integration des MTi-3 AHRS in die Funksteuerung der intuitiven Laststeuerung

Um eine Konfiguration des Sensors mit Hilfe eines Laptops ohne Demontage zu ermöglichen, wird auf der Platine zusätzlich ein Micro-Controller mit USB-Anschluss vom Typ Arduino Nano verbaut, der gleichzeitig als Schnittstellenwandler fungiert. Die Sendeeinheit der Funksteuerung überträgt das Messsignal für den Orientierungswinkel anschließend über die Funkstrecke an den Empfänger. Dort wird der Orientierungswinkel über den gleichen CANopen-Safety-Bus in Richtung Steuergerät ausgegeben wie die Steuerbefehle, die der Benutzer an der Funksteuerung eingibt. Somit steht der Orientierungswinkel der Funksteuerung am Steuergerät der intuitiven Laststeuerung zur Verfügung und kann dort zur Berechnung der Gelenkbewegungen am Kran verwendet werden.

Die Abmaße der Platine inklusive MTi-3 AHRS, Arduino Nano, Steckverbinder etc. beträgt ca. 64 mm x 57 mm x 10 mm. Die Montage der Platine innerhalb der Funksteuerung erfolgt über drei Schrauben. Durch die Montage der Sensorplatine im Inneren der Funksteuerung ist das Messsystem robust vor Beeinträchtigungen durch Störlicht (starke Sonneneinstrahlung) und Feuchtigkeit bzw. Schmutz (IP 65) geschützt. Einen Falltest aus 20 cm Höhe auf eine harte Betonoberfläche übersteht das System ohne Schaden. Die Akkulaufzeit der Funksteuerung mit integrierter Messplatine liegt deutlich über 10 h. Die Verkürzung der Akkulaufzeit durch die Messplatine liegt somit im vernachlässigbaren Bereich. Die Kosten der Messplatine inklusive Sensor, Arduino Nano und Peripherie liegen bei ca. 300 € und damit ebenfalls im Rahmen der Anforderungen.

Somit sind alle Mindestanforderungen an das Messsystem zur Messung der Funksteuerungsorientierung (siehe Tabelle 5-6) erfüllt. Zum besseren Systemverständnis ist das Driftverhalten im Zusammenhang mit äußeren Einflüssen (elektromagnetische Strahlung, Bewegung der Steuerung, Temperatur) Gegenstand weiterer Untersuchungen, die in Kapitel 5.8 präsentiert werden.

Referenzierung der Orientierungsmessung

Als letzter offener Punkt wird eine Lösung für die Referenzierung der Steuerung zu Beginn der Messung vorgestellt. Durch den Verzicht auf die Berücksichtigung der Magnetfeldinformationen im Rahmen der Sensorfusion ist keine absolute Orientierungsangabe (in Grad absoluter Abweichung zum Nordpol) möglich, sondern lediglich eine relative Messung zu einem bestimmten Bezugssystem. Als Bezugssystem wird das globale Krankoordinatensystem (x_{global} , y_{global} , siehe Abbildung 4-5) gewählt. Zur genauen und präzisen Referenzierung der Funksteuerung bei Initialisierung des Messsystems wird eine nach oben offene Kunststoffbox fest am Kranrahmen angebracht. Die Position der Box am Rahmen ist ebenfalls in Abbildung 4-5 dargestellt. Abbildung 5-8 zeigt die am Kranrahmen angebrachte Box sowie die Box mit der darin stehenden Funksteuerung.



Abbildung 5-8: Box zur Referenzierung der Funksteuerung im Bezug auf das Krankoordinatensystem

Wird die Funksteuerung in die Box gestellt und dort angeschaltet, erfolgt automatisch die Initialisierung des Ortungssystems. Die Orientierung der Steuerung, wenn sie sich in der Box befindet, wird als Nullpunkt der Orientierung festgelegt. Somit wird die Orientierung, wenn die Funksteuerung aus der Box genommen und im Kranumfeld bewegt wird, immer relativ zu dieser Nullposition gemessen. Die aus ABS⁶ mit Hilfe eines 3D-Druckers hergestellte Box ist so gestaltet, dass die Funksteuerung nur in der korrekten Orientierung in die Kiste gestellt werden kann. Eine eindeutige Referenzierung ist somit stets gewährleistet. Da die Box fest am Kran verbaut und damit mit dem globalen Krankoordinatensystem x_{global} , y_{global} verbunden ist, eignet sich diese Form der Referenzierung auch für Krane, deren Position veränderlich ist (Mobilkrane, Ladekrane etc.).

Für eine industrielle Anwendung der intuitiven Laststeuerung wäre es beispielsweise denkbar, die Referenzierungsbox gleichzeitig als Ladestation für die Funksteuerung zu verwenden. Dies würde bedeuten, dass die die Steuerung ohnehin in der Box befindet, wenn der Kran nicht in Betrieb ist, um den Akku zu laden. Bei einer Entnahme der Steuerung fände dann die automatische Referenzierung statt.

⁶ ABS: Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere. Dabei handelt es sich um eine Kunststoffgruppe, der sich durch hohe Stabilität und sehr gute Witterungsbeständigkeit auszeichnet.

Validierung der Orientierungsmessung

Nach der Integration der Orientierungsmessung in die Funksteuerung wird der Funktionsnachweis der Gierwinkelmessung im Rahmen einer Validierungsstudie erbracht. Zu diesem Zweck wird das in die Funksteuerung integrierte Sensorsystem unter realen Bedingungen am Demonstrator der intuitiven Laststeuerung vermessen. Hierbei werden sowohl statische als auch dynamische Szenarien sowie unterschiedliche äußere Einflüsse (Temperatur, elektromagnetische Felder etc.) untersucht.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Anforderungen an Genauigkeit und Präzision des Messsystems werden unter üblichen Anwendungsumständen erfüllt.
- Die Temperaturkalibrierung des Messsystems bietet Verbesserungspotenzial. Eine sichere und robuste Ausrichtungsmessung mit maximal 10° Abweichung des Messwerts über die in den Anforderungen vorgesehene Zeitdauer von 90 min ist mit dem ausgewählten Messsystem nur im Temperaturbereich von ca. 15°C - 25°C möglich. Bei höheren und niedrigeren Temperaturen ($0^\circ\text{C} < T < 15^\circ\text{C}$ sowie $25^\circ\text{C} < T < 35^\circ\text{C}$) ist diese Anforderung lediglich über die Zeitdauer von 45 min zu erfüllen. Höhere und tiefere Temperaturen konnten nicht untersucht werden.
- Das integrierte Messkonzept erfüllt die Anforderungen an die Störungsunempfindlichkeit im Bezug auf Funksignale und Metalle in der Umgebung der Funksteuerung. Die Verzerrung des Erdmagnetfelds durch leitfähige Materialien im Steuerungsumfeld hat durch den Verzicht auf die Magnetfeldmessung keine Auswirkungen auf das Messergebnis.

Da die Validierungsstudie am fertigen Demonstrator stattfindet, wird sie in Kapitel 5.8 im Rahmen des Funktionsnachweises der intuitiven Laststeuerung ausführlich präsentiert. Die Anforderungen an das Orientierungsmesssystem für die intuitive Laststeuerung können jedoch bereits jetzt als erfüllt betrachtet werden.

5.4.2. Messung der Hakenposition

Neben dem Verdrehwinkel Δ_{Nutzer} des Benutzers (siehe Abbildung 4-5) relativ zum globalen Koordinatensystem ist es für die intuitive Laststeuerung notwendig, die exakte Hakenposition ($x_{Haken}, y_{Haken}, z_{Haken}$ bzw. $r_{Haken}, \varphi_{Ausleger}, z_{Haken}$) zu kennen, um die vom Bediener gewünschte Bewegung (Eingabe) auf die Hakenbewegung (Ausgabe) umrechnen zu können. Die Hakenposition lässt sich mit Hilfe der Gelenkstellungen aller Kran-Freiheitsgrade über die kinematische Kette ermitteln. Hierzu besitzt jedes Gelenk einen eigenen Sensor. Im Fall der rotatorischen Freiheitsgrade q_1, q_2 und q_3 handelt es sich dabei um in die Drehgelenke verbaute inkrementelle Drehgeber. Beim Teleskopausschub q_4 kommt ein Seilzugsensor zur Längenmessung zum Einsatz. Abbildung 5-9 zeigt eine Skizze der geometri-

schen Zusammenhänge. Die Größen $\varphi_{Ausleger}$, 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 b beschreibt die Höhe des Krandrehpunktes über dem Boden (Bodenabstand). Die Messung des Drehwinkels $\varphi_{Ausleger}$ erfolgt von der x-Achse aus, die senkrecht auf dem Montagerahmen des Krans steht.

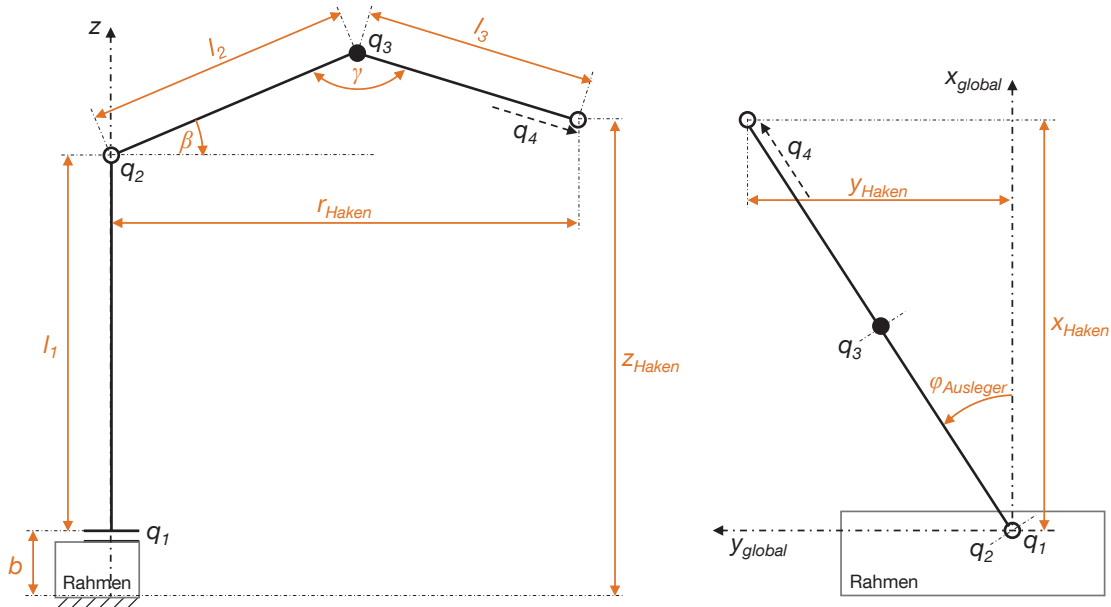


Abbildung 5-9: Geometrische Zusammenhänge für die Bestimmung der Hakenposition (Skizze): Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts)

Es ergeben sich folgende Formeln zur Berechnung der Hakenposition:

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

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

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

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

Alle vier Gelenksensoren geben ihre Messwerte im Format CANopen-Safety auf den gemeinsamen CAN-Bus aus und stehen so dem Steuergerät zur Berechnung der Hakenposition zur Verfügung. Die Messgenauigkeit der Gelenksensoren wird 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 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 Genauigkeit der Gelenkmessungen und damit die Genauigkeit der Hakenpositionsberechnung wird somit als hinreichend beurteilt.

5.5. Entwurf des Steuerungs- und Regelungskonzepts

In den vorherigen Abschnitten wurde zunächst ein Eingabegerät in Form einer Funksteuerung spezifiziert und ausgewählt, um vom Kranbediener den Bewegungswunsch der Last aufzunehmen. Hierfür wird ein Joystick vom Bediener in die entsprechende Richtung bewegt. Anschließend wurde eine Lösung entwickelt, wie die Eingabe am Joystick – und damit die gewünschte Hakenbewegung – vom Benutzerkoordinatensystem x_{Nutzer}, y_{Nutzer} über den Gierwinkel Δ_{Nutzer} in das globale Krankoordinatensystem x_{Kran}, y_{Kran} umgerechnet werden kann. Ist der Winkel Δ_{Nutzer} durch die Messung bekannt, kann zur Umrechnung zwischen den beiden Koordinatensystemen eine Rotationsmatrix für die Rotation um die z-Achse um den Winkel Δ_{Nutzer} verwendet werden. Über den Krandrehwinkel $\varphi_{Ausleger}$ und den Hakenradius r_{Haken} ist es anschließend möglich, den Eingabewunsch des Benutzers in das hakengebundene Koordinatensystem $x_{Ausleger}, y_{Ausleger}$ umzurechnen.

Damit liegt der Bewegungswunsch des Kranbedieners (Eingabe) nun im hakenfesten Koordinatensystem vor (gewünschte Ausgabe), und es stellt sich die Frage, wie die Gelenkbewegungen q_1 bis q_4 aussehen müssen, damit als Summe aller Gelenkbewegungen die entsprechende Bewegung am Haken resultiert. Zu diesem Zweck wird für den Demonstrator-Ladekran eine Auslegerspitzensteuerung entwickelt. Die Auslegerspitzensteuerung besteht aus einer inversen Kinematik zur Umrechnung von der gewünschten Hakenbewegung auf die entsprechenden Gelenkbewegungen, und einem Regelungskonzept, um die Krangelenke hierzu passend möglichst exakt ansteuern zu können und auf durch Störungen verursachte Abweichungen zu reagieren.

Teile dieses Kapitels wurden bereits in [Top-2019b] veröffentlicht.

5.5.1. Inverse Kinematik

Der Demonstrator-Ladekran besitzt vier Bewegungsfreiheitsgrade 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

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

geschrieben.

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, sodass gilt:

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

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

$$\mathbf{J}_e = \left[\frac{d\mathbf{h}}{d\mathbf{q}} \right]. \quad (8)$$

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

Die für die intuitive Laststeuerung verwendete inverse Kinematik soll folgende weitere Anforderungen erfüllen:

1. Gelenkbegrenzungen der Kran-Freiheitsgrade 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 sein. Unabhängig von der Hakenposition und der gewünschten Eingabe müssen sinnvolle Gelenkgeschwindigkeiten ausgegeben werden.
5. Die Berechnungen der inversen Kinematik müssen echtzeitfähig sein.

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). Ein Vergleich der Strategien im Bezug auf die Anforderungen ergibt, dass lediglich der Ansatz der CC alle Anforderungen erfüllt. Daher wird dieser Ansatz für die intuitive Laststeuerung ausgewählt. Für die anderen Ansätze gilt:

- PI und JT sind nicht singularitätsrobust (Anforderung 4). Die Anforderungen 1 und 2 können ebenfalls nicht erfüllt werden.
- GPM erfüllt die Anforderungen 1 und 2 nur eingeschränkt.
- WPI und DLS erfüllen die Anforderungen 1 und 2 nicht.

Modifizierte Configuration Control für den Ladekran

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

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

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

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

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

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

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

$$\mathbf{W}_p = \text{diag} \left(0 \quad 0.1 \quad 0.1 \quad 2 \right) \quad (14)$$

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

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

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

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

zusätzlich noch \mathbf{W}_l :

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

$\Delta \left| \frac{\partial H}{\partial q} \right|$ beschreibt 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 bestimmt. Gleichung (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 Bewegungsfreiheitsgraden in Form von Balkenelementen und den Gelenkbegrenzungen zur Definition des Arbeitsraums abbildet (siehe Abbildung 5-10). Die Länge und Beweglichkeit der Balkenelemente entspricht dabei den Gegebenheiten am realen Demonstrator-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

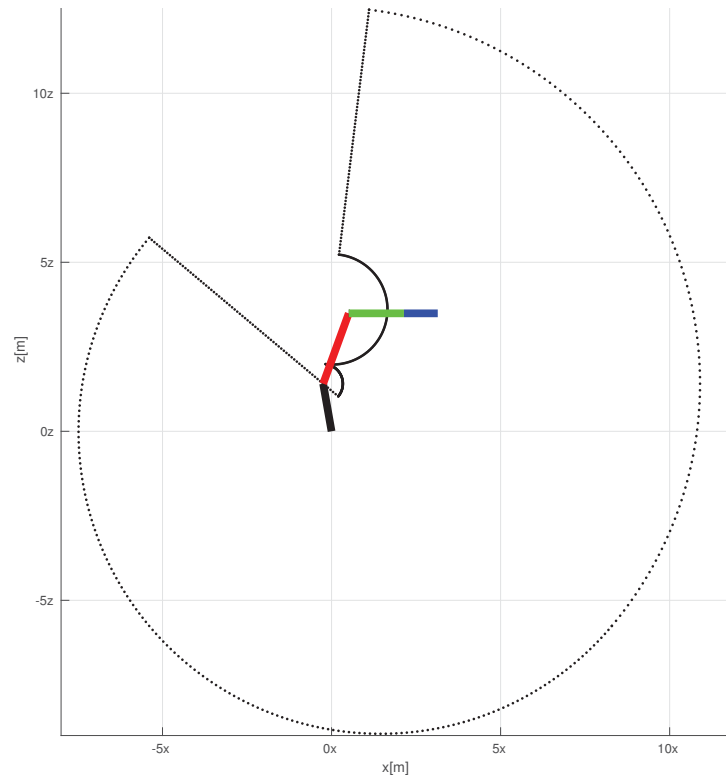


Abbildung 5-10: Balkengrafik des Ladekrans mit Arbeitsraumbegrenzungen (Simulation) [Wag-2018]

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 ist hinnehmbar.
- Gelenkbegrenzungen werden in 100 % der Fälle vermieden.
- In 97,4 % der Bewegungen werden q_2 und q_3 gegenüber q_4 bevorzugt.
- Solange die Eingabe des Benutzerwunsches in Form der gewünschten 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.
- Es kommt in keinem Fall zu Fehlern in der Berechnung oder zum Simulationsabbruch. Die inverse Kinematik ist für den gewählten Anwendungsfall stabil.

Die vorgestellte inverse Kinematik wird somit für die Anwendung im Rahmen der intuitiven Laststeuerung als tauglich beurteilt.

5.5.2. 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.

Aufbau der Regelung

Das realisierte Regelungskonzept ist in Abbildung 5-11 abgebildet.

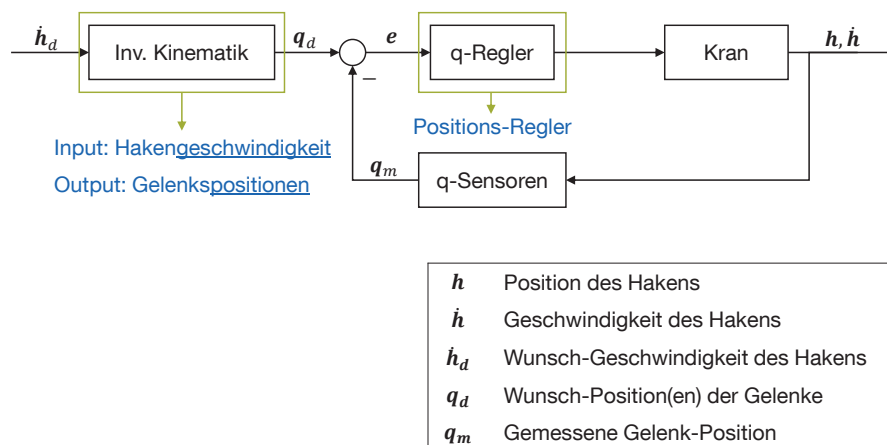


Abbildung 5-11: Regelungskonzept für die Hakenbewegung

Wichtigste Eingabe ist die Wunsch-Geschwindigkeit des Hakens \dot{h}_d , die aus der Benutzereingabe mit Hilfe der Koordinatentransformationen aus Abschnitt 5.4 zuerst zwischen Benutzer- und globalem Krankoordinatensystem und dann zwischen Krankoordinatensystem und Hakenkoordinaten auf die Hakengeschwindigkeit \dot{h} umgerechnet 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 Wunsch-Positionen 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 Wunsch-Stellungen entsteht somit die Hakenbewegung mit der Geschwindigkeit \dot{h} . Nach einer sehr kurzen Zeitdauer erfolgt die Vorgabe der nächsten Gelenkpositionen, und die Bewegung setzt sich fort. Durch kurze Zykluszeiten in diesem Berechnungsalgorithmus entsteht so der Eindruck einer kontinuierlichen Bewegung. Der eigentliche Regelkreis ist nur dafür verantwortlich,

die realen Gelenkpositionen q_m zu messen und mit den Wunsch-Positionen q_d zu vergleichen. Über eine Kompensationsrechnung werden Abweichungen (Fehler e) erkannt und ausgeregelt.

Funktionsnachweis des Regelungskonzepts

Zur Beurteilung ob das Regelungskonzept die ausreichend genaue Positionierung der Krangelenke und damit die Position des Hakens sicherstellen kann, werden Messungen am Demonstrator-Ladekran durchgeführt. Bei den Messungen werden den Einzelgelenken Sollpositionen in kurzen Zeitabständen vorgegeben, wie sie von der inversen Kinematik ausgegeben werden. Die Eingabe in die inverse Kinematik erfolgt durch eine Joystickvorgabe des Bedieners. Gleichzeitig werden über die Gelenksensoren die Istwerte der Gelenke gemessen. Aus den Soll- und Istwerten der Gelenke werden dann die Soll- und Ist-Hakenposition errechnet.

Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 5-12 bis 5-14 abgebildet. Die Kurven in den Abbildungen weisen stellenweise Lücken auf. Diese Lücken treten auf, da der steuernde Joystick vom Kranbediener im Lauf der Messung immer wieder kurz in die Nullposition gebracht wird. 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 5-12 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 Teleskopausschubs (q_4). Es wird deutlich, dass die gemessene Istposition dem vorgegebenen Sollwert sehr exakt folgt. Die Abweichungen bewegen sich meist im Bereich weniger Millimeter. Abbildung 5-13 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. 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 deutlich kleineren hydraulischen Querschnitte der Anschlussleitungen in Verbindung mit erheblich erhöhter Gelenkreibung sehr viel träger zu bewegen ist als die drei anderen Zylinder.

Beim Vergleich der Teleskopausschubbewegungen in den Abbildungen 5-12 und 5-13 wird deutlich, dass die extremen Abweichungen bei ca. 11 s, 20 s und 30 s auftreten. Dies ist genau der Zeitpunkt, an dem der Teleskopausschub aus der Ruhelage heraus stark beschleunigt wird. Die beschriebene hohe Trägheit sorgt für die große Abweichung zwischen

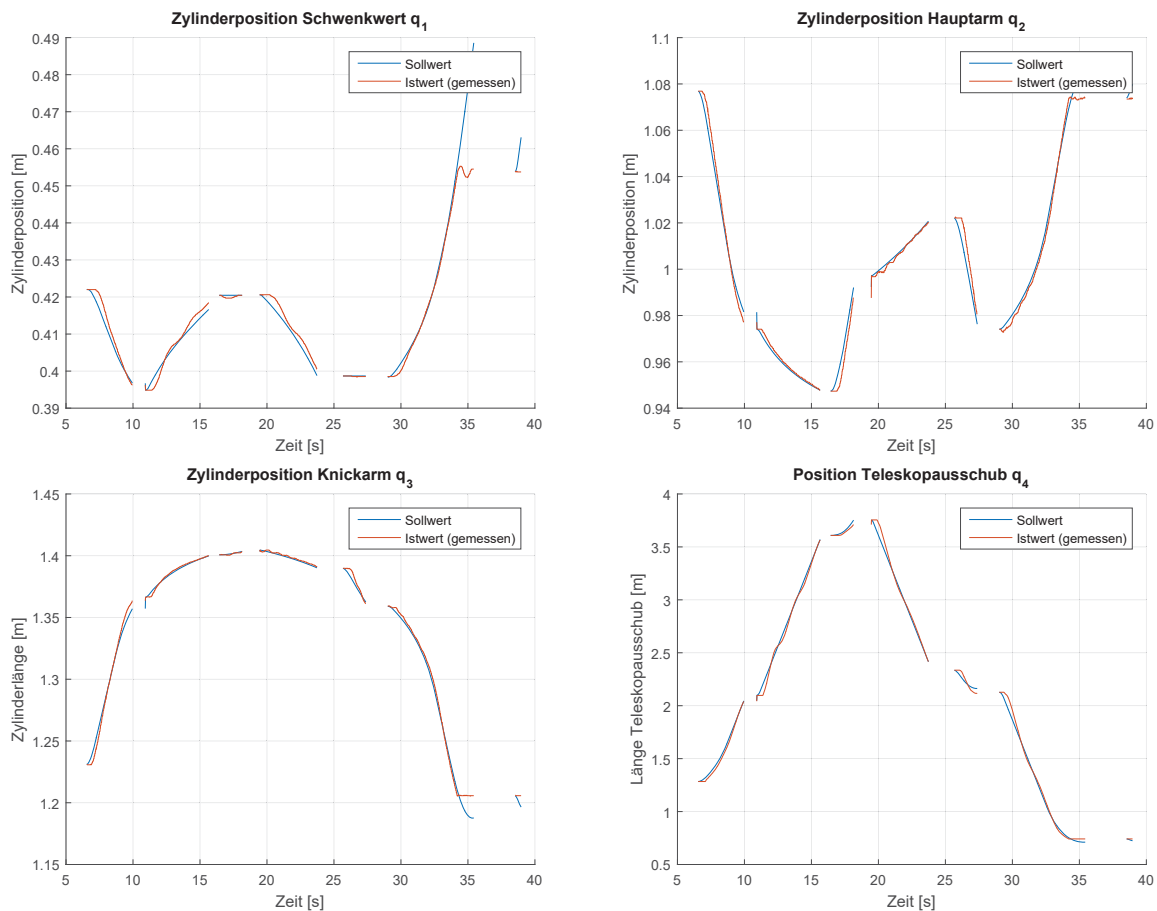


Abbildung 5-12: Positionsregelung der Gelenke (einzeln)

Soll- und Istwert. Außerhalb dieser Beschleunigungsphasen liegt die Positionsabweichung unter 50 mm.

Abbildung 5-14 verdeutlicht, dass die Abweichungen in der Hakenposition trotz der Positionsfehler, die sich bei den Krangelenken ergeben, in einem akzeptablen Bereich liegen. 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 Benutzereingabe 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 Absolutfehler 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.

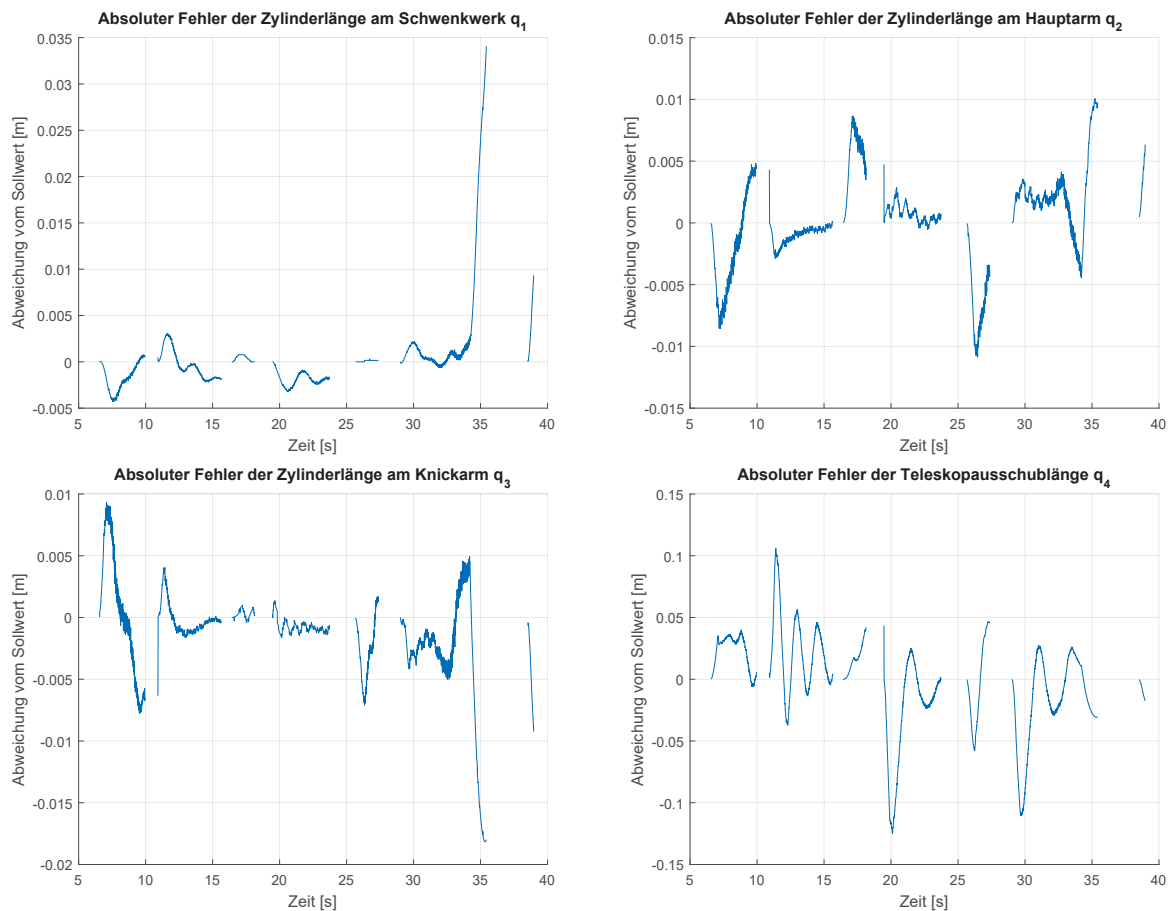


Abbildung 5-13: Absolute Fehler der Zylinderlängen je Gelenk (einzeln)

5.6. Steuergerät

Zur Umsetzung der intuitiven Laststeuerung am Demonstrator-Ladekran wird ein entsprechendes Steuergerät benötigt. Aufgabe des Steuergerätes ist es, die Benutzereingaben zu verarbeiten und die entsprechenden Kranbewegungen anzusteuern.

Es kommt ein Steuergerät vom Typ Vio 12 der Firma Vemcon zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein echtzeitfähiges Maschinensteuergerät mit redundantem Micro-Controller, das für die Verwendung an mobilen Arbeitsmaschinen zertifiziert ist. Es erfüllt die Sicherheitsanforderungen der Kategorie 2 bzw. 3 nach EN ISO 13849-1 [Deu-2016d]. Abbildung 5-15 zeigt ein Rendering sowie eine schematische Darstellung der Gerätearchitektur. Die intuitive Laststeuerung ist nicht an ein bestimmtes Steuergerät gebunden. Daher ist die Auswahl des Vio als beispielhaft zu verstehen.

Die wichtigsten technischen Daten des Steuergerätes aus [Vem-2014] sind in Tabelle 5-9 aufgeführt.

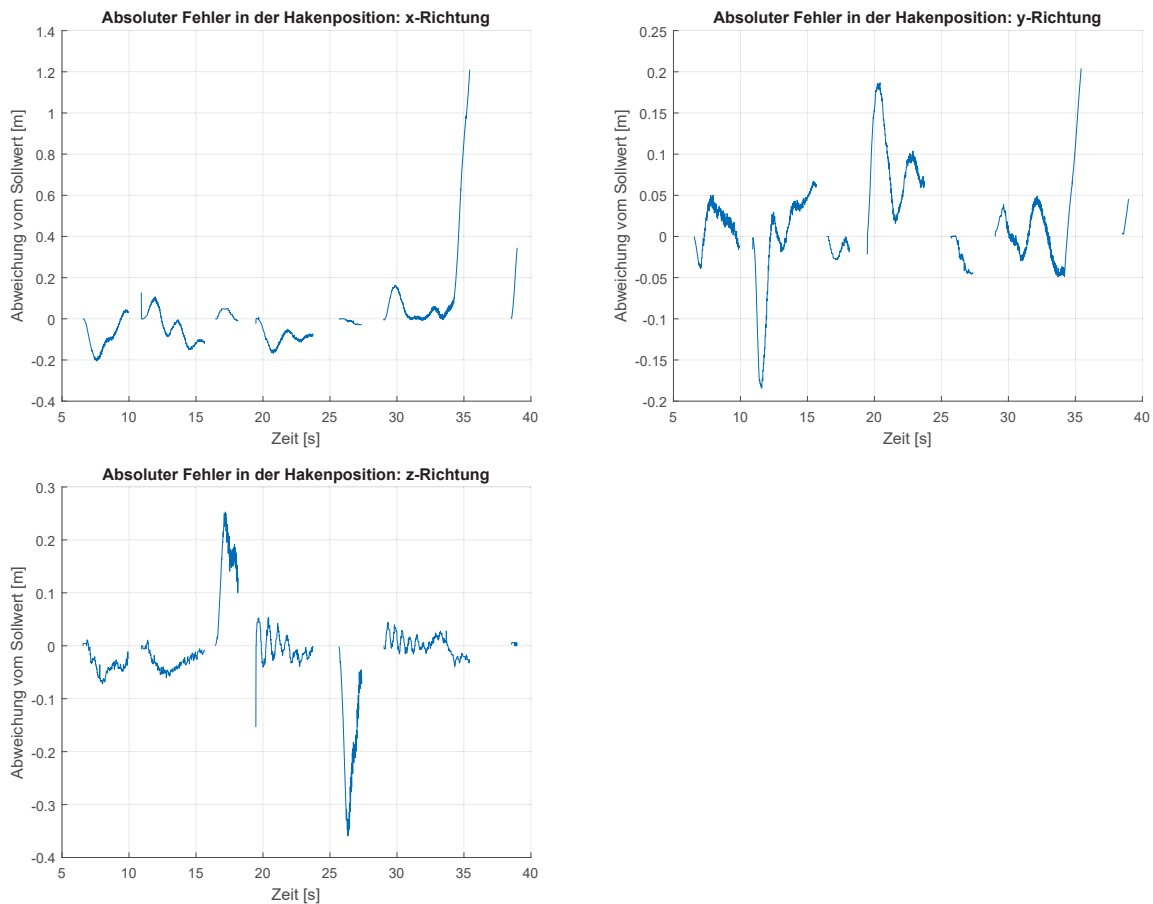


Abbildung 5-14: Absoluter Fehler in der Hakenposition

Je nach gewähltem Bedienmodus ist die Funktion des Steuergeräts unterschiedlich. Hierfür besitzt das Steuergerät eine entsprechende Logik, die sicherstellt, dass die zum Bedienmodus passende Kranbewegung ausgelöst wird.

Modus: Montage/Demontage

Im Bedienmodus Montage/Demontage wird vom Bediener nur vorgegeben, ob der Kran gerade aufgerüstet (Montage) oder abgerüstet (Demontage) wird. Dies geschieht im Rahmen des Sicherheitskonzepts über eine Joystickbewegung. Das Steuergerät führt alle für den Auf- bzw. Abbau notwendigen Kranbedienungen automatisch nacheinander durch. Zu diesem Zweck sind die zum Auf- und Abbau notwendigen Bewegungsfolgen im Steuergerät gespeichert. Über die Auswertung der Gelenksensoren werden die Bewegungen kontinuierlich überwacht. Bei einer Unterbrechung der Auf- bzw. Abbaubewegung und einer anschließenden Wiederaufnahme kann über die Auswertung der Gelenksensoren der aktuelle Bewegungszustand erfasst werden, sodass die Bewegungsreihenfolge nahtlos an der richtigen Stelle wieder aufgenommen wird.

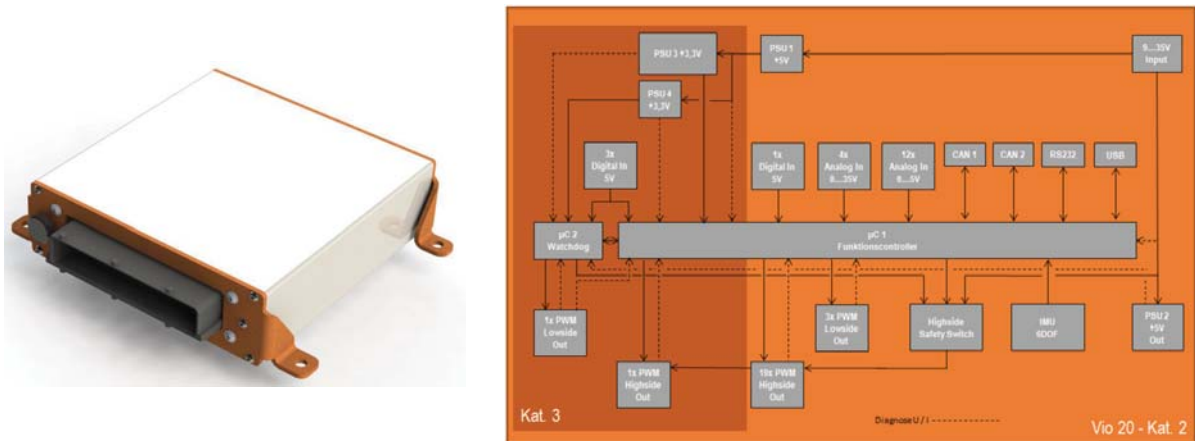


Abbildung 5-15: Rendering und Systemarchitektur des Steuergeräts Vio [Vem-2014]

Tabelle 5-9: Technische Spezifikation des verwendeten Steuergeräts Vio [Vem-2014]

Eigenschaft	Ausprägung (Wert)
Abmaße (L x B x H)	170 mm x 125 mm x 40 mm
Schutzart (gesteckt)	IP 68
Betriebsspannung	9 V - 35 V
Betriebstemperaturbereich	-35°C - 85°C
Anschluss	70 pol. AMP Timer
Prozessor	ARM Cortex M4F 168 MHz
Ein- und Ausgänge (Auswahl)	14 x Digital-Ausgang (PWM-fähig), 4 x Digital-Eingang, 16 x Analog-Eingang
Kommunikation	2x CAN, 1x USB, 1x RS232

Modus: Intuitive Laststeuerung

In diesem Modus hat das Steuergerät die Aufgabe, die Benutzereingaben sowie die aktuelle Benutzerorientierung von der Funksteuerung aufzunehmen, mit Hilfe der Rotationsmatrizen sowie der inversen Kinematik die für die gewünschte Hakenbewegung notwendigen Gelenkbewegungen zu berechnen, und dann die entsprechenden Krangelenkbewegungen auszulösen. Während der Kranbewegungen ist das Steuergerät für den Vergleich der Soll- und Istpositionen der Krangelenke und die Kompensation des Regelfehlers mit Hilfe der beschriebenen Regelungsstrategie verantwortlich. Gleichzeitig übermittelt das Steuergerät in diesem Modus den gemessenen Orientierungswinkel sowie eine darauf basierende Pfeildarstellung an das Funksteuerungsdisplay. Der Pfeil zeigt immer vom Krandrehpunkt in Richtung des Hakens und ermöglicht dem Benutzer mit einem Blick zu erkennen, ob das Messsystem für die Bedienerorientierung ordnungsgemäß funktioniert.

Modus: Manuelle Steuerung

Im Modus zur manuellen Steuerungen der einzelnen Krangelenke werden die Joystickbewegungen direkt in Gelenkbewegungen übersetzt. Hierzu wird die Joystickauslenkung direkt in eine Ventilauslenkung am hydraulischen Steuerblock umgesetzt.

In allen drei Modi stellt das Steuergerät sicher, dass mit Hilfe im Steuergerät hinterlegter Beschleunigungs- und Verzögerungsrampen ein möglichst sanftes Fahrverhalten des Ladekrans begünstigt wird. Zudem begrenzt das Steuergerät die Gelenkgeschwindigkeiten nach oben, sodass der Regler genügend Spielraum besitzt, die Kranbewegungen exakt zu regeln. Darüber hinaus ist das Steuergerät für die Auswertung der Funktionstasten an der Funksteuerung (Motor AN/AUS, Hupe, Umschaltung der Orientierungsmessung) und die Weitergabe der entsprechenden Befehle an die Kransteuerung zuständig.

Das verwendete Steuergerät ist somit in der Lage, alle geforderten Funktionen am Demonstrator-Ladekran umzusetzen. Abbildung 5-16 im folgenden Abschnitt verdeutlicht die Einbindung des Steuergeräts in das Gesamtsystem der intuitiven Laststeuerung.

5.7. Demonstrator der intuitiven Laststeuerung

In den vorherigen Abschnitten wurden das ergonomische Konzept der intuitiven Laststeuerung sowie die notwendigen technischen Entwicklungen und Komponenten beschrieben. Mit dem Demonstrator-Ladekran, dem Funk-Eingabegerät, der Messung der Benutzerorientierung sowie der Hakenposition, der inversen Kinematik, dem Regelungskonzept und dem Steuergerät sind nun alle Komponenten der intuitiven Laststeuerung spezifiziert. Der Systementwurf sowie der domänenspezifische Entwurf der Einzelkomponenten (siehe V-Modell in Abbildung 3-2) ist somit abgeschlossen. Die Einzelkomponenten erfüllen die entsprechenden Anforderungen, und die Funktionsweise konnte in Komponententests belegt werden. Im nächsten Schritt werden alle Einzelkonzepte in das Gesamtsystem der intuitiven Laststeuerung integriert und anschließend wird der Funktionsnachweis erbracht. Hierfür wird zunächst die Systemarchitektur des Gesamtsystems erläutert.

5.7.1. Systemarchitektur und Schnittstellen

Abbildung 5-16 zeigt die vollständige Systemarchitektur der intuitiven Laststeuerung. Die Erläuterung des Ladekrans und der Ladekran-Schnittstellen 1 - 3 bzw. a - f findet sich in Kapitel 5.2.

Das Steuergerät der intuitiven Laststeuerung („Steuergerät IL“) befindet sich mittig in der Darstellung. Über die Schnittstelle 1 bzw. b gibt das Steuergerät die Befehle zur Ansteuerung der Krangelenke an die Ventilsteuerung weiter. Sofern die Überwachungslogik des

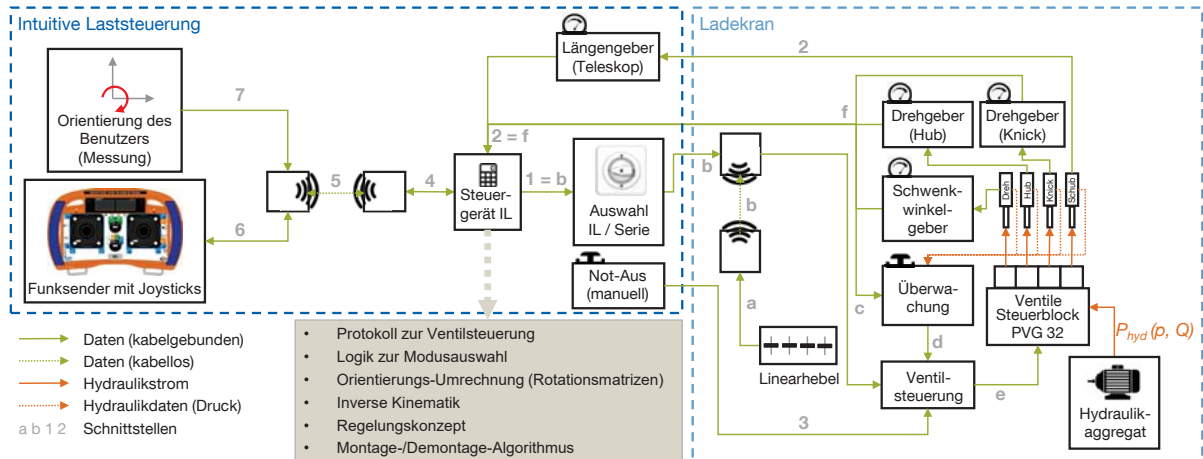


Abbildung 5-16: Systemarchitektur der intuitiven Laststeuerung

Krans die Ventile nicht stillsetzt (Schnittstelle d), resultiert die Ansteuerung durch das Steuergerät in der gewünschten Bewegung der Kran-Freiheitsgrade.

Über die CANopen-Safety-Schnittstelle 4 wird der CAN-Bus mit den Steuerbefehlen der Funksteuerung sowie der Orientierungsmessung an das Steuergerät angebunden. Schnittstelle 4 ist bidirektional eingezeichnet, da einerseits die Steuerbefehle und der Orientierungswinkel an das Steuergerät übertragen werden, und andererseits eine Rückübertragung des Orientierungswinkels und der Pfeildarstellung an das Funksteuerungs-Display erfolgt. Gleiches gilt für die Schnittstellen 5 und 6. Schnittstelle 6 überträgt zusätzlich alle Steuerbefehle, die der Benutzer an der Funksteuerung eingibt (Eingaben über Joysticks und Funktionstasten). Über Schnittstelle 7 wird das Messsignal der Orientierungsmessung in den Datenstrom der Funksteuerung eingespeist.

5.7.2. Aufbau des Demonstratorsystems

Der Aufbau des Demonstrators in der dargestellten Architektur erfolgt am Demonstrator-Ladekran des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik.

5.7.3. Sicherheitsaspekte

Der Ladekran erfüllt im Serienzustand die Sicherheitsanforderungen der Kategorie 3 nach EN ISO 13849-1 [Deu-2016d]. Da das Steuergerät und damit alle Eingabemöglichkeiten im Informationsfluss vor der Ventilsteuerung und damit vor den Sicherheitskomponenten des Krans platziert sind, und die Sicherheitsfunktionen der serienmäßigen Kransteuerung unverändert erhalten sind, ändert sich durch die intuitive Laststeuerung zunächst

nichts an der Sicherheitskategorie des Ladekrans. Die Funksteuerung der intuitiven Laststeuerung erfüllt ebenfalls die gleiche Sicherheitskategorie wie das ausgewählte Steuergerät, sodass auch das Gesamtsystem ebenfalls die Anforderungen der Kategorie 3 erfüllt.

Kritisch zu betrachten ist in diesem Zusammenhang lediglich das zusätzlich implementierte Messsystem zur Messung der Bedienerorientierung. Hierbei handelt es sich um ein System, für das vom Hersteller standardmäßig keine Sicherheitskategorie angegeben wird. Diesbezügliche Nachfragen blieben leider unbeantwortet. Für die Verwendung in einem Prototypen zu Forschungszwecken stellt dies zunächst kein Hindernis dar. Soll die intuitive Laststeuerung zu einem Produkt weiterentwickelt werden, ist diesem Umstand jedoch Rechnung zu tragen. In diesem Fall sollte zur Messung der Benutzerorientierung auf ein IMU-Messsystem mit bekannter Sicherheitskategorie zugegriffen werden. Beispielhaft sei hier [Vem-2019a] genannt.

Aus diesem Grund kann für die intuitive Laststeuerung zunächst auch keine Gesamtkategorie (Performance Level) für die Sicherheitsanforderungen angegeben werden.

Nichtsdestotrotz ist die intuitive Laststeuerung nun voll funktionsfähig am Demonstrator-Ladekran appliziert. Um die Entwicklungstätigkeiten gemäß dem V-Modell abzuschließen, sind noch funktionale Tests des Gesamtsystems notwendig, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden.

5.8. Funktionsnachweis

5.8.1. Intuitive Laststeuerung (Gesamtsystem)

Die funktionale Validierung des Gesamtsystems der intuitiven Laststeuerung erfolgt im Bezug auf die neun funktionalen Basisanforderungen, die in Kapitel 3.2 definiert wurden.

Hierfür wird das am Ladekran implementierte System im Realbetrieb getestet, in dem eine Versuchslast im Arbeitsraum des Ladekrans bewegt wird. Die Funksteuerung wird zu diesem Zweck an beliebigen Punkten auf der Arbeitsfläche des Krans positioniert, und der Haken wird über Joystickeingaben angesteuert. Die Hakenpositionen sowie die Richtung der Joystickeingaben werden ausgewertet. Die Abbildungen 5-17 und 5-18 zeigen zwei beispielhafte Ergebnisse des Funktionsnachweises für zwei unterschiedliche Bewegungen und zwei unterschiedliche Positionen der Funksteuerung. Im linken Bild ist jeweils der Verlauf der Hakenposition in der x-y-Ebene (Draufsicht) dargestellt, wie er sich durch Eingaben am dafür vorgesehenen Joystick ergibt. Rechts ist für die jeweils gleiche Bewegung die Hubbewegung durch eine Seitenansicht (y-z-Ebene) dargestellt. Die schwarzen Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung des Joysticks für die jeweiligen Bewegungsabschnitte. Zum Zweck der besseren Darstellung wurde auf die Bewegung der Funksteuerung während der

Lastbewegung verzichtet. Die Güte der Ergebnisse ist jedoch durch die kontinuierliche Messung der Benutzerorientierung unabhängig davon, ob die Steuerung still steht oder bewegt wird. Dies wird im Rahmen der Evaluationsstudie in Kapitel 6 belegt, bei dem die intuitive Laststeuerung für realitätsnahe Hebeaufgaben mit bewegtem Bediener eingesetzt wird.

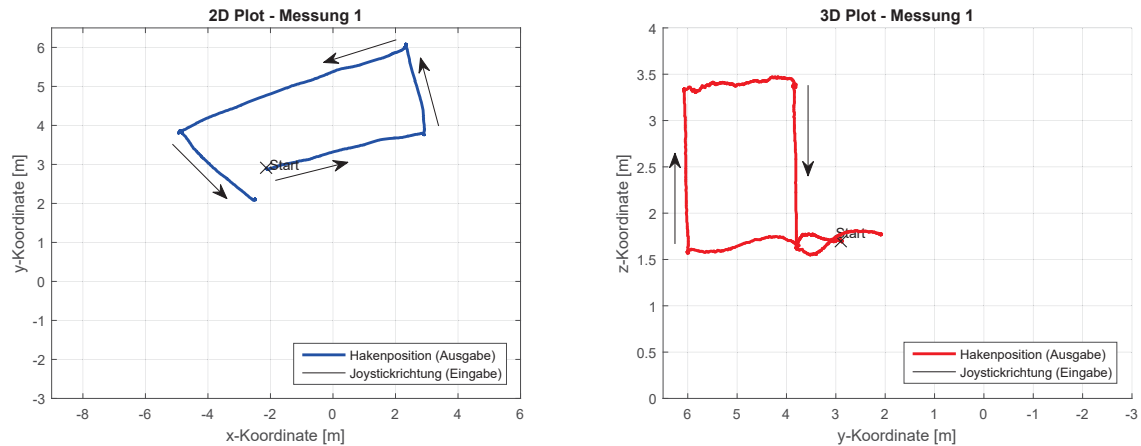


Abbildung 5-17: Hakenpositionsverlauf und Joystickeingaben: Draufsicht auf die Horizontalbewegung (links) und Seitenansicht der Hubbewegung (rechts) – 1. Beispielmessung

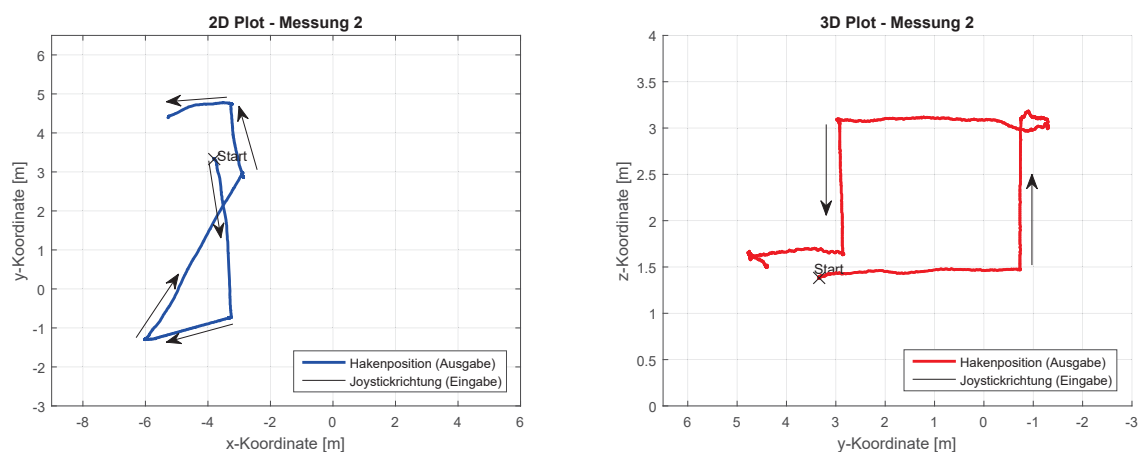


Abbildung 5-18: Hakenpositionsverlauf und Joystickeingaben: Draufsicht auf die Horizontalbewegung (links) und Seitenansicht der Hubbewegung (rechts) – 2. Beispielmessung

Es wird deutlich, dass Joystickeingabe und Hakenverlauf jederzeit annähernd parallel verlaufen. Abweichungen und Krümmungen im Hakenverlauf ergeben sich aus den Regelungsungenauigkeiten, die jedoch im Realbetrieb aus zwei Gründen keine Rolle spielen: Zum einen sind die Abweichungen im Vergleich zum Arbeitsraum des Krans klein und damit in den meisten Fällen nicht von Relevanz, und zum anderen befindet sich zu jedem Zeitpunkt noch der Benutzer im Regelkreis der Kranbewegung, der die auftretenden Abweichungen bewusst oder unbewusst durch angepasste Joystickeingaben kompensieren kann.

Im Bezug auf die Basisanforderungen lassen sich die Ergebnisse des Funktionsnachweises daher wie folgt zusammenfassen:

- Der Bewegungswunsch kann vom Benutzer durch eine Eingabe an der Funksteuerung direkt vorgegeben werden. Die resultierende Hakenbewegung ist bei jeder beliebigen Orientierung des Benutzers immer parallel zur Joystickauslenkung. Heben und Senken des Hakens findet mit hoher Positionstreue ebenfalls parallel zur Joystickbewegung statt. Sowohl das interne Nutzer-Referenz-Koordinatensystem als auch die Benutzereingabe und die resultierende Ausgabe in Form der Hakenbewegung sind kompatibel. Der Benutzer kann einstellen, ob die Orientierung zu Beginn des Bewegungszyklus' bis zum Ende der Bewegung beibehalten wird oder ob eine kontinuierliche Nachführung des Ortungssignal auch während der Bewegung stattfinden soll. Die Basisanforderungen 1 und 4 sind erfüllt.
- Die Steuerung der Lastbewegung erfolgt mit Hilfe einer Funksteuerung und ermöglicht eine freie Bedienerbewegung im gesamten Arbeitsbereich. Es ist keine dauerhafte Haken- oder Maschinenberührung für die Manipulation der Last notwendig. Die Basisanforderungen 2 und 3 sind erfüllt.
- Für die intuitive Laststeuerung ist lediglich ein Messsystem innerhalb der Funksteuerung sowie ein Steuergerät zusätzlich zur bestehenden Kran-Infrastruktur notwendig. Gegebenenfalls können die Funktionen des Steuergeräts auch direkt in das Kransteuergerät implementiert werden. In jedem Fall ist weder aufwendige Infrastruktur im Umfeld des Krans (Kameras, RFID-Reader, Reflektoren, ...) noch anderweitiges kostenintensives Equipment notwendig. Die intuitive Laststeuerung funktioniert darüber hinaus sowohl im Innen- als auch im Außenbereich. Die Basisanforderungen 5 und 7 sind erfüllt.
- Die entwickelte inverse Kinematik eignet sich besonders gut für den Demonstrator-Ladekran mit vier Freiheitsgraden: Die Hakenbewegung folgt der Joystickeingabe sehr exakt. Auch Krane mit weniger oder mehr als vier Freiheitsgraden lassen sich mit der gleichen inversen Kinematik steuern, wenn die Berechnungs-Parameter passend zum Anwendungsfall eingestellt werden. Basisanforderung 6 ist erfüllt.
- Die intuitive Laststeuerung greift ausschließlich auf industrietaugliche Komponenten zurück und erfüllt daher die Anforderungen an ein Industrieprodukt. Die Umsetzung erfolgt an einem Ladekran im industrieähnlichen Umfeld. Bis auf die Ortungssensorik erfüllen alle Komponenten die normativen Sicherheitsanforderungen der Kategorie 3 nach [Deu-2016d]. Für das Ortungssystem existiert sicherheitszertifizierte Sensorik, die in der Funktionsweise vergleichbar ist mit der Prototypenhardware am Demonstrator, sodass im Rahmen der Weiterentwicklung eine Zertifizierung der Steuerung möglich sein sollte. Die Basisanforderungen 8 und 9 werden somit auch als erfüllt betrachtet

Alle Untersuchungsergebnisse im Rahmen der Funktionsprüfung bestätigen die Erfüllung der funktionalen Basisanforderungen. Eine eingehende Analyse im Hinblick auf die Anforderungen in Kapitel 5.1 findet im Rahmen der Diskussion in Kapitel 7.1 statt.

5.8.2. Validierungsstudie zur Messung der Benutzerorientierung

In Kapitel 5.4 wurde bereits gezeigt, dass die Sensorik zur Bestimmung der Benutzerorientierung eine prototypentaugliche Orientierungsmessung ermöglicht. Besonders im Hinblick auf die Temperaturkalibrierung der Sensoren und die damit verbundene Driftstabilität des Messsignals im Zeitverlauf wurde weiteres Untersuchungspotenzial identifiziert. Zu diesem Zweck wurde eine Validierungsstudie mit dem in die Funksteuerung integrierten Messsystem durchgeführt. Um die intuitive Bedienung zu ermöglichen, ist die Anforderung an den in der Funksteuerung verbauten Sensor eine maximale Abweichung und damit ein Maximaldrift von 10° in 90 min. Das entspricht einer zulässigen Driftrate von etwa $6,7^\circ/h$. Diese Abweichung sollte unter allen Bedingungen eingehalten werden.

Die Studienergebnisse wurden im Rahmen von [Kam-2019] erarbeitet.

Studienaufbau

Das Verhalten des Messsystems wird sowohl unter statischen als auch dynamischen Umständen untersucht. Statisch bedeutet, dass die Funksteuerung über die gesamte Versuchsdauer von 90 min an einem festen Ort steht und der ausgegebene Orientierungswinkel im Zeitverlauf aufgezeichnet wird.

Für die dynamischen Versuche wird die Funksteuerung in einem Bereich von ca. $1,3\text{ m} \times 0,6\text{ m}$ mit Hilfe eines kleinen Fahrzeugs und konstanter Geschwindigkeit im Oval bewegt, sodass eine reproduzierbare Bewegung der Funksteuerung erfolgt. Zur Evaluation wird der Messwert für den Orientierungswinkel über den CAN-Bus aufgezeichnet und mit einem Referenz-Messwert verglichen. Der Referenzmesswert wird mit Hilfe eines hoch exakten Trackingsystems mit Infrarot-Kameras aufgenommen (Hersteller: Advanced Realtime Tracking GmbH). Zu diesem Zweck werden Infrarot-Marker an der Funksteuerung angebracht und von mehreren Kameras in Echtzeit verfolgt. Mit Hilfe der entsprechenden Auswertesoftware wird die aktuelle Pose der Funksteuerung erfasst und dient als Vergleichswert für die Orientierungsmessung mit Hilfe der Inertialsensoren.

Die untersuchten und variierten Parameter sind in 5-10 aufgeführt.

Andere potenzielle Einflussparameter (Feuchtigkeit/Nässe, Stahlarmierung etc.) wurden im Rahmen von Vorversuchen untersucht und können ausgeschlossen werden.

Mit Hilfe eines teilfaktoriellen Versuchsplans (vollfaktoriell mit Ausschluss von sinnfreien Kombinationen) werden die Parameter variiert. Alle Versuche wurden zwei oder drei Mal wiederholt, um zufällige Messergebnisse erkennen zu können.

Tabelle 5-10: Parameter der Evaluationsstudie

Parameter	Variationsbereich	Erfassung durch
Umgebungstemperatur (Mittelwert)	3°C - 37°C	mobile Wetterstation
Betrag des statischen Magnetfelds am Messort	18 μ T - 220 μ T	Magnetometer (Smartphone mit der Rohdaten-App <i>phyphox</i>)
Zahl der Messorte im Kranumfeld	7 (statisch), 4 (dynamisch)	Ortskoordinaten auf der Versuchsfläche
Zeit (Versuchsdauer)	90 min	Stoppuhr
Betriebszustand des Krans	AUS, AN, AN mit Fahrbefehl	
Zeit für eine Umdrehung der Funksteuerung	10 s oder 17 s	gegeben durch Trägerfahrzeug
Umdrehungszahl der Funksteuerung während eines Versuchs	100	
Standzeit nach 10 Umdrehungen	3 min oder 6 min	
Drehrichtung	im/gegen Uhrzeigersinn	

Studienergebnisse

Zur Auswertung der Versuche wird der Verlauf des Orientierungswinkel über die Zeit betrachtet. Als Kennwerte werden einerseits die Winkelabweichung am Versuchsende (AW90) sowie andererseits die Summe der insgesamt überstrichenen Winkelabweichung (AWW) betrachtet. AWW ist gleich AW90, wenn ein monoton steigender oder fallender Winkelverlauf vorliegt. Wenn der Winkelverlauf während der Messung Minima oder Maxima aufweist, also der Drift seine Richtung verändert, ist AWW größer als AW90, da für AWW die Betragswerte der Änderungen zwischen aufeinanderfolgenden Extrema – unabhängig von der Driftrichtung – aufsummiert werden.

Die Studienergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Betriebszustand des Krans hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Messung.
- Der Betrag des statischen Magnetfelds am Messort hat einen Einfluss auf die Messung und das Driftverhalten. Es lässt sich ein Trend erkennen: Mit steigenden statisch konstanten Magnetfeldstärken sind die Abweichungen vom Startwert geringer. Die größte Abweichung ergibt sich bei einem Magnetfeld von 18 μ T und die kleinsten Abweichungen bei Magnetfeldern ab 105 μ T und höher.
- Die Umgebungstemperatur hat einen starken Einfluss auf die Messung und das Driftverhalten. Es lassen sich bei vom Referenztemperaturbereich (ca. 20°C - 25°C; Labortemperatur) abweichenden Temperaturen Einflüsse der Temperatur erkennen. Mit kleiner werdendem Magnetfeld steigen die Abweichungen bei niedrigen und höheren Temperaturen an.

- Die Bewegungsgeschwindigkeit der Funksteuerung hat im untersuchten (Schritt-)Geschwindigkeitsbereich keinen Einfluss auf die Messung.
- Die Umdrehungszahl sowie die Drehrichtung der Funksteuerung haben bis 100 Umdrehungen keinen Einfluss auf die Messung. Größere Umdrehungszahlen wurden nicht untersucht.

Es zeigt sich, dass die Umgebungstemperatur sowie das statische Magnetfeld, dem der Sensor und die Funksteuerung ausgesetzt sind, als einzige Parameter einen wesentlichen Einfluss auf das Driftverhalten und damit auf den Zeitverlauf der Messung haben. Die Einflüsse der dynamischen Größen, des Betriebszustands sowie andere ortsabhängige Einflüsse können vernachlässigt werden.

Um die Abhängigkeiten der beiden relevanten Parameter zu visualisieren zeigt Abbildung 5-19 einen 3D-Plot und Abbildung 5-20 die Draufsicht des 3D-Plots. Dazu sind die in der Auswertung ermittelte Gesamtabweichung AWW, der Temperaturmittelwert und der Betrag der Magnetfeldstärke der einzelnen statischen Versuche aufgetragen. Der blau markierte Bereich stellt eine Abweichung AWW kleiner als 10° nach 90 min dar, also eine Abweichung im zulässigen Bereich. Der grün eingefärbte Bereich zeigt eine Abweichung zwischen 10° und 20° und der rot gefärbte Bereich eine Abweichung von größer als 20° an.

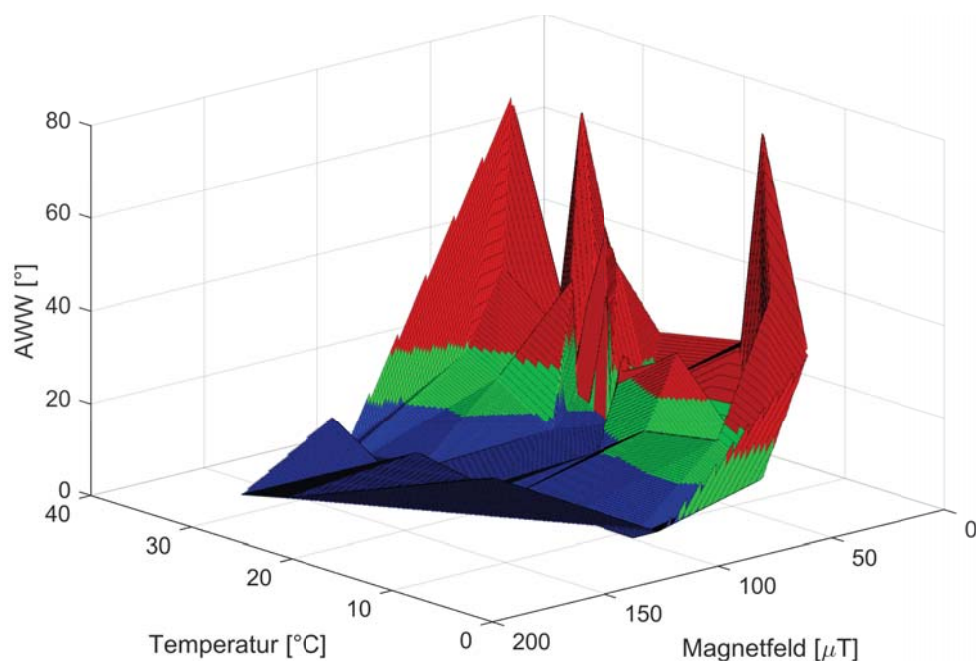


Abbildung 5-19: 3D-Plot der statischen Messungen [Kam-2019]

Es wird deutlich, dass das Messsystem bei Magnetfeldstärken über ca. $80 \mu\text{T}$ die Anforderungen an das Driftverhalten unabhängig von der Temperatur erfüllt. Bei niedrigeren Magnetfeldstärken lässt lediglich der Referenztemperaturbereich (ca. 20°C - 25°C ; Labortemperatur) eine zuverlässige Messung bei niedrigeren Magnetfeldstärken bis ca. $40 \mu\text{T}$

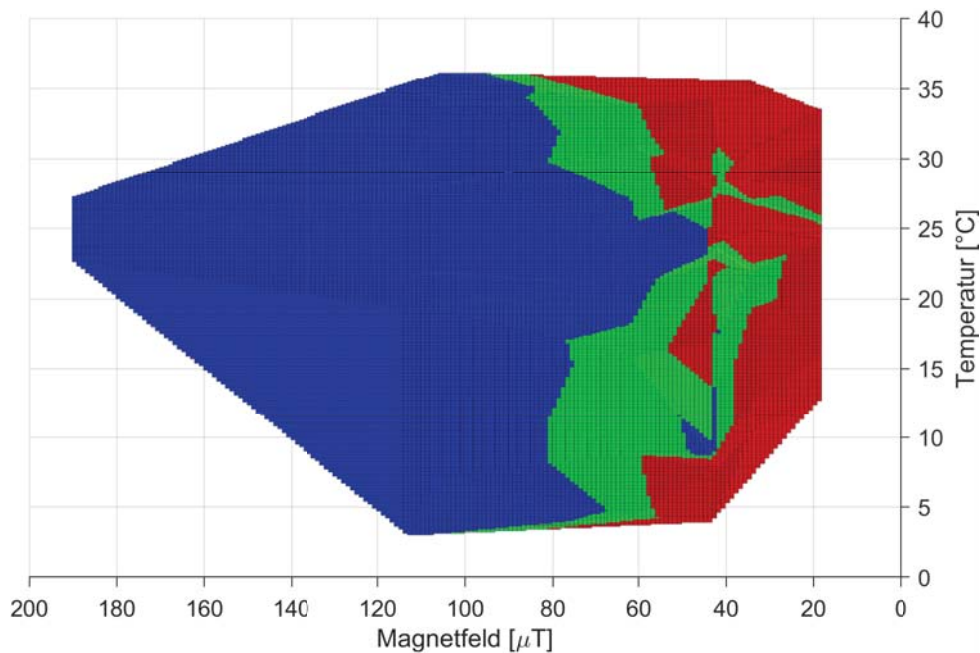


Abbildung 5-20: 3D-Plot der statischen Messungen - Draufsicht [Kam-2019]

zu. Unterhalb von ca. $40 \mu\text{T}$ ist – unabhängig vom Temperaturbereich – keine driftstabile Messung möglich.

Diskussion

Die Temperaturabhängigkeit des Driftverhaltens überrascht etwas, da für den MTi-3 AHRS ein Betriebstemperaturbereich von -40°C - 85°C angegeben wird, in dem das Driftverhalten die Anforderungen der intuitiven Laststeuerung erfüllen sollte. Die Evaluationsergebnisse lassen darauf schließen, dass das angegebene Driftverhalten nur für den Labortemperaturbereich von ca. 20°C - 25°C angenommen werden kann. Für zukünftige Anwendungen sollte auf eine verbesserte softwareseitige Temperaturkompensation der MEMS-Sensoren geachtet werden, die über den gesamten Betriebstemperaturbereich zuverlässig funktioniert.

Der Einfluss des statischen Magnetfelds ergibt sich aus einer Zusatzfunktion des MTi-3 AHRS zur Driftstabilisierung: Mit Hilfe der Funktion *Compass Stabilisation*, die standardmäßig aktiviert ist, werden Messwerte des Magnetometers zur Driftstabilisierung verwendet. Hierzu wird der Magnetfeldverlauf im Hintergrund mitgemessen. Bei konstanter Magnetfeldstärke geht das System davon aus, dass es gerade nicht bewegt wird, und verwendet diese Zusatzinformation zur rechnerischen Kompensation des Gyroskop-Drifts. So ist zu erklären, dass ein Magnetfeldeinfluss beobachtet werden kann, obwohl die Magnetometer-Daten nicht für die Sensordatenfusion zur Ermittlung der Benutzerorientierung verwendet werden.

Im Rahmen einer Weiterentwicklung der intuitiven Laststeuerung sollten diese beiden Einflüsse adressiert werden. Bei Verwendung eines Sensors mit verbesserter softwareseitiger Temperaturkompensation und anders umgesetzter Driftstabilisierung sind die beobachteten Einflüsse nicht mehr zu erwarten. Solche – für diesen Fall besseren – Sensoren existieren in verschiedenen Versionen und zu ähnlichen Konditionen am Markt.

Die Funktionsfähigkeit des gewählten MEMS-Sensorikkonzepts für die Messung der Orientierung eines bewegten Kranbedieners ist jedoch erbracht: Die Verwendung von Gyroskop- und Accelerometer-Messdaten eignet sich für die intuitive Laststeuerung. Bei Umgebungsbedingungen, die vom Referenztemperaturbereich abweichen, und bei zu geringen Magnetfeldstärken sollte der Funksteuerungssensor des Prototypen regelmäßig durch Ein- und Ausschalten der Steuerung nachkalibriert werden.

6. Ergonomische Evaluation der intuitiven Laststeuerung

Zur Evaluation des entstandenen Systems sowie zur Untersuchung der Frage, welches Verhalten des Steuerungssystems von Probanden während der Bewegung bevorzugt wird, wurde im Rahmen von [Hai-2019] eine Probandenstudie am Demonstrator durchgeführt.

In dem aktuell entwickelten Lösungsansatz zur intuitiven Kransteuerung werden die Positionen der Last, der Maschine sowie die des Bedieners berücksichtigt. Dabei ist eine Rückwärtskinematik integriert (siehe Abschnitt 5.5), die die Rückrechnung von einer gewünschten, dreidimensionalen Hakenbewegung (x - y - z -Koordinaten) auf die vier Freiheitsgrade Drehwerk, Hubzylinder, Knickzylinder und Teleskopsystem der Kranbewegung übernimmt. Folglich ist es dem Bediener möglich, die resultierende Bewegungsrichtung des Kranhakens aus seiner Perspektive heraus zu steuern, ohne vorher eine mentale Rotation und eine Zerlegung in die einzelnen Freiheitsgrade durchführen zu müssen. Der Bediener gibt auf der Funksteuerung durch die Betätigung zweier Bedienelemente, welche als Meisterschalter ausgeführt sind (Abbildung 5-5), die gewünschte Bewegungsrichtung der Last vor. Er bewegt den Meisterschalter aus seiner aktuellen Sicht in Richtung der gewünschten Zielposition der Last. Mit einem Bedienelement kann die Bewegung des Hakens in der x - y -Ebene gesteuert werden, mit dem anderen ist das Verfahren in z -Richtung möglich.

Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen behandelt die Evaluation dabei besonders die Möglichkeit der Ortsveränderung des Bedieners während der Bedienung. Zu diesem Zweck wurden zwei Systeme mit unterschiedlichen Eigenschaften bezüglich der Perspektivänderung bei Rotation des Bedieners implementiert:

- **diskret**

Das System ändert die Rotation des Bedieners (bzw. der Funksteuerung) ausschließlich bei Nulldurchgängen des Stellhebels. Wurde eine Bewegung also einmal begonnen, wird diese genau so weitergeführt, unabhängig davon ob der Bediener seine Rotation zur Last verändert oder nicht. Erst bei einem Stopp der Bewegung (Stellhebel in Nullstellung) wird die neue Position des Bedieners für den Start der nächsten Bedienung übernommen.

- **kontinuierlich**

Das System passt sich kontinuierlich an die Rotation des Bedieners (bzw. der Funksteuerung) an. Dies ermöglicht es, die Trajektorie der Last während einer Bewegung durch Veränderung der Rotation des Bedieners zu beeinflussen. So ist es beispielsweise möglich, die Last bei gleichbleibender Stellhebelstellung „von sich weg zu scheuchen“.



Abbildung 6-1: Demonstratoraufbau mit Zielpositionen (im Bild Position 2, blau und Position 3, grün) der Last und jeweiliger Startposition der Bediener, wie in der Evaluation genutzt.

So ist eine kontinuierliche Beeinflussung der Trajektorie allein durch Eigenbewegung des Bedieners möglich.

Zur Untersuchung der Forschungsfrage, welches System während realistischer Hebearbeiten im Sinne der Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN ISO 9241-11 [Deu-2016a] am besten abschneidet, wurden drei Hypothesen formuliert:

- H_1 Unabhängig von der Vorerfahrung ist die Bedienung mit dem kontinuierlichen Steuerungskonzept effektiver als mit den beiden übrigen Konzepten (konventionell bzw. diskret).
- H_2 Novizen sind in der Bedienung mit dem kontinuierlichen Steuerungskonzept am effizientesten, Experten in der Bedienung mit dem konventionellen Steuerungskonzept.
- H_3 Die beiden intuitiven Steuerungskonzepte (diskret und kontinuierlich) sind für beide Benutzergruppen zufriedenstellender als das konventionelle Bedienkonzept.

6.1. Methodik

Vor der Probandenstudie wurde eine Vorstudie mit zwei Teilnehmern durchgeführt. Dies diente zum Test der Hardware, zur Aufdeckung möglicher Probleme und zur Einschätzung der genauen Versuchsdauer. Des Weiteren wurde ein Ethikantrag bei der Ethikkommission der TUM eingereicht; der Versuch wurde als ethisch unbedenklich bewertet. Anschließend begann die Probandenstudie. Bei dem verwendeten Kran handelt es sich um einen Ladekran, welcher normalerweise auf einem LKW montiert wird. In diesem Versuch kommt

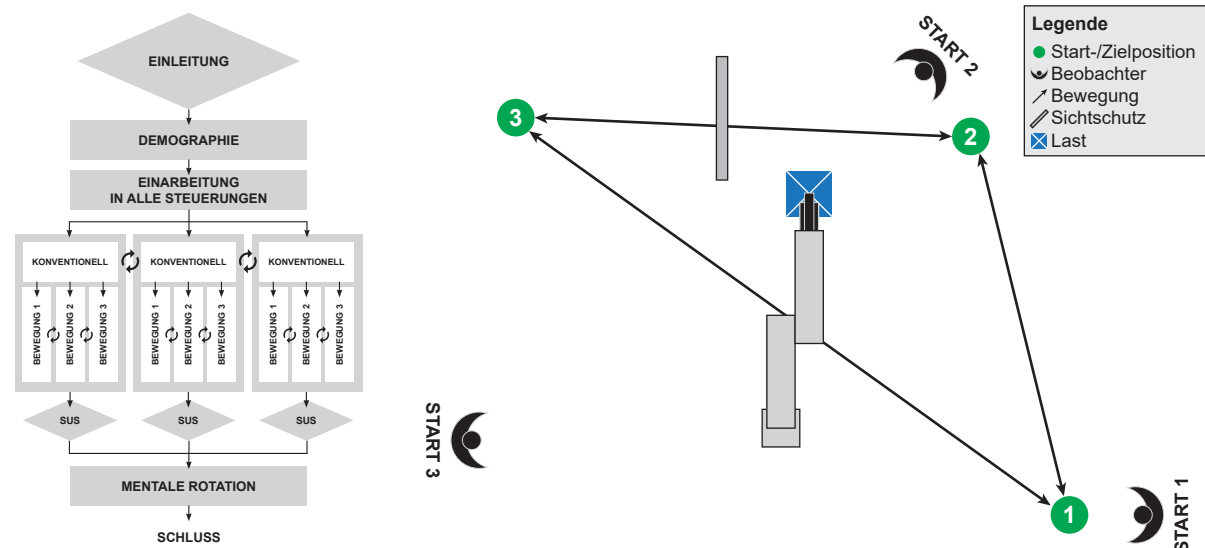


Abbildung 6-2: Links: Versuchsablauf. Rechts: Schematische Draufsicht auf das Versuchsszenario.

der Demonstrator-Kran der intuitiven Laststeuerung zum Einsatz (vgl. Abbildung 6-1). Der gesamte Versuchsablauf ist in Abbildung 6-2 links schematisch dargestellt.

Der Versuchsaufbau bestand aus folgenden Elementen (vgl. Abbildung 6-2 rechts):

- Ladekran der Firma Palfinger PK 7.501 SLD 5
- Funksteuerung der Firma HBC
- Funktionalität der intuitiven Laststeuerung
- Last in Form eines Schaumstoffwürfels mit unten mittig angebrachtem Trichter
- 3 Paletten mit Zielscheiben als Ablageort bzw. Zielorte für die Last
- 3 Platten als jeweilige Startposition für den Bediener
- Sichtschutzwand, um eine Bewegung des Bedieners sowie eine Hub-/Senkbewegung der Last zu erzwingen
- Zubehör: Sicherheitsschuhe, Helm, Stoppuhr, CAN-Datenleser, Laptop, Kamera

Zu Beginn des Versuchs füllt jeder Proband ein Eingangsfragebogen aus, der die demographischen Daten wie Alter, Geschlecht und die Vorerfahrung in Kransteuerung abfragt. Je nach Angaben zur Vorerfahrung in Kransteuerung wurden die Probanden der Gruppe Experten oder Novizen zugeteilt und erhielten entsprechend ihre Probandennummer. Anschließend folgte eine Einführung in die Aufgabenstellung und die Einarbeitung in alle drei Steuerungsvarianten.

Die Aufgabenstellung setzt sich zum Ziel, den gesamten Arbeitsbereich des Krans auszunutzen, indem alle vier Freiheitsgrade des Krans beansprucht werden. Die Aufgabe ist die Last von einer Position zur nächsten zu bringen. Ein Durchgang besteht dabei aus drei Hebevorgängen. Insgesamt musste jeder Proband drei Durchgänge mit den drei unterschiedlichen Steuerungskonzepten durchführen. Die drei Ablagepositionen für die Last

Tabelle 6-1: Unabhängige Variablen der Evaluation

Variable	Ausprägungen	Zuordnung
Vorerfahrung	Novizen, Erfahrene	between-subjects
Steuerungskonzept	konventionell, diskret, kontinuierlich	within-subjects

waren Zielscheiben mit den Ringen 1-9 (Mitte: 1, Außen: 9), welche auf Paletten montiert waren (Abbildung 6-1). Jeder Ring hat hierbei eine Breite von ca. 8 cm. Die vorgegebene Reihenfolge der Lastbewegungen musste eingehalten werden, allerdings unterschied sich die Reihenfolge bei jedem Steuerungskonzept aufgrund des Ausbalancierens (Permutation, um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden). Die Fahrwege mit der Last waren dem Bediener selbst überlassen. Es gab eine Aufgabe, die mit allen drei Modi in veränderter Reihenfolge ausgeführt werden musste. Um die einzelnen Konzepte besser miteinander vergleichen zu können, war das Ziel, die Last möglichst zügig zu bewegen und ohne viele Korrekturbewegungen auf den Zielscheiben zu positionieren.

Die Startposition des Bedieners war für jede Lastbewegung vorgegeben, siehe Abbildung 6-2 rechts. Die Startpositionen wurden so gewählt, dass sie einen 45°, 90°- oder 180°-Winkel zwischen dem Kran- und dem Probandenkoordinatensystem aufweisen. Während der Lastbewegung war die Bewegung dem Bediener selbst überlassen, das heißt nicht extern vorgegeben.

Während der Durchführung der einzelnen Steuerungsaufgaben mit dem jeweiligen Steuerungssystem wurden die benötigte Zeit sowie die Präzision der Ablage aufgezeichnet. Die Präzision der Ablage wurde mittels der Zielringe auf den Ablagepaletten bestimmt. Ähnlich einer traditionellen Zielscheibe sind Punktwerte von 1-9 erreichbar. Der unten an der Last angebrachte Trichter bestimmt die zu verzeichnende Ablagegenauigkeit, abhängig davon welchen Ring er beim Aufsetzen der Last berührt. Des Weiteren wurde nach Durchführung der Bedienvorgänge mit jeder Steuerung die Zufriedenstellung mit dem System Usability Scale erfasst. Abschließend wurde zur Kontrolle ein Kurztest zur mentalen Rotation nach Peters [Pet-1995] durchgeführt. Dieser Standardtest lässt Schlüsse bezüglich potenzieller Einflüsse der mentalen Rotationsfähigkeit auf den Umgang mit den Steuerungssystemen zu. Eine genaue Auflistung der abhängigen und unabhängigen Variablen ist den Tabellen 6-1 und 6-2 zu entnehmen.

6.2. Ergebnisse

Abhängig von dem vorgestellten Versuchsplan werden die Daten unter Verwendung der gemischten Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung analysiert. Im Folgenden werden die Voraussetzungen der Varianzanalyse und die ergriffenen Maßnahmen bei Verletzung

Tabelle 6-2: Abhängige Variablen der Evaluation

Variable	Einheit	Kommentar
Zeit	[s]	
Präzision	[1-9]	1 perfekt, 9 unzureichend
System Usability Scale	[0-100]	Likert-Skala [1-5] aggregiert
Fehler	Anzahl	Jede Steuerbewegung, die die Last weiter vom Ziel entfernt, statt sie ihm näher zu bringen, wird als Fehler gewertet.
Mentale Rotation	[0-24]	Kontrollvariable

dieser erläutert. Die abhängigen Variablen müssen mindestens intervallskaliert sein. Diese Voraussetzung ist erfüllt, da alle Variablen (Ablagegenauigkeit, Bedienzeit, SUS-Wert, Fehler, mentale Rotation) verhältnisskaliert sind. Des Weiteren müssen der Zwischensubjektfaktor und die Innersubjekt faktoren unabhängig und nominalskaliert sein. Der Zwischensubjektfaktor wird durch die Gruppierung repräsentiert, die Innersubjekt faktoren bilden die drei unterschiedlichen Steuerungskonzepte ab. Alle Faktoren sind unabhängig voneinander und nominalskaliert.

Eine weitere Voraussetzung bildet die Normalverteilung der abhängigen Variablen. Die Daten jeder Stichprobe werden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. Diese Normalverteilung ist bei der AV Bedienzeit und der AV Ablagegenauigkeit verletzt. Allerdings ist die ANOVA robust gegenüber einer Verletzung der Normalverteilung und nach Rasch [Ras-2009] kann ab einer Stichprobengröße von 30 die Normalverteilung angenommen werden. Die Stichprobe ist mit 28 Probanden pro Gruppe nahe an der Annahmegrenze zur Normalverteilung. Die Abweichung von zwei Probanden pro Gruppe ist vernachlässigbar klein, weshalb immer von einer Normalverteilung ausgegangen wird.

6.2.1. Probandenkollektiv

Am Versuch nahmen insgesamt $N = 60$ Probanden teil. Aufgrund technischer Probleme musste der Versuch bei vier Probanden vorzeitig beendet werden, sodass zur Auswertung noch $N = 56$ Probanden verblieben. Hierbei bestand das Kollektiv aus 6 weiblichen und 50 männlichen Probanden im Alter von 20 - 62 Jahren ($MW = 35.46$; $SD = 12.15$).

6.2.2. Effektivität

Abbildung 6-3 zeigt Boxplots der jeweiligen Ablagegenauigkeit, abhängig von Vorerfahrung und Steuerungssystem. Zu erkennen ist, dass Experten mit dem konventionellen System eine höhere Ablagegenauigkeit erreichen als Novizen.

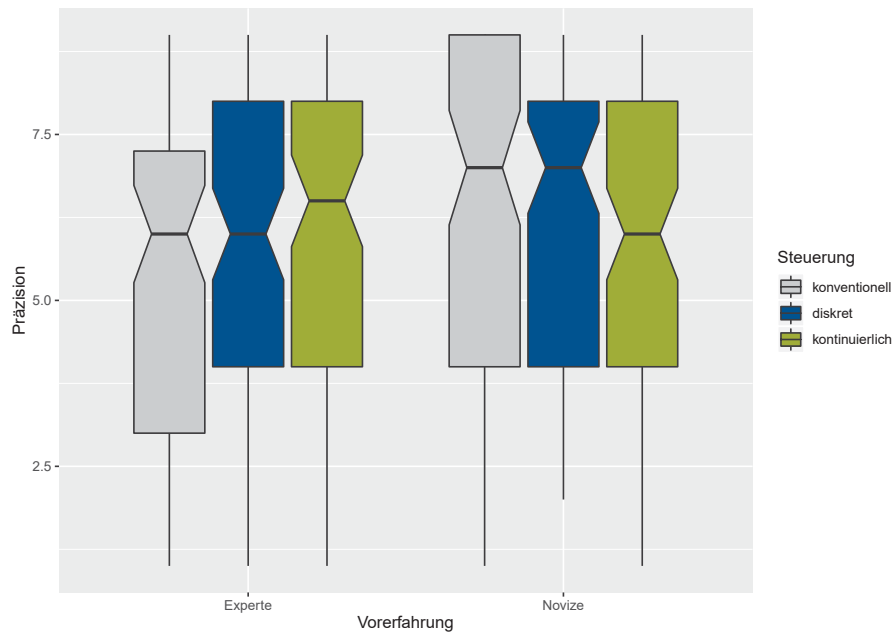


Abbildung 6-3: Boxplots der Ablagegenauigkeit, geteilt in die Vorerfahrung und die Steuerungssysteme. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.

Tabelle 6-3: ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Ablagegenauigkeit

	Ablagegenauigkeit			
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2
Vorerfahrung	1, 54	3.482	.068	.010
System	2, 108	0.470	.626	.002
Vorerfahrung * System	2, 108	1.704	.187	.008

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktorstufen Vorerfahrung (between) und Steuerungssystem (within) zeigt keinen signifikanten Effekt der Vorerfahrung auf die Ablagegenauigkeit, auch wenn ein Trend zu erkennen ist. Tendenziell weisen Experten eine höhere Ablagegenauigkeit auf als Novizen ($MW_{Exp} = 5.78$; $SD_{Exp} = 2.37$, $MW_{Nov} = 6.26$; $SD_{Nov} = 2.33$). Das Steuerungssystem zeigt ebenso keinen signifikanten Einfluss auf die Ablagegenauigkeit. Auch ist kein Interaktionseffekt zwischen Vorerfahrung und Steuerungssystem vorhanden (vgl. Tabelle 6-3).

Abbildung 6-4 zeigt Boxplots der jeweiligen Fehleranzahl, abhängig von Vorerfahrung und Steuerungssystem. Zu erkennen ist, dass Novizen mit dem kontinuierlichen System eine geringere Fehleranzahl erreichen als mit den übrigen Systemen sowie als die Experten generell.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktorstufen Vorerfahrung (between) und Steuerungssystem (within) zeigt keinen signifikanten Effekt der Vorerfahrung oder des Steuerungssystems auf die Fehleranzahl (vgl. Tabelle 6-4). Es ist ein Interaktionseffekt

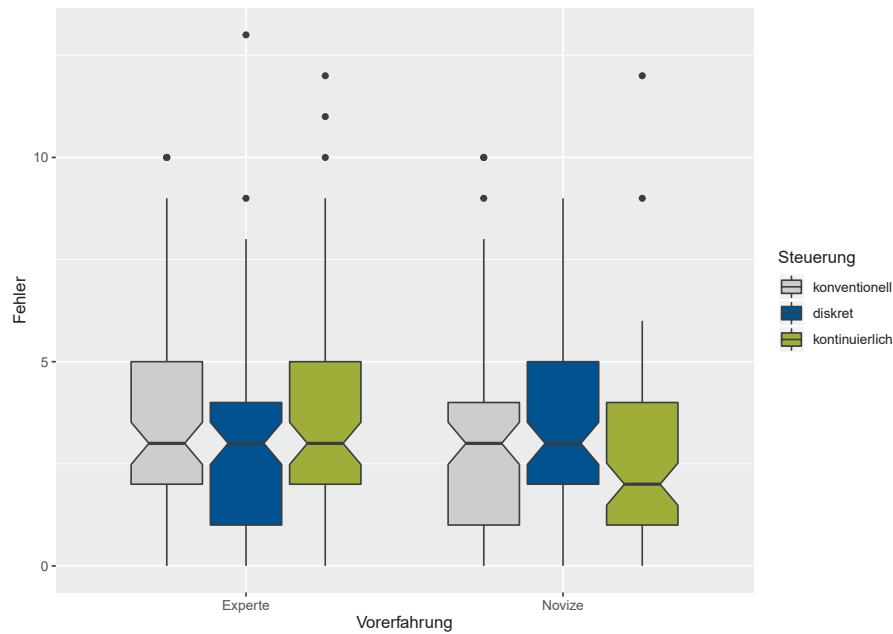


Abbildung 6-4: Boxplots der Fehleranzahl, geteilt in die Vorerfahrung und die Steuerungssysteme. Abgebildet sind der Median mit einem 95%-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.

Tabelle 6-4: ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Fehleranzahl

	Fehleranzahl			
	df	F	p	η^2
Vorerfahrung	1, 54	2.361	.130	.009
System	2, 108	1.170	.314	.005
Vorerfahrung * System	2, 108	3.531	.033	.014

zwischen Vorerfahrung und Steuerungssystem vorhanden ($F(2,108) = 3.531$, $p = .033$, $\eta^2 = .014$). Ein Vergleich der Mittelwerte (siehe Tabelle 6-5) zeigt, dass Novizen mit dem kontinuierlichen Steuerungssystem weniger Fehler machen als mit den beiden anderen Steuerungssystemen sowie als die Experten generell.

Tabelle 6-5: Mittelwerte und Standardabweichungen der Fehleranzahl aufgeteilt nach unabhängigen Variablen

	Novizen			Experten		
	konventionell	diskret	kontinuierlich	konventionell	diskret	kontinuierlich
Mittelwert [s]	3.12	3.43	2.60	3.77	3.13	3.55
Standardabweichung [s]	2.35	2.06	2.08	2.22	2.31	2.42

Kernaussagen zur Effektivität

1. Novizen weisen mit dem kontinuierlichen System eine geringere Fehlerzahl auf als mit dem übrigen Systemen.
2. Novizen weisen generell eine geringere Fehlerzahl auf als die Experten.
3. Es gibt keinen signifikanten Effekt der Vorerfahrung auf die Ablagegenauigkeit, auch wenn ein Trend zu erkennen ist: Tendenziell weisen Experten insgesamt eine höhere Ablagegenauigkeit auf als Novizen.
4. Das Steuerungssystem hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ablagegenauigkeit. Experten weisen tendenziell mit dem konventionellen System höhere Ablagegenauigkeiten auf als Novizen.

6.2.3. Effizienz

Abbildung 6-5 zeigt Boxplots der jeweils benötigten Zeit, abhängig von Vorerfahrung und Steuerungssystem. Zu erkennen ist, dass Experten mit steigendem Unterstützungsgrad mehr Zeit benötigen und dass dieser Trend bei Novizen gegenläufig ist.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktorstufen Vorerfahrung (between) und Steuerungssystem (within) zeigt keinen signifikanten Effekt der Vorerfahrung auf die Bedienzeit, auch wenn ein Trend zu erkennen ist. Tendenziell weisen Novizen eine kürzere Bedienzeit auf als Experten ($MW_{Exp} = 54.9$; $SD_{Exp} = 31.3$, $MW_{Nov} = 47.1$; $SD_{Nov} = 26.3$). Das Steuerungssystem zeigt ebenso keinen signifikanten Einfluss auf die Bedienzeit (vgl. Tabelle 6-6). Es ist ein Interaktionseffekt zwischen Vorerfahrung und Steuerungssystem vorhanden ($F(2,108) = 6.192$, $p = .003$, $\eta^2 = .017$). Ein Vergleich der Mittelwerte (siehe Tabelle 6-7) zeigt, dass Experten mit beiden intuitiven Steuerungssystemen schlechter zu recht kommen als Novizen.

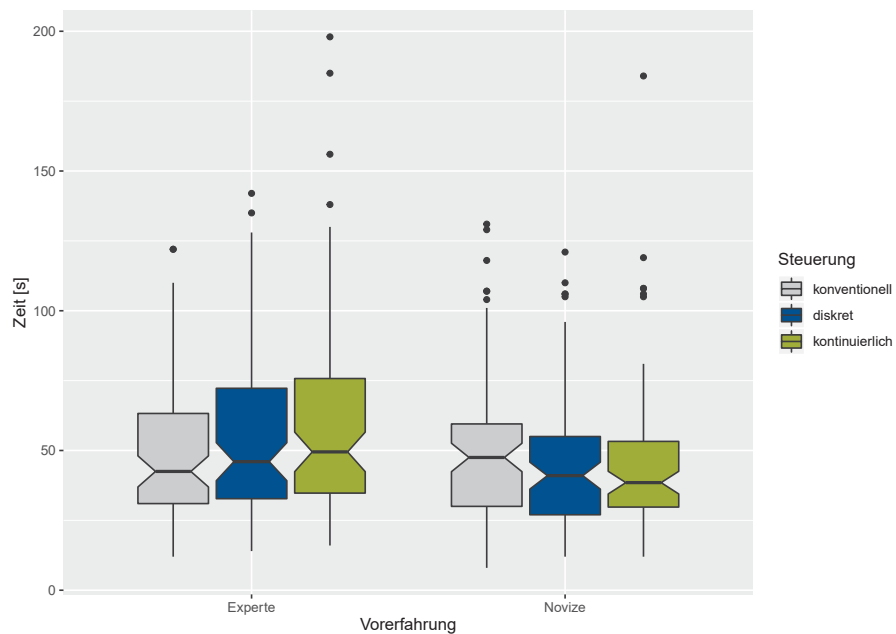


Abbildung 6-5: Boxplots der benötigten Zeit, geteilt in die Vorerfahrung und die Steuerungssysteme. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.

Tabelle 6-6: ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Bedienzeit

	Zeit			
	df	F	p	η^2
Vorerfahrung	1, 54	2.998	.089	.018
System	2, 108	1.317	.272	.004
Vorerfahrung * System	2, 108	6.192	.003	.017

Tabelle 6-7: Mittelwerte und Standardabweichungen (in Sekunden) der Bedienzeit aufgeteilt nach unabhängigen Variablen

	Novizen			Experten		
	konventionell	diskret	kontinuierlich	konventionell	diskret	kontinuierlich
Mittelwert [s]	50.4	45.7	45.3	48.0	55.0	61.5
Standardabweichung [s]	26.8	25.0	27.1	24.1	29.9	37.3

Kernaussagen zur Effizienz

1. Experten benötigen mit steigendem Unterstützungsgrad tendenziell mehr Zeit, Novizen hingegen weniger.
2. Es gibt keinen signifikanten Effekt der Vorerfahrung auf die Bedienzeit. Tendenziell weisen Novizen eine kürzere Bedienzeit auf Experten.
3. Das Steuerungssystem zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Bedienzeit.

6.2.4. Zufriedenstellung

Abbildung 6-6 zeigt Boxplots des System Usability Scores, abhängig von Vorerfahrung und Steuerungssystem. Zu erkennen ist, dass Experten tendenziell eher höhere Gebrauchstauglichkeit attestieren als Novizen, die beiden intuitiven Systeme jedoch über beide Erfahrungsgruppen hinweg bessere Werte erzielen als das konventionelle System.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktorstufen Vorerfahrung (between) und Steuerungssystem (within) zeigt einen signifikanten Effekt der Vorerfahrung auf die Gebrauchstauglichkeit ($F(1,54) = 4.133$, $p = .047$, $\eta^2 = .024$).

Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass Experten eine höhere Gebrauchstauglichkeit attestieren als Novizen ($MW_{Exp} = 71.5$; $SD_{Exp} = 19.0$, $MW_{Nov} = 64.9$; $SD_{Nov} = 22.7$). Es zeigt sich ebenso ein signifikanter Einfluss des Steuerungssystems auf die Gebrauchstauglichkeit ($F(2,108) = 10.349$, $p < .001$, $\eta^2 = .101$).

Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass die konventionelle Steuerung schlechter bewertet wird als die beiden intuitiven Steuerungskonzepte ($MW_{konv} = 58.7$; $SD_{konv} = 22.8$, $MW_{disc} = 73.2$; $SD_{disc} = 18.2$, $MW_{kont} = 72.7$; $SD_{kont} = 19.1$). Es ist kein Interaktionseffekt zwischen Vorerfahrung und Steuerungssystem vorhanden (vgl. Tabelle 6-8).

Tabelle 6-8: ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Gebrauchstauglichkeit

	Zeit			
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2
Vorerfahrung	1, 54	4.133	.047	.024
System	2, 108	10.349	<.001	.101
Vorerfahrung * System	2, 108	6.192	.069	.027

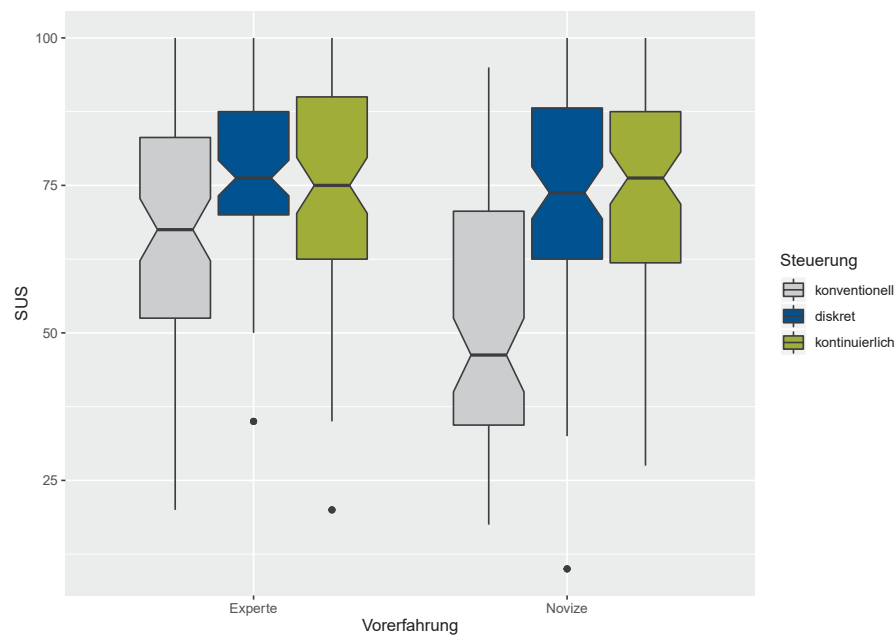


Abbildung 6-6: Boxplots der Gebrauchstauglichkeit, erfasst via System Usability Scale, geteilt in die Vorerfahrung und die Steuerungssysteme. Abgebildet sind der Median mit einem 95%-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.

Kernaussage zur Gebrauchstauglichkeit

1. Die intuitiven Systeme erzielen über beide Erfahrungsgruppen hinweg bessere Gebrauchstauglichkeits-Werte als das konventionelle System.

6.2.5. Mentale Rotation

Eine Kontrolle bezüglich der erzielten Ergebnisse im Bezug zur mentalen Rotationsfähigkeit der Probanden wies keinerlei signifikante Ergebnisse auf, auch wenn sich zeigte, dass Novizen im Schnitt eine höhere mentale Rotationsfähigkeit besaßen als Experten ($MW_{Exp} = 11.89$; $SD_{Exp} = 4.75$, $MW_{Nov} = 16.00$; $SD_{Nov} = 4.68$)

Kernaussage zur mentalen Rotationsfähigkeit

1. Novizen besitzen im Schnitt eine höhere mentale Rotationsfähigkeit als Experten.

6.2.6. Lerneffekt

Zusätzlich zu den in den Hypothesen formulierten Annahmen wurde eine Analyse des Lerneffekts vorgenommen. Zu diesem Zwecke wurde die Zeit abhängig von der Versuchs- bzw.

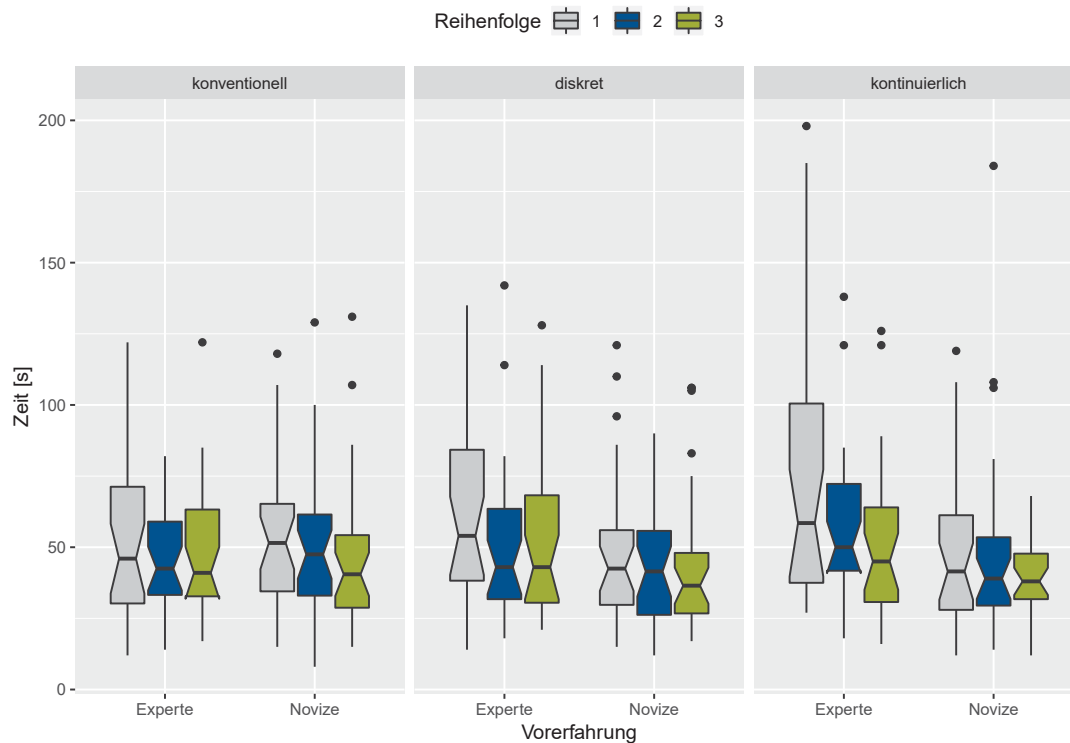


Abbildung 6-7: Boxplots der Zeit, geteilt in die Vorerfahrung, Steuerungssysteme und Reihenfolge. Abgebildet sind der Median mit einem 95%-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.

Tabelle 6-9: ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Gebrauchstauglichkeit

	Zeit			
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2
System	2, 110	1.204	.304	.004
Reihenfolge	2, 330	7.805	<.001	.022
Reihenfolge * System	4, 330	0.653	.653	.004

Bewegungsreihenfolge analysiert. Abbildung 6-7 zeigt Boxplots der benötigten Zeit, abhängig von Vorerfahrung, Steuerungssystem und Reihenfolge. Zu erkennen ist, dass Probanden beider Versuchsgruppen mit allen Systemen in ihren Steuerungen schneller werden.

Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktorstufen Steuerungssystem (within) und Reihenfolge (within) zeigt einen signifikanten Effekt der Reihenfolge auf die benötigte Zeit ($F(2,303) = 7.805$, $p < .001$, $\eta^2 = .022$). Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass beide Probandengruppen im Versuchsverlauf fortschreitend mit allen Steuerungssystemen eine geringere Zeit benötigen (vgl. Tabelle 6-10). Es zeigt sich kein Einfluss des Steuerungssystems sowie kein Interaktionseffekt zwischen Reihenfolge und Steuerungssystem (vgl. Tabelle 6-9).

Tabelle 6-10: Mittelwerte und Standardabweichungen (in Sekunden) der Bedienzeit aufgeteilt nach unabhängigen Variablen

System	konventionell			diskret			kontinuierlich		
Reihenfolge	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Mittelwert [s]	53.4	47.6	46.7	55.9	47.6	47.6	61.2	53.4	45.6
Standardabweichung [s]	28.2	22.7	25.0	31.1	25.0	26.8	42.2	31.6	22.6

Kernaussage zum Lerneffekt

1. Probanden beider Versuchsgruppen werden mit den Systemen von Aufgabe zu Aufgabe signifikant schneller.

6.2.7. Zusammenfassung

Entsprechend den Ergebnissen müssen die drei im Vorfeld aufgestellten Hypothesen wie folgt bewertet werden:

- H_1 Unabhängig von der Vorerfahrung ist die Bedienung mit dem kontinuierlichen Steuerungskonzept effektiver als mit den beiden übrigen (konventionell bzw. diskret).
Hypothese muss abgelehnt werden. Sowohl Experten als auch Novizen arbeiten mit einem System, das kontinuierlich die Position des Bedieners berücksichtigt, mit der selben Genauigkeit wie mit den beiden anderen Systemen.
- H_2 Novizen sind in der Bedienung mit dem kontinuierlichen Steuerungskonzept am effizientesten, Experten in der Bedienung mit dem konventionellen Steuerungskonzept.
Hypothese muss abgelehnt werden. Novizen sind mit beiden intuitiven Konzepten effizienter als mit dem konventionellen Konzept. Experten hingegen sind mit dem konventionellen Konzept am effizientesten, gefolgt vom diskreten und schließlich dem kontinuierlichen Konzept. Beim kontinuierlichen Konzept zeigt sich in der Gruppe der Experten eine hohe Varianz.
- H_3 Die beiden intuitiven Steuerungskonzepte (diskret und kontinuierlich) sind für beide Benutzergruppen zufriedenstellender, als das konventionelle Bedienkonzept.
Hypothese wird angenommen. Beide Nutzergruppen bewerten die beiden intuitiven Konzepte als zufriedenstellender als das konventionelle Steuerungskonzept.

6.2.8. Diskussion

Eine Limitation der Probandenstudie ist die Stichprobenszusammensetzung. Es gab große Unterschiede bei den Erfahrungswerten der Experten. So ordneten sich lediglich sechs Probanden in ihrer Selbsteinschätzung dem höchsten Erfahrungswert zu. Die Gruppe derjenigen Experten, die selbst den Erfahrungswert eins, also den niedrigstmöglichen, angaben, war mit sechs Probanden ebenso groß. Es sind Versuchsteilnehmer vertreten, die ihre Erfahrung in Kransteuerung anhand eines Brückenkrans, Hängekrans oder Säulenkrans gesammelt haben. In der Bedienung eines Ladekrans haben sie allerdings wenig bis keine Erfahrung. Sie zählen als Experten, weil es ihnen mit ihrem gültigen Kranführerschein erlaubt ist, einen Ladekran zu steuern. Obendrein sind die Ergebnisse unter der beschriebenen Verletzung der Normalverteilung und der damit verbundenen Normalverteilungsannahme aufgrund der Stichprobengröße vorsichtig zu interpretieren.

Die Unterschiede zwischen den Steuerungssystemen, vor allem hinsichtlich der Bedienzeit, zeigen sich nicht in der erwarteten Deutlichkeit. Dies wird in erster Linie darauf zurückgeführt, dass die geringe Aufgabenschwierigkeit gepaart mit der langen Eingewöhnungsphase zu einer insgesamt geringen kognitiven Belastung führte, weshalb sich die Unterschiede in den Steuerungen bezüglich des Umcodieraufwandes nicht in dem Maß zeigen, in dem sie der Theorie nach vorhanden sein müssten. Durch die relativ entspannte Situation bzw. klare Begrenzung der zu erfüllenden Aufgaben ergab sich ebenso ein eher geringes Stresslevel für die Probanden. In Summe könnten diese Faktoren dazu geführt haben, dass die kognitiven Kapazitäten innerhalb des Versuches nicht ausgeschöpft waren, sodass den Probanden genügend Ressourcen blieben, um die Umrechnung der gewünschten Bewegung zwischen eigener und Kranperspektive für die recht simpel gehaltenen Steuerungsaufgaben problemlos durchzuführen. Für zukünftige Studien empfehlen die Autoren daher eine Anpassung der Steuerungsaufgaben sowie eine extrinsische Motivation der Probanden, die Aufgaben möglichst schnell durchzuführen, um ein gewisses Level an Stress zu induzieren.

Grundsätzlich lässt sich jedoch feststellen, dass die beiden neu entwickelten intuitiven Steuerungssysteme gerade für Novizen bezüglich aller abhängigen Variablen besser abschneiden als das konventionelle Steuerungssystem, mit dem die einzelnen Freiheitsgrade des Krans angesteuert werden müssen und wo gleichzeitig die mentale Rotation von Bediener- auf Krankoordinatensystem notwendig ist. Insbesondere die geringere Fehlerzahl der Novizen mit den intuitiven Modi und die mit steigendem Unterstützungsgrad sinkende Bedienzeit bei den Novizen sprechen eindeutig für die intuitive Laststeuerung. Sowohl Experten als auch Novizen bewerten die beiden intuitiven Steuerungssysteme als zufriedenstellender verglichen mit dem konventionellen System, obwohl sich bei Experten sowohl bezüglich der Ablagegenauigkeit als auch bezüglich der Bedienzeit der Erfahrungs-

wert mit dem bekannten Steuerungssystem zeigt und sie damit besser abschneiden als mit den beiden intuitiven Konzepten.

Hauptargumente für die intuitive Laststeuerung

1. Geringere Fehlerzahl der Novizen mit den intuitiven Modi.
2. Sinkende Bedienzeit mit steigender Unterstützung bei den Novizen.
3. Zufriedenstellendere Bewertung der intuitiven Modi durch Experten und Novizen.
4. Eindeutige subjektive Favorisierung der intuitiven Modi durch Experten und Bediener.

Im Vergleich der beiden intuitiven Steuerungskonzepte lässt sich keine klare Empfehlung aussprechen. Die intuitiven Steuerungskonzepte unterscheiden sich in beiden Gruppen nicht signifikant bezüglich Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung. Aufgrund des leicht besseren Abschneidens der Novizen mit dem kontinuierlichen Steuerungssystem (z. B. hinsichtlich der Fehleranzahl) wäre jedoch eine kontinuierliche Positionsanpassung zu bevorzugen. Grundsätzlich zeigt sich, dass beide Systeme ausgesprochen schnell von Novizen wie von Experten verstanden werden und sich insofern das mentale Modell der Nutzer an beide Systeme anpasst.

Dies zeigt sich auch in einer abschließend gestellten Frage zur Präferenz „*Mit welchem Modus würden Sie eine weitere Aufgabe ausführen?*“, bei der sich keine Unterschiede zwischen den Beiden Nutzergruppen zeigte und mit $N_{\text{konv}} = 7$, $N_{\text{disc}} = 19$, $N_{\text{kont}} = 30$ das kontinuierliche Konzept klar die favorisierte Variante darstellte.

7. Ergebnisdiskussion

Nach der ergonomischen Konzeption, der technischen Realisierung sowie der Evaluierung der intuitiven Laststeuerung findet sich in diesem Kapitel eine kritische Diskussion der Ergebnisse. Zunächst erfolgt ein Abgleich mit den in Kapitel 5.1 ermittelten Anforderungen. Im Anschluss daran werden die Beantwortung der Forschungsfragen sowie die Grenzen der intuitiven Laststeuerung diskutiert. Im letzten Abschnitt wird aufgezeigt, welche Anwendungsfälle – abgesehen von Kranen – ein Potenzial für die intuitive Laststeuerung bieten.

7.1. Anforderungsabgleich

Zum Anforderungsabgleich werden zunächst die Anforderungen einzeln betrachtet. In den Tabellen 7-1 bis 7-3 sind die bekannten Anforderungen an die intuitive Laststeuerung zu diesem Zweck erneut dargestellt. Mit Hilfe eines Ampel-Farbschemas wird die Erfüllung der Anforderung bewertet: Grüne Anforderungen werden durch die intuitive Laststeuerung erfüllt, gelbe teilweise erfüllt und rote Anforderungen nicht erfüllt. Zu einigen Anforderungen bzw. der Bewertung (rot/gelb/grün) wird in Anhang C einzeln Stellung genommen. Hierzu dienen die durchnummerierten Kommentarverweise in der letzten Tabellenspalte. Die Anmerkungen sollen vorrangig als Hinweise zur praktischen Umsetzung der intuitiven Laststeuerung verstanden werden.

Tabelle 7-1: Anforderungsabgleich

Hauptgruppe	Anforderung	Wert/Beschreibung	Muss	Soll	Kann	Wunsch	Ergonomisch	Technisch	Ökonomisch	Normativ	Bewertung	Kommentar	
Gesamtsystem	Entwicklung einer innovativen Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Lasthandling	mit Hilfe einer tragbaren Fernbedienung	X				X	X					
	Steuerung der Bewegungsrichtung des Hakens	automatische Berücksichtigung der Positionen von Last, Maschine und Bediener	X				X	X					
		direkte Vorgabe der Hakenbewegung durch parallele Betätigung eines einzelnen Bedienelements	X				X	X					
	Verfügbarkeit	auf Abruf jederzeit		X				X				1.	
	Berücksichtigung von Normen und Richtlinien	alle einschlägige Normen und Richtlinien (soweit sinnvoll möglich)		X				X		X		2.	
	Sicherheit, Performance Level	Funktionale Sicherheit wie bei Serien-Hebmitteln erreichbar	X					X				3.	
	Umgang mit Hindernissen	Hindernisse im Betrieb erkennen und signalisieren				X		X					4.
		Hindernisse im Betrieb erkennen und umfahren				X		X					
	Nachrüstbarkeit	Neues Konzept muss an bestehende Technik adaptierbar sein (BUS-Systeme)	X					X					5.
		an bestehende Hebmittel nachrüstbar		X				X					
		Herstellerunabhängige Nachrüstung (Kundenwunsch)		X				X					
	Arbeitsbereichsbegrenzung mit Teaching-Funktion	Abfahren des zulässigen Arbeitsraums zu Beginn der Arbeit, Bewegung nur in diesem Raum zulässig				X		X					6.
	Leichte Erlernbarkeit der Steuerung	lernförderndes System (Erlernen durch höchstens einmaligen Fehler)	X				X						7.
	Kosten	< 500 € Zusatzkosten in Anschaffung (vertretbar für Geräte, die nicht von Spezialisten bedient werden)	X					X	X				8.
		Wartungskosten minimieren		X				X	X				
	Betriebstemperaturbereich	-30 °C - +50 °C		X				X					9.
	Einsatzort	innen und außen	X					X					
	Wartungsaufwand	nicht höher als bei Funksteuerung bisher	X					X					
	Maschinenrichtlinie	Berücksichtigung aller möglichen Missbrauchsfälle	X					X					10.
	Bewegter Bediener	System funktioniert bei stehendem oder sich bewegendem Bediener	X				X	X					
Industrietauglichkeit	im Bezug auf Robustheit, Genauigkeit, Arbeitsbereichsgröße, Lichtverhältnisse, Lärm etc.	X					X						
Zugänglichkeit	keine dauerhafte Haken- oder Maschinenberührung durch den Bediener notwendig	X				X	X						
Einsatzumgebung	industrielles Umfeld, d. h. außerhalb Laborumgebung	X					X						

Tabelle 7-2: Anforderungsabgleich (Fortsetzung)

Hauptgruppe	Anforderung	Wert/Beschreibung	Muss	Soll	Kann	Wunsch	Ergonomisch	Technisch	Ökonomisch	Normativ	Bewertung	Kommentar	
Hebemittel / Kran	Anzahl der Kran-Freiheitsgrade	beliebig viele rotatorische und translatorische Freiheitsgrade möglich	X					X				11.	
	Bewegungsraum: Mindestlänge von Bewegung in der Ebene	> 6 m	X					X					
	Hublast	> 300 kg mind. (auch an der Spitze)		X				X					
	Bewegungsgeschwindigkeit in der Ebene	Orientierung an Turmdrehkran: Drehen 0.7 - 1 U/min; Katze < 40 m/min		X				X					
	Hubgeschwindigkeit	Orientierung an Turmdrehkran: < 50 m/min (Hakengeschwindigkeit)		X				X					
	Energiequelle Hebemittel	elektrisch oder hydraulisch	X					X					
	Lastaufnahmemittel	Haken (mit oder ohne Seil)	X					X					
	Schnittstelle für Funksteuerung	offen konfigurierbar, so dass "neue" Steuerung einfach anzubringen (BUS-Protokoll, Steckerspezifikation,...)		X				X					12.
	Hakenposition bekannt	Ausstattung aller Freiheitsgrade mit Messwertgebern, Ausgabe über standardisierte Schnittstelle	X					X					
	Antriebskoordination	Gleichzeitige Bewegung mehrerer Antriebe zur Realisierung der gewünschten Hakenbewegung	X					X					
Bewegung des Hakens von A nach B	auf kürzestem Weg möglich (unter Berücksichtigung vorhandener Hindernisse)	X					X						
Steuergerät	Hublasterkennung	Erkennung der aktuellen Hublast und Ausgabe auf Bus (für Rückspiegelung in Funksteuerung)		X				X				13.	
	Ermöglichen kleiner Bewegungen des Benutzers	Winkelanpassung bei Benutzerdrehung diskretisieren auf 2-5° Genauigkeit	X				X	X					
	Logging der Stellteilbedienung	Stellteilbedienung in Datei schreiben, damit (Fehl-)Bedienrichtungen aufgezeichnet werden können	X					X				14.	
	Logging des Hakenverlaufs	Hakenverlauf in Datei schreiben (x, y, z-Koordinate), so dass die genaue Trajektorie nachvollzogen werden kann	X					X					
	Berechnung des Bedienerwunsches	Zusammenführung von Ortungssignal (rotatorische Position) und Benutzerwunsch, Umrechnung in Bewegung (angegeben im KoSy des Hebemittels)	X					X					
	Berechnung der Hakenposition	Zusammenführung der Messwerte für die Hebemittel-Freiheitsgrade, Angabe der Hakenposition im KoSy des Hebemittels	X					X					
	Vergleich zwischen IST-Bediener-Wunsch (= SOLL-Bewegung) und IST-Hakenposition	Ermittlung von SOLL und IST, Bewegung des Hakens in gewünschte Richtung	X					X					
	Ansteuerung der Antriebe	Gleichzeitige Bewegung mehrerer Antriebe zur Realisierung der gewünschten Hakenbewegung	X					X					
Funksender / Funkempfänger / Funkstrecke / Funksteuerung	Schnittstellenvariabilität	Eingangsschnittstellen variabel (passend zu Funksteuerungen, Hebemittelsensoren), Ausgabeschnittstellen variabel (passend zu Hebemittelantrieben)	X					X					
	Umgang mit Hindernissen	keine unzulässige Beeinträchtigung durch Umgebungselemente wie Wände, Metallgegenstände, Vegetation und andere Feuchtigkeitquellen	X					X					
	Frequenzbereich	EU-Weit lizenzfrei (ISM) 2,4 GHz-Band		X		X		X					
	Mechanismen zur Entstörsicherheit	Frequenz- und Leistungsmanagement (Frequency-Hopping Spread Spectrum u. Ä.)		X				X					
	Reichweite	Groß genug für hohe Türme (> 150 m) und große Auslegerlängen Sichtweite (mind. 10 m, < 30 m)		X				X					
	Feinpositioniermodus	Feinpositioniermodus vorhanden, z. B. durch Druck von Taster, solange Taster gedrückt				X	X	X					
	Displayanzeige	Anzeige der Lastposition oder Freiheitsgradstellungen sowie der Hublast			X		X	X				15.	
	Speichern der aktuellen Hakenposition	Knopf zum Speichern der aktuellen Hakenposition vorhanden				X	X	X					
	Annäherungshilfe an gespeicherte Lastposition	Vorgabe von Bewegungsrichtungen zum Erreichen der gespeicherten Lastposition				X	X	X					
	Akkulaufzeit	Ausreichend für einen ganzen Arbeitstag (10 h)		X				X					
	Automatikfunktion signalisieren	Bediener erhält Signal, wenn Automatikfunktion aktiv ist (optisch o. ä.)	X				X	X					
	Überwachungsfunktion des Bedieners sicherstellen	kontinuierlich während des Betriebs (z. B. Totmannknopf)		X				X	X			16.	
	Gleichzeitigkeit: Bedienung Hebemittel und Anschlagen	Steuerung verstaubar, z. B. an Gurt	X				X	X					
	Gewicht	Angepasst an Anwendung und Bediener (bisher: < 1 kg bis > 4 kg)	X				X	X					
	Untersuchung der Messfrequenz	kontinuierliche oder diskrete Messung des Nutzer-Koordinatensystems implementieren	X					X					
Genauigkeit der Orientierungsmessung	mind. 5°, besser 1°	X					X						
Infrastruktur zur Ortung des Bedieners	keine aufwendige Infrastruktur im Umfeld des Krans (Kameras, RFID-Reader etc.)	X					X						

Tabelle 7-3: Anforderungsabgleich (Fortsetzung)

Hauptgruppe	Anforderung	Wert/Beschreibung	Muss	Soll	Kann	Wunsch	Ergonomisch	Technisch	Ökonomisch	Normativ	Bewertung	Kommentar
Funksender / Funkempfänger / Funksteuerung / Funkstrecke / Funksteuerung	Bedienbare Freiheitsgrade	3 (Bewegung der Last in 3 Raumrichtungen)	X					X				
	Energiequelle Funksender	Akku	X					X				
	Robustheit gegen Umwelteinflüsse	Schmutz, Staub, Feuchtigkeit, Stoß, EMV	X					X				
	Not-Stop-Funktion	vorhanden	X					X				17.
	Schutz vor ungewollter Eingangsetzung	vorhanden	X					X				18.
	Bewegungseinschränkung des Bedieners	Funksteuerung darf Bewegungsmöglichkeiten des Bedieners nicht unzulässig einschränken	X				X	X				
	EMV-Test	Bestehen eines industriellen EMV-Tests (Messkammer)		X				X				19.
	Schnittstellenvariabilität	Ausgangsschnittstellen variabel (passend zu Funksteuerung und Funkstrecke)	X					X				
	Stellteil/Bedienteil	Handschuhbedienung	System kann mit Arbeitshandschuhen bedient werden	X				X	X			
Fühlbare Bedienelemente		System muss bei entsprechender Erfahrung "ohne Hinsehen" bedient werden können	X				X	X				
Stellteil für Hubfunktion mit haptischer Rückmeldung		Rasterung für Geschwindigkeitsstufen (sonst nur optische Erkennung möglich, ist schwierig)		X			X	X				20.
Auswahlmöglichkeit für Stellteilbelegung		Hubfunktion rechts oder links nach Auswahl des Benutzers		X			X	X				
Nullstellungszwang		Nullstellungszwang der Stellteile beim Loslassen	X				X	X				
Zustimmschalter		falls vorhanden: keine dauerhafte Betätigung durch Drücken o.ä. falls vorhanden: Auslösung rein durch Handkontakt/Umgreifen			X		X	X				21.
Bedienung mit verschiedenen Händen		Konfiguration der Stellteile möglich, so dass Hauptteil der Bedienung mit stärkerer Hand erledigt wird		X			X	X				
Haptische Rückmeldung		vorsehen Stärke der Rückmeldung ist durch Bediener einstellbar			X		X	X				22.
Proportionalsteuerung		Bewegungsgeschwindigkeit ist proportional zur Hebelauslenkung		X				X				
Bedienung		mit ein oder zwei Händen		X			X	X				23.
Bedienung	mit einer Hand			X		X	X					

Beim Anforderungsabgleich wird deutlich, dass alle Muss-Anforderungen sowie die meisten Soll-Anforderungen erfüllt sind. Die als optional eingestuftes Kann- und Wunsch-Anforderungen sind häufig nicht erfüllt.

Über die Anforderungen der Anforderungsliste hinaus sind auch die funktionalen Basisanforderungen erfüllt. Der diesbezügliche Nachweis findet sich in Kapitel 5.8.

Eine Auswertung des Anforderungsabgleichs ergibt insgesamt, dass die Anforderungen an die intuitive Laststeuerung als **erfüllt** betrachtet werden können.

7.2. Beantwortung der Forschungsfragen

Die Leitfrage für die intuitive Laststeuerung lautete:

Wie sieht eine Mensch-Maschine-Schnittstelle für funkbediente Lasthebemittel aus, die sowohl die steuerungstechnischen als auch die ergonomischen Anforderungen an eine intuitive, zielorientierte Steuerung erfüllt?

Die Erfüllung der Anforderungen wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt diskutiert, sodass davon ausgegangen wird, dass die intuitive Laststeuerung eine Antwort auf die Leitfrage liefern kann.

Aus der Leitfrage wurden je drei ergonomische und steuerungstechnische Forschungsfragen abgeleitet. Zu den Antworten auf die Forschungsfragen wird nachfolgend einzeln Stellung genommen.

7.2.1. Ergonomische Fragestellungen

1. **Eingabemodalität:** Welche Bedien-/Stellteile und Interaktionsparadigmen eignen sich für die intuitive, zielorientierte Vorgabe der gewünschten Lastbewegung?
→ In Kapitel 4.1 und 4.2 wird die intuitive Laststeuerung auf Basis des mentalen Modells des Menschen entworfen und es wird aufgezeigt, dass die intuitive Laststeuerung mit Joysticks und direkter Vorgabe der gewünschten Hakenbewegung bezüglich der Korrektheit der Eingaben, der Steuerungszeit sowie der Zufriedenheit der Bediener mit dem System signifikante Vorteile bietet. Dies gilt sowohl für Novizen als auch für Erfahrene.
2. **Kompatibilität:** Wo befindet sich das interne Referenzkoordinatensystem der Nutzer(-gruppen)? Wie und wann verändert es sich?
→ Die Untersuchungen zum internen Nutzer-Referenz-Koordinatensystem finden sich in Kapitel 4.3. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass Probanden tendenziell eher nach ihrem Kopf denn nach ihren Händen steuern. Betrachtet man jedoch den häufigsten Anwendungsfall mit Körper- und Kopfdrotation zur Last sind beide Systeme deckungsgleich und es lässt sich kein Unterschied feststellen. Eine Verortung des Nutzer-Referenzkoordinatensystems in den Händen (d. h. in der Funksteuerung) ist somit zu rechtfertigen.
3. **Evaluation:** Wie unterscheiden sich neue Steuerungskonzepte im Vergleich zu herkömmlichen Funksteuerungssystemen hinsichtlich objektiver (Effizienz und Effektivität) und subjektiver (Nutzerzufriedenheit und Akzeptanz) Kriterien?
→ Im Rahmen der Probandenstudie in Kapitel 6 wird gezeigt, dass besonders für Novizen die intuitive Laststeuerung entscheidende Vorteile bezüglich Fehlerzahl und Bedienzeit bietet. Über beide Nutzergruppen hinweg wird die intuitive Laststeuerung bezüglich ihrer Gebrauchstauglichkeit signifikant besser bewertet und für die Bedienung in der Zukunft mit 49:7 gegenüber dem konventionellen Konzept bevorzugt.

7.2.2. Steuerungstechnische Fragestellungen

- Orientierung:** Wie kann man aus der Eingabe eines bewegten Benutzers unter Berücksichtigung der aktuellen Benutzerorientierung die gewünschte Bewegungsrichtung der Last ermitteln?

→ Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird zunächst ein Messsystem zur Orientierungsmessung konzeptioniert und implementiert (siehe Kapitel 5.4). Es kommt ein Messsystem mit MEMS-Inertialsensorik zum Einsatz, das in den Funksender integriert wird. Der Funktionsnachweis im Rahmen der Entwicklung sowie eine ausführliche Evaluierung (vgl. Kapitel 5.8) belegen, dass mit dem Messsystem die Benutzerorientierung hinreichend genau erfasst werden kann. Mit Hilfe der geometrischen Zusammenhänge am Demonstrator-Kran (vgl. Kapitel 5.4) und entsprechender Rotations-Matrizen für die Rotation um die z-Achse kann der Benutzerwunsch zunächst vom Funksteuerungs-Koordinatensystem ins Krankoordinatensystem und anschließend von dort ins Hakenkoordinatensystem umgerechnet werden. Somit ist die gewünschte Bewegungsrichtung der Last bekannt.
- Steuerung & Regelung:** Welche Steuerungs- (Rückwärtskinematik) und Regelungsansätze eignen sich für die Umsetzung eines intuitiven Steuerungskonzepts an einem beliebigen Kran?

→ In Kapitel 5.5 wird zunächst eine inverse Kinematik präsentiert, mit deren Hilfe der Benutzerwunsch (Eingabe) in entsprechende Gelenkbewegungen des Krans umgerechnet werden kann. Das ebenfalls dort gezeigte Regelungskonzept sorgt anschließend dafür, dass die gewünschten Gelenkbewegungen exakt umgesetzt werden und daraus die gewünschte Hakenbewegung (Ausgabe) resultiert. Der Funktionsnachweis im Rahmen von Kapitel 5.8 zeigt, dass das Steuerungs- und Regelungskonzept für die Verwendung im Rahmen der intuitiven Laststeuerung tauglich ist.
- Umsetzung:** Wie muss eine Steuerungsarchitektur (Hard- und Software) aussehen, welche die Bewegungsvorgabe für den Haken eines Lasthebemittels mittels einer Funksteuerung auf die Einzelbewegungen der Antriebe umrechnet?

→ Die Antwort auf diese Fragestellung bildet das gesamte Kapitel 5, das die technische Umsetzung der intuitiven Laststeuerung beschreibt. Alle notwendigen Hard- und Softwarebausteine (Funksteuerung, Sensorik, inverse Kinematik, Regelungskonzept, Steuergerät) werden spezifiziert und in das Gesamtsystem der intuitiven Laststeuerung integriert. Die resultierende Systemarchitektur wird in Kapitel 5.7 dargestellt. Der anschließende Funktionsnachweis in Kapitel 5.8 sowie die erfolgreich durchgeführte Probandenstudie mit einer großen Zahl von Probanden (vgl. Kapitel 6) belegen die Funktionsfähigkeit der intuitiven Laststeuerung und unterstreichen somit die erfolgreiche Beantwortung der Forschungsfrage.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die im vorliegenden Bericht dargestellten Ergebnisse hinreichende Antworten auf die Leitfrage sowie die sechs Forschungsfragen geben.

7.3. Grenzen der intuitiven Laststeuerung

Die intuitive Laststeuerung eignet sich grundsätzlich für den Einsatz an allen Krantypen (vgl. Kapitel 2.2) im industriellen Umfeld, bei denen Funksteuerungen zum Einsatz kommen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden jedoch auch einige Grenzen deutlich, die nicht unerwähnt bleiben sollen.

7.3.1. Gestaltung der Benutzereingabe

Im Rahmen der ergonomischen Konzeption der intuitiven Laststeuerung wurde eine Funksteuerung mit zwei Joysticks als sinnvolles Eingabegerät identifiziert. Folglich wurde für die intuitive Laststeuerung eine Funksteuerung konfiguriert, die aus einem Standard-Baukasten eines Funksteuerungs-Herstellers stammt. Zugegebenermaßen handelt es sich bei der konfigurierten Steuerung um ein System, das sich äußerlich nicht sehr von bisherigen Steuerungen unterscheidet, auch wenn es sich durch die erweiterte Sensorik- und Steuerungsfunktionalität in seiner Funktion wesentlich abhebt. Rein äußerlich ist das gewählte Funksteuerungskonzept daher sehr nah an bisherigen Lösungen, und folglich wenig revolutionär. Es existieren jedoch – über Joysticks hinaus – unzählige andere Möglichkeiten für die Eingabe des Benutzerwunsches. Im Rahmen des Projekts wurde lediglich eine bestimmte Eingabeform (begründet) ausgewählt. Es ist nicht auszuschließen, dass andere Eingabegeräte die Gebrauchstauglichkeit der intuitiven Laststeuerung weiter erhöhen können. Dies sollte Gegenstand weiterer Forschungstätigkeiten sein.

7.3.2. Messung der Benutzerorientierung

Die korrekte Funktion der Umrechnung des Benutzerwunsches auf die Hakenbewegung setzt eine korrekte und robuste Messung der Benutzerorientierung 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), Temperaturen außerhalb des Bereichs von 15°C - 25°C und zu geringe statische Magnetfeldstärken führen zu einer Verschlechterung des Driftverhaltens und damit zu einem über die Zeit zunehmenden Messfehler. Insbesondere der beschränkte Temperaturbereich ist für eine industrielle Anwendung im Außenbereich so nicht hinzunehmen. Es ist

zu erwarten, dass verbesserte Sensorik diese Schwächen effizient beseitigen kann. Temperaturfehler lassen sich in der Regeln durch softwareseitige Temperaturkalibrierung kompensieren. Ferner ist das Messsystem so zu gestalten und zu integrieren, dass schwankende Magnetfeldstärken nicht zu Spannungsinduktion führen und dass das Magnetfeld keinerlei Einfluss auf die Fusion der Messdaten nehmen kann. Die Berücksichtigung dieser beiden Maßnahmen wird für die Weiterentwicklung der intuitiven Laststeuerung empfohlen, um lange Laufzeiten (> 90 min) zwischen zwei Referenzierungszeitpunkten und damit einen hohen Bedienkomfort sicherzustellen. Grundsätzlich eignet sich die Messung der Benutzerorientierung mit Hilfe von integrierter MEMS-Inertialsensorik mit Datenfusion hervorragend für die Messung der Orientierung eines bewegten Kranbedieners.

Auch beim Sicherheitskonzept ist die verwendete Sensorik die maßgebliche Systemschwäche. Der verwendete MEMS-Baustein besitzt keine Sicherheitszertifizierung und verhindert somit eine Kategorisierung nach DIN EN ISO 13849-1 [Deu-2016d] und folglich die Angabe eines übergreifenden Performance Level der Kransteuerung. Es wird daher der Einsatz entsprechend zertifizierter Sensorik (z. B. Kategorie 3 nach [Deu-2016d]) für zukünftige Anwendungen empfohlen.

7.3.3. Evaluationsergebnisse

Nach ausführlicher Untersuchung der im Forschungsprojekt entwickelten intuitiven Laststeuerung durch Probandenstudien lässt sich festhalten, dass diese ein enormes Potential aufzeigt, das in der abschließenden Evaluation zum Teil bestätigt werden konnte. Während bereits in der Vorstudie (vgl. Abschnitt 4.2.2) signifikante Verbesserungen der Nutzer hinsichtlich Korrektheit der Eingabe, Steuerungszeit und subjektiver Gebrauchstauglichkeit aufgezeigt werden können, sind die Resultate der finalen Evaluation differenzierter. Bezüglich der Ablagegenauigkeit bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Nutzergruppen oder Steuerungssystemen, eine Analyse der Fehlbedienungen zeigt jedoch, dass Novizen mit der kontinuierlichen intuitiven Laststeuerung signifikant weniger Fehler machen. Aufgrund der Vorerfahrung erwartbar zeigt sich ebenfalls, dass Experten mit steigendem Unterstützungsgrad längere Zeit zur Bedienung benötigen, wobei dieser Effekt bei der Gruppe der Novizen gegenläufig ist. Die subjektive Bewertung der Gebrauchstauglichkeit ist deckungsgleich mit dem bereits in der Vorstudie gefundenen Resultat: Nutzer bewerten die beiden intuitiven Laststeuerungskonzepte signifikant besser als das konventionelle Steuerungskonzept.

Zusammenfassen lässt sich sagen, dass Novizen mit der kontinuierlichen intuitiven Laststeuerung in allen Belangen verglichen mit der konventionellen Steuerung mindestens genauso gut abschneiden, in den meisten Fällen jedoch besser. Experten hingegen haben aufgrund ihrer langjährigen Vorerfahrung mitunter Anfangsschwierigkeiten mit den neuen

intuitiven Konzepten. Unter Berücksichtigung der beobachteten Lerneffekte jedoch (vgl. Abschnitt 6.2.6) ist zu erwarten, dass diese Nutzer sich schnell an die neuartigen Systeme gewöhnen.

Die bisher beobachteten Ergebnisse sind jedoch vor allem aufgrund zweier Faktoren mit Vorsicht zu interpretieren:

1. **Stichprobenszusammensetzung**

Es gab große Unterschiede bei den Erfahrungswerten der Experten mit Kransteuerungen. So ordneten sich lediglich sechs Probanden in ihrer Selbsteinschätzung dem höchsten Erfahrungswert zu. Die Gruppe derjenigen Experten, die selbst den Erfahrungswert eins, also den niedrigstmöglichen angaben, war mit sechs Probanden ebenso groß. Es sind Versuchsteilnehmer vertreten, die ihre Erfahrung in Kransteuerung anhand eines Brückenkrans, Hängekrans oder Säulenkrans gesammelt haben. In der Bedienung eines Ladekrans haben sie allerdings wenig bis keine Erfahrung. Sie zählen als Experten, weil es ihnen mit ihrem gültigen Kranführerschein erlaubt ist, einen Ladekran zu steuern. Bei einem klarer differenzierbaren Probandenkollektiv sind u. U. extremere Ergebnisse hinsichtlich der Bedienzeiten und der Fehler zu erwarten.

2. **Aufgabenschwierigkeit**

Die Unterschiede zwischen den Steuerungssystemen, vor allem hinsichtlich der Bedienzeit, zeigen sich nicht in der erwarteten Deutlichkeit. Dies führen die Autoren in erster Linie darauf zurück, dass die geringe Aufgabenschwierigkeit gepaart mit der langen Eingewöhnungsphase, zu einer insgesamt geringen kognitiven Belastung führte. Deshalb zeigen sich die Unterschiede zwischen den Steuerungen bezüglich des Umrechnungsaufwands nicht in dem Maße, in dem sie der Theorie nach vorhanden sein müssten. Durch die relativ entspannte Situation bzw. klare Begrenzung der zu erfüllenden Aufgaben ergab sich ebenso ein geringes Stresslevel für die Probanden. In Summe könnten diese Faktoren dazu geführt haben, dass die kognitiven Kapazitäten innerhalb des Versuches nicht ausgeschöpft waren, sodass den Probanden genügend Ressourcen blieben, um die Umrechnung der gewünschten Bewegung zwischen eigener und Kranperspektive für die recht simpel gehaltenen Steuerungsaufgaben problemlos durchzuführen.

Grundsätzlich zeigt sich jedoch, dass die beiden intuitiven Laststeuerungen ausgesprochen schnell von Novizen wie von Experten verstanden werden und sich insofern das mentale Modell der Nutzer an beide Systeme anpasst. Dies wird auch in einer abschließend gestellten Frage zur Präferenz deutlich „*Mit welchem Modus würden Sie eine weitere Aufgabe ausführen?*“, bei der sich keine Unterschiede zwischen den beiden Nutzergruppen zeigen

und mit $N_{\text{konv}} = 7$, $N_{\text{disc}} = 19$, $N_{\text{kont}} = 30$ das kontinuierliche Konzept klar die favorisierte Variante darstellte.

7.3.4. Ironies of Automation

Die sog. Ironies of Automation beschreiben den Effekt, dass aus der Automatisierung von Prozessen oder -abschnitten zwar eine Entlastung des Benutzers resultiert, diese aber im Gegenzug dazu führt, dass der Benutzer insgesamt weniger routiniert wird und somit neue Probleme auftreten, zum Beispiel weil der Benutzer bestimmte Prozessteile, die in Notsituationen von ihm durchgeführt werden müssen, nicht mehr sicher beherrscht. Der Begriff wurde erstmals im Jahr 1983 von Bainbridge geprägt [Bai-1983]. Auch im Kontext der intuitiven Laststeuerung ist dieses Phänomen zu diskutieren.

Der Benutzer wird durch die intuitive Laststeuerung in seinen Steuerungs- und Regelungsaufgaben wesentlich entlastet. Auf der einen Seite führt dies dazu, dass der Benutzer insgesamt unerfahrener in einer rein manuellen (d. h. freiheitsgradbasierten) Steuerung wird. Vor allem bei selten auftretenden Sonderfällen in der Kranbedienung, wenn die manuelle Freiheitsgradsteuerung die einzig sinnvolle Steuerungsmöglichkeit ist¹, ist es jedoch von entscheidender Bedeutung, dass der Benutzer so routiniert in der Anwendung der manuellen Steuerung ist, dass er den Kran fehlerfrei bedienen kann. Somit führt eine generelle Entlastung des Benutzers zu einer Verschlechterung der Routine in genau den Situationen, in denen es auf die Routine ankommt. Ein Ansatz 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 Benutzer durch die intuitive Laststeuerung 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

¹ Ein 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 Benutzer 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.

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 Kransteuerungen 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.

7.3.5. Umgebungsüberwachung

Die Verwendung einer inversen Kinematik für die intuitive Laststeuerung führt dazu, dass der Kranbediener nicht mehr unmittelbar Einfluss auf die Bewegung des Kranauslegers hat, da die Auslegerbewegung als Summe 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 Benutzer bei Verwendung der intuitiven Laststeuerung nicht mehr auf den Kran, sondern auf die Last fokussiert ist und er somit gegebenenfalls weniger auf Auslegerbewegungen achtet. Deshalb wäre es wünschenswert, zusätzlich zur intuitiven Laststeuerung 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 intuitiven Laststeuerung noch besser erschließen zu können, und die Sicherheit für Mensch und Maschine weiter zu verbessern.

7.4. Übertragbarkeit des Konzepts

Grundsätzlich bietet die intuitive Laststeuerung einen Ansatz, alle Maschinen und Geräte, die entweder einen Haken oder eine Auslegerspitze besitzen, zu steuern. In allen Anwendungsfällen, wo der Haken bzw. die Auslegerspitze den für die Arbeitsaufgabe maßgeblich zu steuernden Punkt darstellt, ist eine sinnvolle Verwendung der intuitiven Laststeuerung denkbar. Die intuitive Laststeuerung bietet somit bei allen Krantypen, aber auch über die Anwendung an Kranen aller Art hinaus, ein erhebliches Anwendungspotenzial.

7.4.1. Übertragbarkeit auf andere Krantypen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die intuitive Laststeuerung demonstratorisch an einem LKW-Ladekran implementiert und evaluiert. Die Auswahl des Krantyps (siehe Kapitel 5.2) war dabei primär von äußeren Randbedingungen an den beteiligten Forschungsstellen abhängig. Alle Krantypen, die in Kapitel 2.2 genannt werden (u. a. basierend auf der Einteilung nach [Deu-1973] und [Deu-1975]), besitzen einen Haken zur Lastmanipulation mit dem Zweck, eine Last zu heben, senken oder in einer oder mehreren waagrechten Richtungen zu bewegen. Die intuitive Laststeuerung ermöglicht genau diese Funktionalität, bei gleichzeitig erheblich veränderter Benutzerschnittstelle. Aus diesem Grund lässt sich die intuitive Laststeuerung grundsätzlich auf alle anderen Krantypen übertragen, unabhängig von der Bauart oder dem Anwendungsfall. Besonders hohes Potenzial bietet die intuitive Laststeuerung bei der Funkbedienung durch einen Bediener, der sich im Umfeld der Hebeaufgabe viel bewegt.

7.4.2. Übertragbarkeit auf andere Maschinentypen

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 Freiheitsgrade. Die vom Benutzer während der Bedienung geforderte Umrechnung der gewünschten Endschlauchbewegung auf die einzelnen Gelenkbewegungen ist somit noch komplexer als es bei Kranen der Fall ist. Zusätzlich muss der Bediener seine eigene Position zum Gerät bei der Umrechnung berücksichtigen, um die richtigen Bewegungsrichtungen der Gelenke zu identifizieren.

Die intuitive Laststeuerung hingegen ermöglicht einem Bediener das Abfahren gerader Linien ohne weitere Umrechnung, unabhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade. Daher ist

davon auszugehen, dass die positiven Effekte der intuitiven Laststeuerung bei der Anwendung an Autobetonpumpen ähnlich stark oder sogar stärker zu Tage treten wie es bei Kranen der Fall ist.

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 Freiheitsgrade 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 Bediener Sicht 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 intuitive Laststeuerung 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 Freiheitsgrade sowie den möglichen Benutzerperspektiven lassen sich - ohne Anspruch auf Vollständigkeit - weitere mögliche Anwendungsfälle für die intuitive Laststeuerung identifizieren:

- Kranähnliche Forstgeräte (Rückezüge, Harvester)
- Roboterarme (z. B. im Kernkraftbereich oder der Raumfahrt)
- Schwerlast-Manipulatoren (z. B. in Gießereien oder Montagehallen)

8. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

In diesem Kapitel werden die erzielten Forschungsergebnisse noch einmal zusammengefasst und ein Ausblick auf die in Zukunft möglichen Forschungsarbeiten gegeben.

8.1. Zusammenfassung

Krane sind unverzichtbare Hilfsmittel in zahlreichen industriellen Bereichen, und kommen abhängig vom Anwendungsbereich in unterschiedlichen Bauformen vor. Sie werden überall dort eingesetzt, wo schwere oder sperrige Lasten bewegt werden müssen, die manuell nicht oder nur schwer zu handhaben sind, oder in Fällen, in denen Zugänglichkeit der Last eine manuelle Handhabung unmöglich macht. Bis auf wenige Spezialanwendungen werden alle Krane – unabhängig von ihrem Anwendungsbereich – immer von einem menschlichen Bediener („Kranführer“) kontrolliert, der im Wesentlichen zwei Kernaufgaben hat. Erstens ist er dafür verantwortlich, zu jedem Zeitpunkt den Kran, die Last sowie die Umgebung zu überwachen und durch entsprechende Umsicht und geeignete Vorsichtsmaßnahmen sicherzustellen, dass gefährliche Situationen und Beschädigungen aller Art vermieden werden. Zweitens ist es Aufgabe des Kranführers, die Kranantriebe anzusteuern und somit den Bewegungsverlauf der Last vorzugeben. Das Bewegen der Last erfolgt üblicherweise durch das direkte Ansteuern einzelner Antriebe wie Drehwerke, Fahrwerke und Hydraulikzylinder über Stellhebel oder Druckknöpfe. Die Gesamtbewegung der Last ergibt sich folglich als Summe der Bewegungen der Einzelantriebe. Viele Krane besitzen hierzu eine Funksteuerung, die dem Bediener erlaubt, sich relativ zum Kran frei zu bewegen. Der Bediener kann dem Lastpunkt so zu jeder Zeit folgen und seine Position individuell den äußeren Gegebenheiten anpassen. Bedingt durch die Vielzahl von Vorteilen können inzwischen nahezu alle Krane zumindest optional mit Funksteuerungen ausgestattet werden. Dies hat in den vergangenen Jahren zu einem stetig steigenden Marktanteil und damit einhergehend zu einer Heterogenisierung des Bedienerkollektivs geführt. Der Einsatz einer Funksteuerung bei teleoperierten Kranen bleibt somit nicht mehr nur Experten vorbehalten, sondern wird auch für Gelegenheitsbediener möglich.

Neben seinen Sicherheits- und Überwachungsaufgaben ist die Hauptaufgabe des Bedieners die korrekte Ansteuerung der einzelnen translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade des Krans, sodass sich die gewünschte Lastbewegung als Summe der Einzelbewegungen ergibt. Die Bestimmung der erforderlichen Betätigungsrichtung der Bedienelemente erfordert vom Bediener eine gedankliche Umrechnung der Wunsch-Lastbewegung auf

die einzelnen Freiheitsgrade des Systems, wobei sowohl die Charakteristik des Freiheitsgrads (zugelassene Bewegungen und Geschwindigkeiten) als auch die Bewegungsrichtung korrekt beurteilt werden müssen. Da die Stellteile der Steuerung an das Krankoordinatensystem gekoppelt sind, muss der Benutzer neben der aktuellen Stellung des Krans und der Gerätekinematik bei der Verwendung einer Funksteuerung zusätzlich seine eigene Ausrichtung relativ zum Gerät berücksichtigen, sobald er sich relativ zum Krankoordinatensystem verdreht. Insbesondere bei der häufig stattfindenden gleichzeitigen Bewegung mehrerer Freiheitsgrade erschwert die damit verbundene kognitive Mehrfachbelastung die Manipulation der Last und ist für den Bediener nicht-intuitiv. Ergonomisch gesehen treten die angesprochenen Bedienprobleme vor allem deshalb auf, da das Nutzer- und das Maschinenkoordinatensystem nicht übereinstimmen (Verletzung des sog. Kompatibilitäts-Postulats von Bubb [Sch-1993, S. 416ff]). Die Folge ist eine Erhöhung des Umrechnungsaufwands auf Bedienerseite, der sich in verlängerten Eingabezeiten und erhöhter Fehlerzahl widerspiegelt. Die Umrechnung ist für jede Lastbewegung und Benutzerposition erneut auszuführen. Ein Gewöhnungseffekt stellt sich aus diesem Grund oft nur sehr langsam und nur bei sehr regelmäßiger Bedienung des Krans ein.

Um den nötigen inneren Umrechnungsaufwand auf Bedienerseite zu reduzieren und gleichzeitig die Qualität und Sicherheit der Bedienung zu erhöhen, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts *Entwicklung eines intuitiven Steuerungskonzepts für Lasthebemaschinen* ein innovatives, zielorientiertes Laststeuerungskonzept für Hebemaschinen mit Hilfe einer Funksteuerung entwickelt. Das neue Steuerungskonzept stellt das Krankoordinatensystem in Relation zum Bedienhandgerät bzw. der Orientierung des Menschen, sodass die Kompatibilität der Koordinatensysteme von Nutzer und Maschine gewährleistet ist. Die Vorteile der Funkbedienung werden beibehalten und das Kompatibilitätsproblem wird gelöst.

Die Leitfrage, die im Rahmen des Forschungsprojekts beantwortet wurde, lautet:

Wie sieht eine Mensch-Maschine-Schnittstelle für funkbediente Lasthebemittel aus, die sowohl die steuerungstechnischen als auch die ergonomischen Anforderungen an eine intuitive, zielorientierte Steuerung erfüllt?

Die Antwort auf die Leitfrage lässt sich im entwickelten Konzept der intuitiven Laststeuerung zusammenfassen.

Die intuitive Laststeuerung ist ein Steuerungskonzept, bei dem der Bediener durch die Betätigung eines Bedienelements die gewünschte Bewegungsrichtung der Last aus seiner Perspektive direkt vorgibt und somit die Positionen von Last, Maschine und Bediener automatisch berücksichtigt (siehe Abbildung 8-1).

So gibt der Bediener durch die Betätigung eines Bedienelements ① die gewünschte Bewegungsrichtung der Last aus seiner Perspektive vor. Er bewegt den Stellhebel nur von

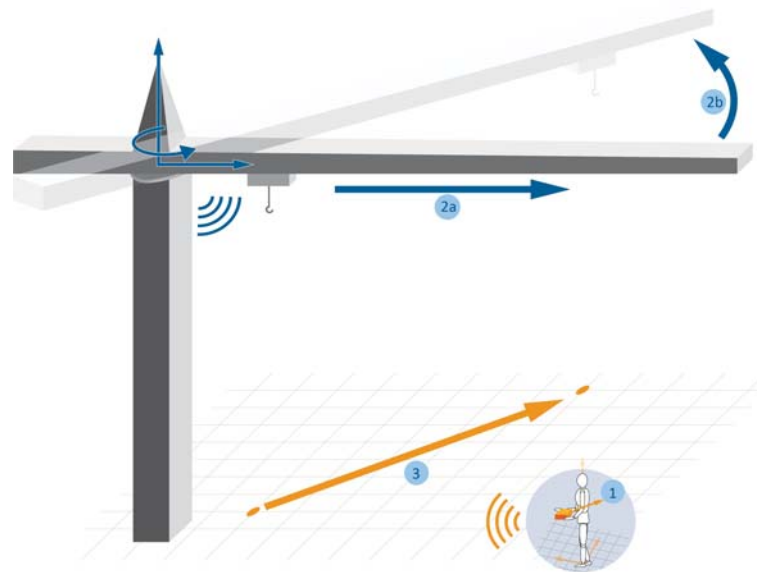


Abbildung 8-1: Intuitive Laststeuerung am Beispiel eines Turmdrehkrans

der aktuellen Last- in Richtung der Zielposition. Das System ermittelt durch die integrierte Sensorik die Ausrichtung des Nutzers relativ zur Last sowie die aktuelle Stellung des teleoperierten Krans und steuert dessen Antriebe ② durch Verwendung einer Rückwärtskinematik so an, dass die Bewegungsrichtung der Last ③ parallel zu der tatsächlich vom Bediener vorgegebenen Auslenkung des Bedienelements ① ist. Die Bewegung eines Stellhebels in Richtung der gewünschten Zielposition führt somit zu einer Lastbewegung in die vorgegebene Richtung bei gleichzeitiger Wirkung mehrerer Antriebe.

Zur systematischen Beantwortung der Leitfrage und der daraus abgeleiteten Forschungsfragen wurde zunächst der Forschungsbedarf abgeleitet. Hierfür wurden aktuelle Steuerungskonzepte analysiert und die Defizite aufgezeigt. Es existieren zwar vielfältige Ansätze, mit Hilfe von Auslegerspitzensteuerungen und innovativen Eingabeparadigmen die aktuelle Steuerungssituation zu verbessern. Allerdings erfordern alle bisher vorhandenen Lösungen entweder zusätzliche Infrastruktur im Bedienumfeld, eine ständige Zugänglichkeit der Last oder eine feste Bedienerposition, zum Beispiel in der Kabine. Eine industrietaugliche Teleoperation der entsprechenden Krane und damit eine Verbindung der direkten, zielorientierten Vorgabe der gewünschten Bewegungsrichtung aus dem Blickwinkel des Benutzers, verbunden mit den zahlreichen Vorteilen einer Funksteuerung, findet bisher bei keinem der Konzepte statt. Insbesondere das Problem der robusten Ortung der Bedienerausrichtung ist nicht zufriedenstellend gelöst, ohne auf umfassende räumliche Infrastruktur angewiesen zu sein. Aus diesen Gründen eignen sich alle bisherigen Ansätze nicht für einen flächendeckenden, flexiblen Einsatz an allen Arten von funkgesteuerten Lasthebemitteln.

Aus dem identifizierten Forschungsbedarf ergibt sich eine Forschungslücke, die durch die intuitive Laststeuerung geschlossen werden soll: Es wird deutlich, dass bisher keine intuiti-

tive, funkbasierte Eingabemöglichkeit in Kombination mit einer Auslegerspitzensteuerung existiert, die sich generell bei allen Arten von industriellen Lasthebemitteln, unabhängig von Einsatzzweck und -ort, robust und effizient einsetzen lässt (steuerungstechnische Anforderungen), und die gleichzeitig die ergonomischen Nachteile bisheriger Freiheitsgrad-Steuerungen hinsichtlich Kompatibilität, Gebrauchstauglichkeit und Intuitivität behebt (ergonomische Anforderungen).

Im Rahmen der ergonomischen Auslegung der intuitiven Laststeuerung wurde mit Hilfe einer systemergonomischen Analyse sowie der systematischen Generierung von Bedienkonzeptvarianten die Benutzereingabe mit Hilfe von Joysticks als vielversprechendste Lösung für die Umsetzung der intuitiven Laststeuerung identifiziert. Das Potenzial der intuitiven Laststeuerung mit Hilfe einer Joysticksteuerung wurde anschließend in einer Online-Fragebogenstudie erfolgreich evaluiert. Die direkte Vorgabe der Hakenbewegung mit Hilfe einer Joystickeingabe zeigt sich dabei der herkömmlichen Ansteuerung einzelner Freiheitsgrade in Effizienz, Effektivität und Zufriedenstellung überlegen. Die anschließend durchgeführten Untersuchungen zur Position, Ausrichtung und Veränderlichkeit des Nutzer-Referenz-Koordinatensystems haben gezeigt, dass die Benutzerperspektive insgesamt mit der Funksteuerungsperspektive überlagert gesetzt werden kann: Dem Benutzer ist zuzumuten, den Bewegungswunsch der Last aus seiner Perspektive in Form einer Joystickauslenkung an der Funksteuerung vorzugeben.

Im Anschluss wurde die intuitive Laststeuerung technisch umgesetzt und an einem stationären Ladekran am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München in Garching appliziert. Hierfür wurde zunächst ein geeignetes Eingabegerät (Funksteuerung) nach ergonomischen Vorgaben konfiguriert. Anschließend wurden die notwendigen Sensorikkonzepte zur Messung der Bedienerorientierung und der Hakenposition entwickelt, um den Eingabewunsch des Benutzers an der Funksteuerung auf die dafür notwendige Bewegungsrichtung am Kranhaken umrechnen zu können. Die Messung der Benutzerorientierung erfolgt mit Hilfe von MEMS-Inertialsensoren, ausgehend von einer bekannten Referenzposition. Mit Hilfe der MEMS-Sensoren werden rotatorische und translatorische Beschleunigungen gemessen, fusioniert und zum Orientierungswinkel integriert. Die Messung der aktuellen Hakenposition erfolgt über Dreh- und Seilzuggeber an den Krangelenken. Beide Sensorik-Konzepte wurden erfolgreich evaluiert. Ferner wurde eine inverse Kinematik aus dem Bereich der Robotik ausgewählt und für den Einsatz am Kran modifiziert, um von der gewünschten Hakenbewegungen auf die notwendigen Gelenkbewegungen umrechnen zu können. Ein passendes Regelungskonzept sichert die exakte Ansteuerung der Gelenkbewegungen unabhängig von äußeren Störungen. Die inverse Kinematik sowie das Regelungskonzept wurden sowohl simulativ als auch am realen Demonstratorkran evaluiert. Die Integration aller Mess-, Auswerte und Steuerungskonzepte in ein passendes Maschinensteuergerät ermöglicht schließlich die praktische Umsetzung der

intuitiven Laststeuerung am Ladekran. Der Funktionsnachweis wurde erfolgreich erbracht: Die Hakenbewegung erfolgt zu jedem Zeitpunkt parallel zur Joystickbewegung, unabhängig von Position und Orientierung des Bedieners.

Die anschließend durchgeführte ergonomische Evaluation der intuitiven Laststeuerung belegt die Gebrauchstauglichkeit des neuen Steuerungskonzepts. Hierfür wurde eine Probandenstudie mit 58 Probanden durchgeführt, in der die herkömmliche Freiheitsgrad-Steuerung mit der intuitiven Laststeuerung verglichen wurde. Vor allem für Novizen bietet die intuitive Laststeuerung entscheidende Vorteile in der Ablagegenauigkeit, Fehlerzahl und Bedienzeit. In der subjektiven Einschätzung ist sie sowohl für Novizen als auch Experten dem konventionellen Konzept überlegen und wird mit 49:7 für weitere Hebevorgänge gewählt.

Mit der intuitiven Laststeuerung steht somit ein lernförderndes, industrietaugliches Steuerungskonzept für funkgesteuerte Krane zur Verfügung, das von unterschiedlichen Bedienern – unabhängig von der Vorerfahrung – zur sicheren Steuerung eines Krans verwendet werden kann. Neben der Berücksichtigung grundsätzlicher ergonomischer Prinzipien bei der Gestaltung des Steuerungskonzepts (Kompatibilität, Gebrauchstauglichkeit etc.) wurde hierbei eine Vielzahl von technischen Gesichtspunkten zu berücksichtigen, um eine sichere, effiziente und zufriedenstellende Bedienung des Hebemittels zu gewährleisten. Zudem wurde gezeigt, dass eine neuartige Mensch-Maschine-Schnittstelle für funkbediente Krane die Manipulation von Lasten erheblich vereinfachen und damit Logistikprozesse nachhaltig verbessern kann. Ferner wurde durch die Berücksichtigung aller relevanten ergonomischen Grundsätze bei der Konzeptionierung der intuitiven Laststeuerung dafür gesorgt, dass ein Funksteuerungskonzept entsteht, das von möglichst großen Teilen des Bedienerkollektivs als „intuitiv“ empfunden wird.

Durch die intuitive Laststeuerung wird ein Paradigmenwechsel in der Kransteuerung ermöglicht: Statt - wie bisher - den Kran zu steuern, steuert der Bediener nun direkt die Last.

8.2. Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Von den Ergebnissen des Forschungsprojekts profitieren Anwender, Betreiber und Hersteller von Kranen bzw. Kransteuerungen.

Dies gilt bedienerseitig sowohl für Experten (Vollzeit-Kranfahrer) als auch Gelegenheitsnutzer (z. B. Montagemitarbeiter mit Hallenkranzugriff). Speziell geschultes Personal zum Lasthandling steht in der Regel nur in Großbetrieben zur Verfügung. KMUs müssen stattdessen oft auf „vielseitige Alleskönner“ zurückgreifen. Gerade bei KMUs sind daher durch

den nicht alltäglichen Einsatz auch ungeübte Bediener anzutreffen. Experten- und Gelegenheitsbediener erwarten durch die intuitive Steuerung eine erhebliche Verringerung der kognitiven Belastung, folglich eine geringere Ermüdung im Arbeitsalltag und eine verbesserte Gebrauchstauglichkeit.

Die Kranbetreiber profitieren vom neuen Steuerungskonzept aufgrund der erhöhten Intuitivität und dem damit verbundenen deutlichen 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, 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 und damit ein wirtschaftlicher Vorteil zu erkennen, was sich ebenfalls positiv auswirkt. Die intuitive Laststeuerung hat somit das Potenzial, sich direkt auf die Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Unternehmen auszuwirken.

Kran- und Komponentenhersteller profitieren sowohl durch mögliche Marktvorteile, die sich aus der Implementierung des innovativen und intuitiven Bedienkonzepts ergeben, als auch durch ein erweitertes Benutzerkollektiv, da Kranbedienung mit Hilfe der intuitiven Laststeuerung auch für Novizen schnell und leicht zu erlernen ist. Ferner unterstützen die Forschungsergebnisse KMU-Steuerungsanbieter direkt bei ihren eigenen Entwicklungen. Gerade unter den Anbietern von Steuerungstechnik sind zahlreiche KMUs auf dem Markt anzutreffen, denen die vorwettbewerbliche Grundlagenunterstützung durch das Forschungsprojekt ein neues Geschäftsfeld erschließt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Entwicklung einer intuitiven, zielorientierten Laststeuerung sowohl anwender- als auch anbieterseitig das Potential für einen großen branchenübergreifenden Nutzerkreis insbesondere im Umfeld von KMUs besitzt.

Die Anwendungsmöglichkeiten der intuitiven Laststeuerung sind vielfältig. Die intuitive Laststeuerung eignet sich für den Einsatz an allen Krantypen, unabhängig vom Systemaufbau und der Anzahl der Freiheitsgrade, sowie bei allen Anwendungsfällen. Zusätzlich ist das Konzept auf kranähnliche Maschinen wie Autobetonpumpen, Arbeitsbühnen, Forstgeräte, Roboterarme und andere Manipulatoren übertragbar. Die intuitive Laststeuerung besitzt damit ein Anwendungspotenzial über verschiedenste Branchen hinweg.

8.3. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19573 N („Intuitives Laststeuerungskonzept“) der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL), Schlachte 31, 28195 Bremen, wurde über die

AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung und Unterstützung sei gedankt.

8.4. Ausblick

Die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ergebnisse können bereits in der Praxis eingesetzt werden. Im Verlauf der Implementierung und Evaluierung der intuitiven Laststeuerung wurde weiteres Forschungs- und Entwicklungspotenzial identifiziert, das sich als Anknüpfungspunkt für Forschungsstellen und interessierte Unternehmen anbietet. Insbesondere für eine Weiterentwicklung von dem im Rahmen dieses Berichts erbrachten *proof of concept* zu einem industrietauglichen Produkt wird die Bearbeitung folgender Schritte empfohlen:

- Verwendung von MEMS-Sensorik zur Messung der Benutzerausrichtung, die über einen weiten Temperaturbereich und bei beliebig starken äußeren Magnetfeldern funktioniert. Hierfür sollte beispielsweise auf Sensorik zurückgegriffen werden, die bereits in mobilen Arbeitsmaschinen oder anderen fordernden Einsatzumgebung (z. B. Luftfahrt) eingesetzt wird.
- Verwendung von sicherheitszertifizierter MEMS-Sensorik zur Messung der Benutzerausrichtung, um eine Zertifizierung des Gesamtsystems und die Angabe eines Performance Levels zu ermöglichen.
- Berücksichtigung aller Normen, die den Bereich der Kran-Funksteuerungen berühren (siehe A ab Seite A-1). Für Normen, die nicht im Wortlaut berücksichtigt werden können, weil es sich bei der intuitiven Laststeuerung um ein innovatives Bedienkonzept mit revolutionärem Eingabeparadigma handelt, ist der Grund der Abweichung nachvollziehbar zu dokumentieren. Gleichzeitig müssen Argumente nachvollziehbar dargestellt werden, warum die intuitive Laststeuerung den aktuell in der Normung abgebildeten Stand der Technik verbessert und somit eine zulässige Lösung über die Norm hinaus darstellt. Sicherheitsbedenken sind dabei besonders zu adressieren.

Die intuitive Laststeuerung zeigt das erhebliche Potenzial von innovativen Mensch-Maschine-Schnittstellen für funkbediente Krane. Insbesondere die Umsetzung einer Auslegerspitzensteuerung für einen bewegten Bediener zeigt sich als außerordentlich vielversprechendes Konzept. Die direkte Vorgabe der Hakenbewegung durch den Bediener sollte folglich weiter im Fokus von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben stehen.

Folgende Schwerpunkte werden für die weitere Forschungstätigkeiten empfohlen:

- Identifikation von weiteren sinnvollen Eingabeparadigmen
Über die intuitive Laststeuerung hinaus, bei der die Eingabe des Benutzerwunsches mit einer Joystick-Funksteuerung durchgeführt wird, existieren etliche weitere Eingabeparadigmen. Es sollte untersucht werden, welche Eingabeparadigmen sich optimal für die intuitive (d. h. besonders lernförderliche) Vorgabe der Hakenbewegung eignen. Denkbar wäre beispielsweise, die Wunschbewegung über eine Wischbewegung auf einem touchfähigen Eingabegerät (Tablet, Smartphone) vorzugeben. Hier werden weitere Vorteile hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit vermutet, da es sich um ein von den allermeisten Benutzern bereits im Alltag verwendetes Eingabemedium handelt.
- Ironies of Automation
Die sog. Ironies of Automation beschreiben den Effekt, dass aus der Automatisierung von Prozessen oder -abschnitten zwar eine Entlastung des Benutzers resultiert, diese aber im Gegenzug dazu führt, dass der Benutzer insgesamt weniger routiniert wird und somit neue Probleme auftreten, zum Beispiel weil der Benutzer bestimmte Prozessteile, die in Notsituationen von ihm durchgeführt werden müssen, nicht mehr sicher beherrscht. In Einzelfällen kann somit die Automatisierung eines Prozessteils weiteren Automatisierungsbedarf nach sich ziehen. Im Kontext der intuitiven Laststeuerung ist insbesondere zu untersuchen, ob die Entlastung des Bedieners in seinen Steuerungs- und Regelungsaufgaben dazu führt, dass er weniger routiniert in der Feinbedienung der Gelenke wird, was zu potenziellen Schäden in besonderen Bediensituationen führen kann. Ferner muss betrachtet werden, ob die Entlastung des Benutzers dazu führt, dass er zusätzlich seinen Überwachungsaufgaben schlechter nachkommt, zum Beispiel weil er insgesamt unkonzentrierter ist.
- Kollisionserkennung und -vermeidung
Die Verwendung einer inversen Kinematik für die intuitive Laststeuerung führt dazu, dass der Kranbediener nicht mehr unmittelbar Einfluss auf die Bewegung des Kranauslegers hat, da die Auslegerbewegung als Summe 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 Benutzer bei Verwendung der intuitiven Laststeuerung nicht mehr auf den Kran, sondern auf die Last fokussiert ist, und er somit gegebenenfalls weniger auf Auslegerbewegungen achtet. Deshalb wäre es wünschenswert, zusätzlich zur intuitiven Laststeuerung 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 intuitiven Laststeuerung noch besser erschließen zu können, und die Sicherheit für Mensch und Maschine weiter zu verbessern.

Der Demonstrator der intuitiven Laststeuerung kann über das Ende des Forschungsprojekts hinaus von allen interessierten Personen besichtigt und getestet werden. Rückmeldungen von Herstellern, Betreibern und Anwendern sind ausdrücklich gewünscht. Im Rahmen weiterer Forschungstätigkeiten erfolgt eine kontinuierliche Erweiterung um weitere Steuerungskonzepte mit anderen Eingabeparadigmen. Die Konzeptionierung, Validierung und Evaluierung von intuitiven Steuerungskonzepten für funkbediente Lasthebemittel bleibt damit ein spannendes Forschungsfeld in Wissenschaft und Industrie.

Die weitergehende Forschung soll im Rahmen eines Dissertationsvorhabens stattfinden.

Verzeichnis der Veröffentlichungen

Poster: Intuitive Laststeuerung

Posterpräsentation im Rahmen des 47. Großseminars des Verbands der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik (VDBUM) e. V., 20.-23.02.18, 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 Schmidtler, Johannes Fottner

Tagungsband zur 7. Fachtagung Baumaschinentechnik: Digitalisierung - Automatisierung - Mensch, 20.-21. September 2018, Dresden [Top-2018c]

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-2019b]

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-2019a]

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]

Preise

- VDBUM-Förderpreis 2019
2. Platz (Kategorie: Projekte aus Hochschulen und Universitäten) aus > 30 Einreichungen

- Bauma Innovationspreis 2019
Finalist (Kategorie: Forschung / Wissenschaft) aus insgesamt 138 Einreichungen, davon
47 Finalisten

Verzeichnis der studentischen 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]

Sämtliche Studienarbeiten können bei den Autoren in vollem Umfang eingesehen werden¹.

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
- Jakob Peintner
- Despoina Salpisti
- Tobias Tetzner
- Alexander Schock-Schmidtke

An dieser Stelle möchten die Autoren allen Studierenden, die im Rahmen des Projekts Studienarbeiten oder hilfswissenschaftliche Tätigkeiten ausgeführt haben, herzlich für ihre Arbeit und ihren Einsatz danken.

¹ Kontakt: Felix Top (felix.top@tum.de) oder Lorenz Prasch (lorenz.prasch@tum.de)

Literaturverzeichnis

- [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. DOI: 10.1177/1077546303009007007.
- [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.
- [Bai-1983] Bainbridge, L.: Ironies of Automation. In: Automatica 19.6, (1983), S. 775–779.
- [Bak-2011] Bak, M. K.; Hansen, M. R.; Karimi, H. R.: Robust Tool Point Control for Offshore Knuckle Boom Crane. In: Proceedings of the 18th IFAC World Congress (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. DOI: 10.1080/10447310802205776.
- [Bau-2018] Baumgartner, A.: Analyse und Bewertung verschiedener Ansätze zur Lastpendeldämpfung an Kranen. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Ber-2003] Bernstein, J.: An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology. 2003. URL: <https://www.sensormag.com/components/overview-mems-inertial-sensing-technology> (besucht am 30.08.2019).
- [Ber-2014] Bernstein, H.: Messelektronik und Sensoren: Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung. Lehrbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden: 2014.
- [Bia-2008] Biagiotti, L.; Melchiorri, C.: Trajectory planning for automatic machines and robots. Springer, Berlin u.a.: 2008.
- [Bre-2017] Brecher, C.; Obdenbusch, M.; Sittig, S.: Gestaltung und Entwicklung anwendernaher Bediensysteme. Hrsg. von Eaton Industries GmbH. Bonn, 2017.
- [Bro-1996] Brooke, J.: SUS: a quick and dirty usability scale. In: Usability evaluation in industry. Hrsg. von Jordan, P. W.; Thomas, B.; McClelland, I. L. Taylor & Francis, London u.a.: 1996, S. 4–7.
- [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 Kraftbetriebe-
ne 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 3: Elektrische Anlagen
und Betriebsmittel. 1997.
- [Bun-1997b] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV Vorschrift 54: Winden, Hub- und
Zuggeräte. 1997.
- [Bun-2008] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV Regel 100-500: Betreiben von Ar-
beitsmitteln. 2008.
- [Bun-2013a] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV Vorschrift 1: Grundsätze der Prä-
vention Grundsätze der Prävention. 2013.
- [Bun-2013b] Bundesverband der Unfallkassen: DGUV Vorschrift 52: Krane. 2013.
- [Cam-2016] Campeau-Lecours, A.; Foucault, S.; Laliberté, T.; Mayer-St-Onge, B.; Gos-
selin, B.: A cable-suspended intelligent crane assist device for the intuitive
manipulation of large payloads. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatro-
nics 21.4, (2016), S. 2073–2084. DOI: 10.1109/TMECH.2016.2531626.
- [Cha-1995] Chan, T.; Dubey, R.: A weighted least-norm solution based scheme for avoi-
ding 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 In-
formation Technology 9.4, (2016), S. 235–254.
- [Col-2003] Colgate, J. E.; Peshkin, M.; Klostermeyer, S.: Intelligent assist devices in
industrial applications: a review. In: International Conference on Intelligent
Robots and Systems. Hrsg. von IEEE Institute of Electrical and Electronics
Engineers. 2003.
- [Dem-2019] Demag: E-Balancer. 2019. URL: <https://www.demagcranes.de/produkte/hebezeuge/kompakthebezeuge/e-balancer> (besucht am
17.09.2019).
- [Deu-1973] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Begriffe, Einteilung nach der
Bauart. Berlin, 1973.
- [Deu-1975] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Begriffe, Einteilung nach der
Verwendung. Berlin, 1975.

- [Deu-1978] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane: Betätigungssinn und Anordnung von Stellteilen in Krankabinnen. Berlin, 1978.
- [Deu-2000] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 2: Gestaltungsgrundsätze. Berlin, 2000.
- [Deu-2006] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung. Berlin, 2006.
- [Deu-2008] Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, 2008.
- [Deu-2009a] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Stellteile und Steuerstände. Berlin, 2009.
- [Deu-2009b] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 32: Anforderungen für Hebezeuge. Berlin, 2009.
- [Deu-2009c] 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.
- [Deu-2009d] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze. Berlin, 2009.
- [Deu-2010a] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Sicherheit - Turmdrehkrane. Berlin, 2010.
- [Deu-2010b] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 3: Stellteile. Berlin, 2010.
- [Deu-2011a] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-Maschine-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. Berlin, 2011.
- [Deu-2011b] Deutsches Institut für Normung e.V.: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme. Berlin, 2011.
- [Deu-2011c] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung. Berlin, 2011.
- [Deu-2013a] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Ladekrane. Berlin, 2013.
- [Deu-2013b] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Sicherheit - Konstruktion - Anforderungen an die Ausrüstung. Berlin, 2013.

- [Deu-2014a] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane – Brücken- und Portalkrane. Berlin, 2014.
- [Deu-2014b] Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane – Fahrzeugkrane. Berlin, 2014.
- [Deu-2016a] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte. Berlin, 2016.
- [Deu-2016b] Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin, 2016.
- [Deu-2016c] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Not-Halt-Funktion – Gestaltungsleitsätze. Berlin, 2016.
- [Deu-2016d] Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze. Berlin, 2016.
- [Deu-2018] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe. Berlin, 2018.
- [Eps-2018] Epsilon Kran: Epsilon Highlights 2018: Smart Control. 2018. URL: https://www.palfingerepsilon.com/de_DE/EPSILON-Interforst/EPSILON-Highlights (besucht am 17.08.2018).
- [Eur-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. DOI: 10.1007/978-0-387-09538-7.
- [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.
- [Fod-2016] Fodor, S.; Vázquez, C.; Freidovich, L.: Interactive On-line Trajectories for Semi-automation: Case Study of a Forwarder Crane. In: International Conference on Automation Science and Engineering. Hrsg. von IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE, Piscataway, New Jersey: 2016, S. 928–933.
- [Fri-2003] Frigola, M.; Fernández, J.; Aranda, J.: Visual human machine interface by gestures. In: International Conference on Robotics and Automation. Hrsg. von IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2003.

- [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.
- [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. DOI: 10.1007/978-3-322-88813-6.
- [Gud-2012] Gudehus, T.: Logistik 1. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2012.
- [Haa-2018] Haag, S.: Weiterentwicklung eines MEMS-Messkonzepts zur Bestimmung der rotatorischen Ausrichtung eines Kranbedieners. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Haf-2005] Hafting, T.; Fyhn, M.; Molden, S.; Moser, M.-B.; Moser, E. I.: Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. In: Nature 436.7052, (2005), S. 801–806. DOI: 10.1038/nature03721.
- [Hai-2019] Haid, C.: Entwicklung und Evaluation von standortabhängigen und intuitiven Steuerungskonzepten für Ladekrane. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2019.
- [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 17.09.2019).
- [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: Dissertation. Bd. 30. Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme. Wien: 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: IFAC Proceedings Volumes 46.15, (2013), S. 58–63.
- [Her-2015] Herbst, U.: Gestaltung eines ergonomischen Interaktionskonzeptes für flexibel einsetzbare und transportable Roboterzellen. Dissertation. München: Technische Universität München, 2015.
- [Her-2019] Hermann, N.: Interaktionskonzept für ortsabhängige Teleoperation von Robotern. Eine Evaluation in virtueller Realität. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München, 2019.
- [HIA-2018] HIAB: CTC - Crane Tip Control. 2018. URL: <https://www.hiab.com/en/company/newsroom/news/hiab-crane-tip-control/> (besucht am 17.08.2018).
- [Int-2010] 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 Mass. u.a.: 1983.
- [Joh-2013] John Deere: Intelligente Kransteuerung IBC. 2013. URL: <https://www.deere.de/de/forstmaschinen/ibc/> (besucht am 17.08.2018).
- [Kam-2019] Kammerloher, S.: Evaluation eines inertialen Messkonzeptes zur Bestimmung der Ausrichtung einer Kran-Funksteuerung. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2019.
- [Kaz-2004] Kazerooni, H.; Fairbanks, D.; Chen, A.; Shin, G.: The Magic Glove. In: Conference on Robotics and Automation. Hrsg. von IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE, Piscataway, NJ: 2004.
- [Kem-2013] Kempe, V.: Inertial MEMS - Winzlinge messen Trägheit. 2013. URL: https://leibniz-institut.de/archiv/kempe_09_10_13.pdf (besucht am 14.10.2019).
- [Kiv-2013a] Kivila, A.: Touchscreen Interfaces for Machine Control and Education. Master's Thesis. Atlanta, 2013.

- [Kiv-2013b] Kivila, A.; Porter, C.; Singhose, W.: Human operator studies of portable touchscreen crane control interfaces. In: Int. Conference on Industrial Technology. Hrsg. von IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2013, S. 88–93. DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505653.
- [Kiv-2014] Kivila, A.; Singhose, W.: The Effect of Operator Orientation in Crane Control. In: Dynamic Systems and Control Conference. Hrsg. von ASME American Society of Mechanical Engineers. 2014.
- [Koc-2014] Koch, W.: Tracking and sensor data fusion: Methodological framework and selected applications. Mathematical Engineering. Springer, Berlin und Heidelberg: 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-39271-9.
- [Koo-2011] Koop, J.; Hesse, W.: Sicherheit bei Kranen. 10., vollst. bearb. und erw. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg: 2011.
- [Kro-1997] Kroemer, K. H. E.: Ergonomic design of material handling systems. Lewis Publ, Boca Raton, Fla. [u.a.]: 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 Technical Paper Series. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: 1992. DOI: 10.4271/921659.
- [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. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.009.
- [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).
- [Löf-2009] Löfgren, B.: Kinematic Control of Redundant Knuckle Booms with Automatic Path-Following Functions. Dissertation. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2009.
- [Maj-2017] Majewski, M.; Kacalak, W.: Innovative Intelligent Interaction Systems of Loader Cranes and Their Human Operators. In: Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems. Hrsg. von Silhavy, R.; Senkerik, R.; Kominkova Oplatkova, Z.; Prokopova, Z.; Silhavy, P. Bd. 573. Springer International Publishing, Cham: 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-57261-1.

- [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). URL: <https://doi.org/10.14214/sf.1717>.
- [Meu-2018] Meuer, F.: Infrastrukturaufbau mit Inbetriebnahme eines LKW-Ladekrans und Durchführung einer Studie zur Positionsgenauigkeit. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Moh-2006] Mohs, C.; Hurtienne, J.; Israel, J.; Naumann, A.; Kindsmüller, M.; Meyer, H.; Pohlmeier, A.: IUUI – Intuitive Use of User Interfaces. In: *Usability Professionals 2006* (2006), S. 130–133.
- [Moo-2012] Moosbrugger, H.: Testtheorie und Fragebogenkonstruktion: Mit 66 Abbildung und 41 Tabellen. 2., aktual. und überarb. Aufl. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin: 2012.
- [Nie-1997] Nielsen, J.: Let's ask the users [user interfaces]. In: *IEEE Software* 14.3, (1997), S. 110–111. DOI: 10.1109/52.589250.
- [Nie-2010] Nielsen, J.: Usability engineering. [Nachdr.] 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-2013] Norman, D. A.: The design of everyday things. Revised and expanded ed. Basic Books, New York: 2013.
- [Pal-2019] Palfinger AG: Smart Boom Control. 2019. URL: <https://www.palfinger.com/de-de/ueber-palfinger/digitalisierung> (besucht am 17.09.2019).
- [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: *Int. Conference on Mechatronics*. Hrsg. von IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE, Piscataway, NJ: 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4914928>.

- [Pen-2009c] Peng, K.; Singhose, W.; Gessesse, S.; Frakes, D.: Crane Operation Using Hand-Motion and RFID Tags: Radio Frequency Identification. In: Int. Conference on Control and Automation. Hrsg. von IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE, Piscataway, NJ: 2009.
- [Pen-2012] 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. DOI: 10.1109/TMECH.2012.2184768.
- [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. DOI: 10.1006/brcg.1995.1032.
- [Pre-2019] Preis, S.: Konzeption, Entwicklung und prototypische Umsetzung eines Anti-Kollisions-Systems für einen Ladekran. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2019.
- [Pro-2003] Prorok, K.: Crane-Tip Control of a Hydraulic Crane: A New Approach. Umea, 2003.
- [Ras-1983] 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 SMC-13.3, (1983), S. 257–266. DOI: 10.1109/TSMC.1983.6313160.
- [Ras-2009] Rasch, B.; Frieze, M.; Hofmann, W. J.; Naumann, E.: Quantitative Methoden 1. Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. Springer-Verlag: 2009.
- [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. DOI: 10.1007/s10209-019-00670-1.
- [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.
- [Sch-1993] Schmidtke, H.; Bernotat, R., Hrsg.: Ergonomie. 3., neubearb. und erw. Aufl. Hanser, München: 1993.

- [Sch-2013] Schmidtke, H.; Jastrzebska-Fraczek, I.; Fraczek, I. J.: Ergonomie: Daten zur Systemgestaltung und Begriffsbestimmungen. Hanser, München: 2013.
- [Sci-2000] Sciavicco, L.; Grimple, M. J.; Johnson, M. A.: Modelling and Control of Robot Manipulators. N. Springer London, London: 2000.
- [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.: Springer Handbook of Robotics. 2nd Edition. 2016.
- [Smi-1998] Smidt, W.: Verallgemeinerte inverse Kinematik für Anwendungen in der Robotersimulation und der virtuellen Realität. Diplomarbeit. Dortmund: Universität Dortmund, 1998.
- [Sor-2007] Sorensen, K.; Spiers, J.; Singhose, W.: Operational Effects of Crane Interface Devices. In: Conference on Industrial Electronics and Applications. Hrsg. von IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE, Piscataway, NJ: 2007, S. 1073–1078. DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318573.
- [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: International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Hrsg. von IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE: 2007, S. 1–6. DOI: 10.1109/AIM.2007.4412586.
- [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.
- [Top-2017a] Top, F.: Expertengespräch (16.11.2017). Teilnehmer: Ein Mitarbeiter der Fa. Krupinski Cranes (Entwicklungsingenieur). 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). Teilnehmer: Vier Mitarbeiter der Fa. Max Bögl Transport & Geräte GmbH (Kranfahrer, Werkstattmeister). Garching, 2018.
- [Top-2018b] Top, F.; Antes J.: Intuitives, zielorientiertes Steuerungskonzept für eine einfache Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Lasthandling. Würzburg, 2018.
- [Top-2018c] Top, F.; Prasch, L.; Schmidler, J.; Fottner, J.: Intuitive Steuerung von teleoperierten Kranen in Bau und Industrie. In: Tagungsband zur 7. Fachtagung Baumaschinentechnik: Digitalisierung - Automatisierung - Mensch, 20.-21. September 2018, Dresden. Hrsg. von Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. 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: Tagungsband: 48. Großseminar des Verbands der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik (VDBUM) e. V., 19.-22.02.2019, Willingen (Upland). Hrsg. von VDBUM Service GmbH. Stuhr: 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: Intelligent Human Systems Integration 2019. Hrsg. von Karwowski, W.; Ahram, T. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer International Publishing, Cham: 2019, S. 293–299.
- [Vem-2014] Vemcon GmbH: VIO Steuergerät. Factsheet. Haar, 2014.
- [Vem-2019a] 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).
- [Vem-2019b] Vemcon GmbH: Vemcon Grader-Nachrüstkit mit dem Unigrip Joystick. 2019. URL: https://www.vemcon.de/wp-content/uploads/2018/10/2018_08_Vemcon_GraderKit_web.pdf (besucht am 18. 09. 2019).
- [Ver-2004] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. München, 2004.
- [Ver-2007] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik. Berlin, 2007.
- [Ver-2009] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik - Koexistenzmanagement von Funklösungen. Berlin, 2009.

- [Ver-2015] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Gebrauchstaugliche Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen - Merkmale, Gestaltung und Einsatzmöglichkeiten von Benutzungsschnittstellen mit Touchscreens. Berlin, 2015.
- [Ver-2016] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Kabellose Steuerung von Kranen. Berlin, 2016.
- [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: IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (2017), S. 795–800. DOI: 10.1109/ICORR.2017.8009345.
- [Wag-2018] Wagner, M.: Inverse Kinematics and Control Strategies for an Intuitive Crane Control System. Masterarbeit. München: Technische Universität München, 2018.
- [Wic-2000] Wickens, C. D.; Hollands, J. G.: Engineering psychology and human performance. 3. ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ: 2000.
- [Wol-2017] Wollschläger, A.: Gestaltung eines Augmented Reality Interaktionskonzepts für die intuitive Roboterprogrammierung. Masterarbeit. München, 2017.
- [Wöl-2018] Wöllhaf, M.: Modellierung und simulative Untersuchung einer intuitiven Kransteuerung mit MATLAB/SimScape 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. DOI: 10.1080/00140138908966105.
- [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.
- [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). DOI: 10.24846/v28i2y201909.
- [Zim-1995] Zimmermann, S.; Zimmermann, B.: Kranführer-Ausbildung: Mit Tabellen. Bd. 1. Kranführer-Lehrsystem. Resch, Gräfelfing: 1995.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Lösungsansatz am Beispiel eines Turmdrehkrans	3
Abbildung 1-2	Zuordnung der Arbeitspakete zu den Kapiteln des Schlussberichts	5
Abbildung 2-1	Der Mensch als Teil des Regelkreises im Belastungs- Beanspruchungskonzept nach [Rüh-1981].	7
Abbildung 2-2	Exemplarische Darstellung räumlicher Kompatibilität. Links ist eine kompatible, rechts eine inkompatible Anordnung von Anzeigen und Bedienelementen zu sehen.	9
Abbildung 2-3	Zuordnung der Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit (links) zu typischen Arten der Erhebung (rechts).	12
Abbildung 2-4	Die Verhaltensebenen (fertigungs-, regel- und wissensbasiert) eines erfahrenen menschlichen Bedieners nach Rasmussen [Ras-1983]	13
Abbildung 2-5	Bauformen unterschiedlicher Funksteuerungen: Linearhebel (links), Joysticks mit zwei Funktionen (mitte), Drucktaster (rechts) [HBC-2019b]	22
Abbildung 2-6	HBC-pilot zur Einhandsteuerung von Kranen und Maschinen [HBC-2019a]	22
Abbildung 2-7	Blockschema einer Funksteuerung [Ver-2016]	23
Abbildung 2-8	uniGRIP System mit 6 Freiheitsgraden [Vem-2019b]	32
Abbildung 3-1	Iterativer Prozess zur menschenzentrierten Gestaltung nach [Deu-2011a]	40
Abbildung 3-2	V-Modell als Makrozyklus [Ver-2004]	41
Abbildung 4-1	Kranbedienung aktuell (FAST-Diagramm) [Hel-2018]	45
Abbildung 4-2	Mögliche Eingabemodalitäten: Lösungsansätze für die Eingabe des Benutzerwunsches (in Anlehnung an [Hel-2018])	46
Abbildung 4-3	Bedienkonzeptvarianten als morphologischer Kasten (in Anlehnung an [Hel-2018])	47
Abbildung 4-4	Expertenbewertung der Bedienkonzeptvarianten (in Anlehnung an [Hel-2018])	48

Abbildung 4-5	Intuitive Laststeuerung (Draufsicht, schematisch)	49
Abbildung 4-6	Das in den Animationsvideos verwendete Kranmodell PK 6500M der Firma Palfinger.	54
Abbildung 4-7	Die drei in den Videos dargestellten Bewegungen und relativ dazu die vier verwendeten Positionen.	55
Abbildung 4-8	Screenshot aus einem der Animationsvideos. Konkret wird Bewegung 3 aus Position 4 dargestellt (vgl. Abbildung 4-7). Von der Startposition (roter Marker) sollte die Last ca. in einem 120 deg Winkel zur Zielposition (blauer Marker) bewegt werden. Unterstützend werden ein Pfeil am Boden sowie die Vogelperspektive der Bewegung gleichzeitig animiert angezeigt.	55
Abbildung 4-9	Antwortoptionen des Onlinefragebogens. Linearhebel (oben) und Meisterschaltersteuerung (unten) wurden jeweils unter den entsprechenden Bewegungsvideos (vgl. Abbildung 4-8) präsentiert.	56
Abbildung 4-10	Ablauf des Online-Fragebogens. Der blaue, bzw. rote Pfad repräsentiert die Randomisierung des zuerst getesteten Systems. Innerhalb der beiden Systeme (Linearhebel oder Meisterschalter) wurden die drei zu lösenden Aufgaben ebenfalls in randomisierter Reihenfolge präsentiert.	57
Abbildung 4-11	Links: Boxplots der Korrektheit, geteilt in die Vorerfahrung und das Steuerungssystem. Abgebildet sind der Median mit einem 95%-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands. Rechts: Histogramm der korrekten Eingaben, aufgeteilt in die Vorerfahrung (Experte vs. Novize) und das Steuerungssystem (Linearhebel vs. Meisterschalter).	59

- Abbildung 4-12 Links: Boxplots der Steuerungszeit, geteilt in die Vorerfahrung und das Steuerungssystem. Rechts: Boxplots der Steuerungszeit, geteilt in den Versuchszeitpunkt und das Steuerungssystem. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands. Man beachte die Aufgrund der Ausreißer logarithmierte Y-Achse. 60
- Abbildung 4-13 Links: Boxplots der Gebrauchstauglichkeit erfasst via System Usability Scale, geteilt in die Vorerfahrung und das Steuerungssystem. Rechts: Boxplots der Sicherheit in die eigenen Antworten, erfasst via Schieberegler, geteilt in die Vorerfahrung und das Steuerungssystem. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands. 61
- Abbildung 4-14 Die virtuelle Entsprechung des real gehaltenen Controllers inkl. Veranschaulichung der Bewegungsrichtungen am rechten Joystick. 66
- Abbildung 4-15 Links: Schematische Darstellung der Ausgangsposition und der acht möglichen Zielpositionen der Last sowie der 4 Möglichen Bedienerpositionen. Rechts: Umsetzung in der virtuellen Realität. 67
- Abbildung 4-16 Der in der virtuellen Realität dargestellte Roboter, der Probanden die einzunehmende Körperposition veranschaulicht. (Links: gleich; Rechts: unterschiedlich) 68
- Abbildung 4-17 (Links: Zeit, Mitte: Abweichung; Rechts: Fehlbedienung) Boxplots, geteilt in das Koordinatensystem und das Steuerungssysteme Orientierung. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands. 69
- Abbildung 5-1 Ladekran (Freifläche) 79

Abbildung 5-2	Ladekran (Zeichnung)	79
Abbildung 5-3	Systemarchitektur und Schnittstellen des Ladekrans	80
Abbildung 5-4	Demonstrator-Umgebung auf der Versuchs-Freifläche am Lehrstuhl fml	82
Abbildung 5-5	Funksteuerung: Eingabegerät für die intuitive Laststeuerung	84
Abbildung 5-6	IMU-Sensorbaustein MTi-3 AHRS der Firma Xsens Technologies: Rendering (links oben), Pin-Belegung (links unten) und Moduldia- gramm (rechts) [Xse-2018]	93
Abbildung 5-7	Integration des MTi-3 AHRS in die Funksteuerung der intuitiven Laststeuerung	97
Abbildung 5-8	Box zur Referenzierung der Funksteuerung im Bezug auf das Kran- koordinatensystem	98
Abbildung 5-9	Geometrische Zusammenhänge für die Bestimmung der Hakenpo- sition (Skizze): Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts)	100
Abbildung 5-10	Balkengrafik des Ladekrans mit Arbeitsraumbegrenzungen (Simula- tion) [Wag-2018]	105
Abbildung 5-11	Regelungskonzept für die Hakenbewegung	106
Abbildung 5-12	Positionsregelung der Gelenke (einzeln)	108
Abbildung 5-13	Absolute Fehler der Zylinderlängen je Gelenk (einzeln)	109
Abbildung 5-14	Absoluter Fehler in der Hakenposition	110
Abbildung 5-15	Rendering und Systemarchitektur des Steuergeräts Vio [Vem-2014]	111
Abbildung 5-16	Systemarchitektur der intuitiven Laststeuerung	113
Abbildung 5-17	Hakenpositionsverlauf und Joystickeingaben: Draufsicht auf die Horizontalbewegung (links) und Seitenansicht der Hubbewegung (rechts) – 1. Beispielmessung	115
Abbildung 5-18	Hakenpositionsverlauf und Joystickeingaben: Draufsicht auf die Horizontalbewegung (links) und Seitenansicht der Hubbewegung (rechts) – 2. Beispielmessung	115
Abbildung 5-19	3D-Plot der statischen Messungen [Kam-2019]	119

Abbildung 5-20	3D-Plot der statischen Messungen - Draufsicht [Kam-2019]	120
Abbildung 6-1	Demonstratoraufbau mit Zielpositionen (im Bild Position 2, blau und Position 3, grün) der Last und jeweiliger Startposition der Bediener, wie in der Evaluation genutzt.	124
Abbildung 6-2	Links: Versuchsablauf. Rechts: Schematische Draufsicht auf das Versuchsszenario.	125
Abbildung 6-3	Boxplots der Ablagegenauigkeit, geteilt in die Vorerfahrung und die Steuerungssysteme. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.	128
Abbildung 6-4	Boxplots der Fehleranzahl, geteilt in die Vorerfahrung und die Steuerungssysteme. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.	129
Abbildung 6-5	Boxplots der benötigten Zeit, geteilt in die Vorerfahrung und die Steuerungssysteme. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.	131
Abbildung 6-6	Boxplots der Gebrauchstauglichkeit, erfasst via System Usability Scale, geteilt in die Vorerfahrung und die Steuerungssysteme. Abgebildet sind der Median mit einem 95 %-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.	133
		183

Abbildung 6-7	Boxplots der Zeit, geteilt in die Vorerfahrung, Steuerungssysteme und Reihenfolge. Abgebildet sind der Median mit einem 95%-Konfidenzintervall (notches) sowie die Box vom 25.-75. Quartil und den Whiskers aller Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands.	134
Abbildung 8-1	Intuitive Laststeuerung am Beispiel eines Turmdrehkrans	155

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Dimensionen der Gebrauchstauglichkeit	10
Tabelle 2-2	Die sieben Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110 [Deu-2006].	11
Tabelle 2-3	Anzahl der Bewegungsfreiheitsgrade für einige Krantypen und Anwendungsbereiche	16
Tabelle 2-4	Stellteile zur Kranbewegung	21
Tabelle 2-5	Ausgewählte Patente im Kontext der intuitiven Laststeuerung (nach Veröffentlichungsdatum)	26
Tabelle 3-1	Bewertung bisheriger Steuerungsansätze hinsichtlich der Basisanforderungen	38
Tabelle 4-1	Unabhängige Variablen der Online-Fragebogenstudie	53
Tabelle 4-2	Abhängige Variablen der Online-Fragebogenstudie	53
Tabelle 4-3	ANOVA für Gruppenunterschiede bzgl. der Korrektheit	59
Tabelle 4-4	ANOVA für Gruppenunterschiede bzgl. der Steuerungszeit und Lerneffekte	61
Tabelle 4-5	ANOVA für Gruppenunterschiede bzgl. der Gebrauchstauglichkeit (SUS) und der Sicherheit in die eigenen Antworten	62
Tabelle 4-6	Abhängige Variablen der Probandenstudie in virtueller Realität	66
Tabelle 5-1	Anforderungen an die intuitive Laststeuerung	74
Tabelle 5-2	Anforderungen an die intuitive Laststeuerung (Fortsetzung)	75
Tabelle 5-3	Anforderungen an die intuitive Laststeuerung (Fortsetzung)	76
Tabelle 5-4	Mögliche Demonstratorlösungen	78
Tabelle 5-5	Technische Daten der Funksender/-empfänger-Kombination für die intuitive Laststeuerung (Auswahl) [HBC-2017a][HBC-2017b]	87
Tabelle 5-6	Anforderungen an das Messsystem zur Messung der Funksteuerungsorientierung	89
Tabelle 5-7	Übersicht über betrachtete Messverfahren zur Orientierungsbestimmung	91

Tabelle 5-8	Technische Spezifikation des verwendeten Sensorbausteins MTi-3 AHRS [Xse-2018]	95
Tabelle 5-9	Technische Spezifikation des verwendeten Steuergeräts Vio [Vem-2014]	111
Tabelle 5-10	Parameter der Evaluationsstudie	118
Tabelle 6-1	Unabhängige Variablen der Evaluation	126
Tabelle 6-2	Abhängige Variablen der Evaluation	127
Tabelle 6-3	ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Ablagegenauigkeit	128
Tabelle 6-4	ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Fehleranzahl	129
Tabelle 6-5	Mittelwerte und Standardabweichungen der Fehleranzahl aufgeteilt nach unabhängigen Variablen	130
Tabelle 6-6	ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Bedienzeit	131
Tabelle 6-7	Mittelwerte und Standardabweichungen (in Sekunden) der Bedienzeit aufgeteilt nach unabhängigen Variablen	131
Tabelle 6-8	ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Gebrauchstauglichkeit	132
Tabelle 6-9	ANOVA für Gruppenunterschiede bezüglich der Gebrauchstauglichkeit	134
Tabelle 6-10	Mittelwerte und Standardabweichungen (in Sekunden) der Bedienzeit aufgeteilt nach unabhängigen Variablen	135
Tabelle 7-1	Anforderungsabgleich	140
Tabelle 7-2	Anforderungsabgleich (Fortsetzung)	141
Tabelle 7-3	Anforderungsabgleich (Fortsetzung)	142

A. Ergebnisse der Normenrecherche

Tabelle A-1 gibt einen Überblick über die Gliederung der Normenrecherche. Die Ergebnisse sind auf den folgenden Seiten dargestellt.

Tabelle A-1: Gliederung der Normenrecherche in Anhang A

Funksteuerung	Seite A-2	Stellteile, Stellteilergonomie	Seite A-4	Sicherheitsvorgaben	Seite A-9
Allgemeines	Seite A-2	Anordnung	Seite A-4	Allgemein	Seite A-9
Sicherheit	Seite A-3	Kennzeichnung	Seite A-5	Informationen	Seite A-10
Energieversorgung	Seite A-3	Form	Seite A-5	Start-Stopp-Funktionen	Seite A-11
		Farben	Seite A-5	Tragfähigkeit	Seite A-12
		Wahrnehmung	Seite A-6	Akustische Warnung	Seite A-12
		Abmaße	Seite A-6	Elektrische Ausrüstung	Seite A-12
		Anweisung	Seite A-6	Architektur	Seite A-13
		Benutzung	Seite A-7	Prüfung	Seite A-14
		Sicherheit	Seite A-7	Elektromagnetische Verträglichkeit	Seite A-14
		Randbedingungen	Seite A-8		
		Körperhaltung und -bewegung	Seite A-8		
		Stellteilbetätigung und Betätigungsrichtung	Seite A-8		
		Bildschirm	Seite A-9		

A.1. Funksteuerung

A.1.1. Allgemein

Tabelle A-2: Normative Anforderungen im Bereich Funksteuerung - Allgemein

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Senderlaubnis	Sender darf nicht senden, solange Einrichtung gegen unbefugte Verwendung aktiviert ist	DIN EN 13557 (C.1)
Weitergabe	Empfänger darf Ausgangssignal zur Steuerung nur weitergeben, wenn er Datenrahmen mit richtiger Adresse und den jeweiligen Befehl richtig empfängt	DIN EN 13557 (C.2.2)
Schalterlaubnis	Kranschalter darf nur geschaltet werden, wenn mindestens ein Datenrahmen ohne Betriebsbefehle, aber mit Startbefehl, korrekt empfangen wurde	DIN EN 13557 (C.2.3)
Zurücksetzen	Um nach irgendeiner Situation, die den Kran zum Stoppen veranlasste, unbeabsichtigte Bewegungen zu verhindern, darf das System nur zu Kranbewegungen führende Betriebsbefehle abgeben, nachdem der Kranführer die Stellteile eine geeignete Zeitspanne auf „Null“ gebracht hat, das heißt, nachdem es mindestens einen Datenrahmen ohne jeden Betriebsbefehl empfangen hat.	DIN EN 13557 (C.2.4)
Ausfall Stromverbindung	Kranschalter stromlos: alle Ausgänge für Betriebsbefehle für Kranbewegungen des Empfängers müssen aufhören	DIN EN 13557 (C.2.5)
Datenaustausch	Datenrahmen muss während des Betriebs wiederholt gesendet werden	DIN EN 13557 (C.4.2)
Zuverlässigkeit	Das System muss eine Übertragungszuverlässigkeit von einer Hammingdistanz entsprechend der Gesamtzahl der Bits eines Datenrahmens geteilt durch 20, zumindest jedoch 4, oder andere Einrichtungen aufweisen, die ein gleiches Sicherheitsniveau garantieren, sodass die Wahrscheinlichkeit des Durchkommens eines irigen Datenrahmens kleiner 10 ⁻⁸ ist	DIN EN 13557 (C.4.1)
Hinweis	Eindeutiger Hinweis, welches Hebezeug bedient werden kann	VDE 0113-32 (9.2.7.1);
Begrenzung	Maßnahmen, um zu verhindern, dass Hebezeug auf andere Signale reagiert	VDE 0113-32 (9.2.7.2);
Funktionen	Aktivierung muss an Bedienstation angezeigt werden, darf aber keine Hebezeugbewegung einleiten	VDE 0113-32 (9.2.7.2);
Funktionen	Empfänger darf nur Kommandos für Steuerung des Hebezeugs bereitstellen, wenn er von der Bodenstation Datentelegramme (Frames) empfängt, die die richtige Adresse und ein ordnungsgemäßes Kommando enthalten	VDE 0113-32 (9.2.7.2);
Funktionen	Kranschalter darf nur angesteuert und Stoppfunktion nur aufgehoben werden, wenn Empfänger der Bodenstation mindestens ein ordnungsgemäßes Datentelegramm ohne Arbeitskommando empfangen hat, welches ein Startkommando beinhaltet	VDE 0113-32 (9.2.7.2);
Funktionen	Empfänger darf nur Arbeitskommandos ausgeben, wenn der Kranführer die Stoppteile der Bedienstation für eine angemessene Zeitdauer auf AUS zurückgenommen hat	VDE 0113-32 (9.2.7.2);
Kommunikation Sender-Empfänger	Mehrfaches Senden der Datentelegramme	VDE 0113-32 (9.2.7.4);
Kommunikation Sender-Empfänger	Korrektur Empfang vor Bewegungseinleitung erforderlich	VDE 0113-32 (9.2.7.4);
Kommunikation Sender-Empfänger	Zuverlässigkeit mit Hammingdistanz entsprechend der Gesamtzahl der Bits in Datentelegramm dividiert durch 20, jedoch mindestens 4 oder andere Mittel mit vergleichbarer Zuverlässigkeit: Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaft übertragenen Datentelegramms <10 ⁻⁸	VDE 0113-32 (9.2.7.4);
Serielle Datenübertragung	Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Rahmens der unerkannt empfangen wird, R(PE) < 10 ⁻⁸	VDE 0113-1-1(4.3);
Serielle Datenübertragung	Eingabebittfehlerwahrscheinlichkeit Pe = 10 ⁻³	VDE 0113-1-1(4.3);
Serielle Datenübertragung	Hamming-Distanz mindestens 4 oder Gesamtzahl von Bits eines Rahmens geteilt durch 20, wenn Ergebnis größer 4	VDE 0113-1-1(4.3);
Serielle Datenübertragung	Restfehlerwahrscheinlichkeit weniger als 1% des PFHD-Wertes	VDE 0113-1-1(4.3);
Kennzeichnung	Kennzeichnung einer Übertragung auf der Steuerung durch z. B. Leuchtmelder	VDE 0113-1-1(4.5);
Unterbrechung der Übertragung	Bei Einrichtung zur automatischen Unterbrechung der Übertragungen müssen nach Ende des Betriebsbefehls für gewisse Dauer neutrale Rahmen übermittelt werden (am Ende dieser Übertragung von neutralen Rahmen automatischen Stopp einleiten)	VDE 0113-1-1(4.9);
Unterbrechung der Übertragung	Keine Einrichtung zur automatischen Unterbrechung: bis zum nächsten Betriebsbefehlssignal neutrale Rahmen übertragen	VDE 0113-1-1(4.9);

A.1.2. Sicherheit

Tabelle A-3: Normative Anforderungen im Bereich Funksteuerung - Sicherheit

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Steuerpult	Einschalten muss angezeigt werden und darf keine Kranbewegung einleiten	DIN EN 13557 (C.3.1)
Beeinflussung	Maßnahmen gegen störende Beeinflussung mehrerer Anlagen: Wahl unterschiedlicher Frequenzen, geeigneter Mehrfachausnutzung des Trägers, Reichweitenentkopplung, unterschiedliche Adresskennung	VDI 4412 (8.3)
Vibration	Empfänger muss einer Vibration standhalten	DIN EN 13557 (C.7)
Zugriffsbeschränkung	Möglichkeit, um unbefugte Benetzung der Bodenstation zu verhindern	VDE 0113-32 (9.2.7.1);
Stopp-Funktion	Stoppfunktion als gesonderte und eindeutig erkennbare Möglichkeit; darf nicht als NOT-HALT-Gerät markiert sein	VDE 0113-32 (9.2.7.3);
Stoppen der Übertragung	Einrichtung, die Stromversorgung der Übertragung unterbricht (z. B. Entfernen der Batterie ohne Werkzeug)	VDE 0113-1-1(4.4);
Wiederherstellung der Kommunikation	Darf keine gefährliche Maschinenbewegungen einleiten (Einleiten muss bewusste Handlung erfordern)	VDE 0113-1-1(4.5);
Wiederherstellung der Kommunikation	Basisstation darf nicht auf Befehlssignale reagieren, die zu gefährlichen Bewegungen führen kann, bis ein neutraler Rahmen empfangen worden ist	VDE 0113-1-1(4.5);
Stoppfunktion	Eine automatische Stoppfunktion und mindestens eine sicherheitsrelevante Stoppfunktion durch bewusste menschliche Handlung	VDE 0113-1-1(4.7.1);
Sicherheitsbezogene Abschaltfunktionen	Sicherheitsintegrität von SIL1/PLc	VDE 0113-1-1(4.7.2);
Sicherheitsbezogene Abschaltfunktionen	Fehler in Teil der Steuerung darf nicht zu Verlust einer sicherheitsbezogene Abschaltfunktion führen	VDE 0113-1-1(4.7.2);
Verhindern von nicht autorisiertem Betrieb	Mittel, die unbefugte Benutzung verhindert (Code, Schlüsselschalter)	VDE 0113-1-1 (4.2.2);
Verhindern von unbeabsichtigten Befehlen	Bei Erkennung von Fehlern müssen alle sicherheitsbezogenen Ausgänge in Aus-Zustand mit angemessener Sicherheitsintegrität	VDE 0113-1-1 (4.2.3);

A.1.3. Energieversorgung

Tabelle A-4: Normative Anforderungen im Bereich Funksteuerung - Energieversorgung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Batteriespannung	Warnung, wenn Batteriespannung festgelegte Grenzen über- oder unterschreitet	VDE 0113-32 (9.2.7.6);
Batteriespannung	Bei zu niedriger Spannung, Stopp entsprechend 9.2.7.3	VDE 0113-32 (9.2.7.1);
Batteriespannung	Energieversorgung der Bedienstation muss einfach entfernt oder getrennt werden können	VDE 0113-32 (9.2.7.6);
Verhalten bei Energieverlust	Keine unbeabsichtigten Ausgabebefehle	VDE 0113-1-1 (4.11);
Verhalten bei Energieverlust	Optische Warnung bei Änderung der Batteriespannung über vorgegebene Grenzwerte (zusätzliche akustische oder haptische Warnungen)	VDE 0113-1-1 (4.11);
Verhalten bei Energieverlust	Spannung zu niedrig: Unterbrechen der Übertragung	VDE 0113-1-1 (4.11);
Abgeschlossener Status	Nach der Warnung und der in EN 60204-32, 9.2.7.6 geforderten Zeit (wenn die Spannung der Sender-Batterie so gering wird, dass eine zuverlässige Übertragung nicht mehr garantiert werden kann) muss der Sender automatisch in den abgeschlossenen Status gehen (das heißt, der Empfänger stoppt alle Kranbewegungen und öffnet den Kranschalter).	DIN EN 13557 (C.6)
Ingangsetzung	Ingangsetzung einer internen Energiequelle oder das Einschalten einer äußeren Energiequelle darf nicht zu einer Gefährdungssituation führen	DIN EN ISO 12100 (2.11.2);
Wiederanlauf nach Energieausfall	Nach einem Energieausfall muss der spontane Wiederanlauf einer Maschine bei Wiederkehr der Energie verhindert werden, wenn durch einen derartigen Wiederanlauf eine Gefährdung entstehen konnte (z. B. durch Einsatz eines selbsthaltenden Relais, Schützes oder Ventils)	DIN EN ISO 12100 (2.11.4);
Schwankungen, Verlust und Wiederkehr	Sicherheitsbezogenes Teil der Steuerung muss weiterhin Ausgangssignale bereitstellen oder einleiten, die anderen Teilen der Maschine ermöglichen, den sicheren Zustand aufrechtzuerhalten	DIN EN ISO 13849-1 (5.2.8);

A.2. Stellteile, Stellteilergonomie

A.2.1. Anordnung

Tabelle A-5: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Anordnung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Grundlagen	Stellteile so ausführen/anordnen, dass bei bestimmungsgemäßer Betätigung ein unbeabsichtigtes Stellen verhindert wird	DIN 15025 (4);
Gruppierung	Wichtige und häufig benutzte Elemente am leichtesten zugänglich, nacheinander zu bedienende Elemente nahe beieinander, funktionell zusammengehörende Elemente in Gruppen optisch und räumlich getrennt, wichtige Stellteile (Notfall) schnell und zielsicher nutzbar	DIN EN 894-1 (4.1.3);
Sichtbarkeit	Zeichen so anordnen, dass sie bei Betätigung sichtbar sind	DIN EN 894-1 (4.1.4);
Funktioneller Zusammenhang	Stellteile dicht bei zugehörigen Anzeigen; Bewegungsrichtung Stellteil = Bewegungsrichtung System; Fehler muss vom Operator sofort erkannt werden	DIN EN 894-1 (4.1.5);
Bewegungsraum	Keine unbequeme Körperbewegungen zur Betätigung; angepasster Abstand, Umstände berücksichtigen	DIN EN 894-1 (4.3.3);
Zugänglichkeit	Informationen leicht zugänglich: Anzeigen im Blickfeld des Benutzers, Abdeckung durch Arme berücksichtigen	DIN EN 894-1 (4.3.2);
Position	Am häufigsten genutzte Stellteile so positionieren, dass sie am leichtesten erreicht werden können; Stellteile, die am häufigsten gesehen werden müssen, müssen dort platziert werden, wo sie am besten sichtbar sind	DIN EN ISO 6385 (3.6.6);
Erreichbarkeit	Häufig genutzte Stellteile müssen bei entsprechender Arbeitshaltung leicht erreichbar sein; wichtige Stellteile bequem zu erreichen, weniger häufige nur in Reichweite	DIN EN 614-1 (4.3.2);
Gruppierung	Gleichzeitig oder kurz nacheinander benutzte Stelle müssen nahe beieinander liegen	DIN EN ISO 6385 (3.6.6);
Eindeutigkeit	Eindeutige, sichere Betätigung	DIN EN ISO 12100 (6.2.8);
Eindeutigkeit	Bedienteile müssen unter allen Bedingungen unzweideutig identifizierbar und so angeordnet sein, dass sie die sichere und zeitgerechte Bedienung erlauben	VDE 0196 (4.1.2);
Stellteile	Bewegung nur aus neutralen Stellung der Stellteile auslösbar	DIN EN 15011 (5.6.1);
Unbeabsichtigte Bedienung	Unbeabsichtigte Bedienung muss vermieden werden	DIN EN ISO 6385 (3.6.6);
Maßnahmen gegen unbeabsichtigte Bedienung	Versenken oder Abdecken der Bedienteile oder Anordnung an Stelle, an der Betätigung unwahrscheinlich ist	VDE 0113-103 (4);
Maßnahmen gegen unbeabsichtigte Bedienung	Verstärken des Betätigungswiderstandes oder Verriegelungssystem	VDE 0113-103 (4);
Maßnahmen gegen unbeabsichtigte Bedienung	Anwenden mehrerer zusammengehörender Bedienteile mit Betätigungsreihenfolge oder Zweihandsteuerung	VDE 0113-103 (4);
Maßnahmen gegen unbeabsichtigte Bedienung	Freigabeeinrichtung oder Fernverriegelung	VDE 0113-103 (4);
START-STOPP	In der Nähe jeder START-Steuerungseinrichtung muss eine STOPP-Steuerungseinrichtung angeordnet sein. Wird die START/STOPP-Funktion mithilfe einer Steuerungseinrichtung mit selbsttätiger Rückstellung bewirkt, muss eine getrennte STOPP-Steuerungseinrichtung vorgesehen sein, wenn sich ein Risiko daraus ergeben kann, dass beim Loslassen der Steuerungseinrichtung mit selbsttätiger Rückstellung kein STOPP-Befehl ausgelöst wird.	DIN EN ISO 12100 (6.2.11.8);
Starteinrichtung	So gebaut, dass unbeabsichtigte Bedingung minimiert wird	VDE 0113-32 (10.6);
NOT-HALT: unbeabsichtigte Auslösung	Vermeidung von unbeabsichtigter Auslösung (durch Anordnung oder falls erforderlich konstruktive Maßnahmen)	DIN EN ISO 13850 (4.5);
NOT-HALT	Abseits von stark frequentierten Bereichen	DIN EN ISO 13850 (4.5);
NOT-HALT	Stark versenkte Oberfläche (Schutzkragen vermeiden)	DIN EN ISO 13850 (4.5);
NOT-HALT	An jeder Bedienstation	VDE 0113-32 (10.7.1);
NOT-HALT	Leichte Zugänglichkeit und gefahrlose Bedienung; gut sichtbar und erkennbar	VDE 0196 (5.3);
NOT-AUS	In der Nähe des Hebezeuges	VDE 0113-32 (10.7.2);
NOT-AUS	Nothalt, der alle Bewegungen abdeckt	ISO 7752-1 (4.1.3);
Logik	Logisch, entsprechend ihren betriebsmäßigen und funktionalen Wechselbeziehungen	VDE 0196 (4.1.8);
Vermeiden von Auswirkungen von Bedienerfehlern	Festgelegter Vorrang von Kommandos, Vereinfachung der Betätigungsreihenfolge, Steuerungsverriegelung; Start bei reduzierter Gefahrenbedingung (z.B. reduzierte Geschwindigkeit)	VDE 0196 (4.1.7);
Intuitive Anordnung	Anordnung so, dass Bewegungsrichtung den natürlichen Bewegungen entspricht	ISO 7752-1 (4.3.1);
Abstände	Ausreichend Abstand zwischen den einzelnen Stellteilen (50mm für > 50 N, 25 mm für <= 50 N, 10 mm zwischen Reihen von Druckknöpfen, 15 mm zwischen einzelnen Druckknöpfen, 5 mm für Knöpfe, die keine Hebebewegung auslösen, 5 mm für max. 4 Knöpfe bei Handsteuerung)	ISO 7752-1 (4.3.8);

A.2.2. Kennzeichnung

Tabelle A-6: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Kennzeichnung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Grundlagen	Kennzeichnung der ausgelösten Bewegungen durch Bildzeichen auf/bei den Stellteilen	DIN 15025 (5);
Grundlagen	Bildzeichen müssen erkennbar, in ausreichender Größe und dauerhaft auf oder neben den Stellteilen angebracht werden (bei Fahrbewegung Wiederholung der Bildzeichen am Kran)	DIN 15012 (2-4);
Verständlichkeit	Beschreibungen müssen leicht zugänglich und verständlich sein; Reaktion darauf muss möglich sein	DIN EN 614-1 (4.4.3);
Konsistenz	Ähnliche Teile müssen aufeinander abgestimmt sein bzw. übereinstimmen (mit widerspruchsfreiem System von Codes und Symbolen)	DIN EN 894-1 (4.4.3)
Zeichenauswahl	Deutlich sichtbar, erkennbar und zweckdienlich gekennzeichnet: Bevorzugung von Zeichen gegenüber schriftlichen Hinweisen	DIN EN ISO 12100 (6.2.8);
Kennzeichnung der Stellteile	Bewegungsrichtung der Last oder Lastaufnahmeeinrichtung eindeutig, unverwechselbar und dauerhaft unabhängig vom Position des Steuergeräts zum Kran angegeben	VDI 4412 (9);
Kennzeichnung der Stellteile	In der Nähe oder direkt auf Bedienteil	VDE 0113-32 (10.2.2);
Stopp-Funktion	Stellteile der Stopp-Funktion dürfen nicht als Not-Halt-Einrichtungen markiert oder beschriftet sein (auch wenn sie diese Funktion erfüllen)	VDI 4412 (7.1);
Not-Halt-Betätiger: Kennzeichnung	Betätiger und Hintergrund sollten nicht mit Text oder Symbol gekennzeichnet sein (falls erforderlich: Symbol IEC 60417-5638)	DIN EN ISO 13850 (4.3.7);
Darstellung von Informationen	Grundsätze: Erkennbarkeit, Vermeidung von Ablenkungen, Unterscheidbarkeit, Interpretierbarkeit, Prägnanz, Konsistenz	DIN EN ISO 9241-125 (4.2);
Zeichenhöhe	Zeichenhöhe: 16' für lateinische Zeichen	DIN EN ISO 9241-125 (4.2);
Zuordnung	Symbole so, dass eine klare und eindeutige Zuordnung zwischen der Bewegung des Stellteils und Bewegung des Krans erfolgt	ISO 7752-1 (4.3.5);

A.2.3. Form

Tabelle A-7: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Form

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Beschaffenheit	Konstruktion so, dass klare und eindeutige Interaktion von der Bedienperson und der Maschine möglich ist	DIN EN 614-1 (4.3.2);
Körperähnlichkeit	Griffe und Pedale in Form und Funktion der Anatomie der Hand und den Körpermaßen des Bedienpersonals anpassen	DIN EN 614-1 (4.1);
Auslenkung	Fühlbare Auslenkung der Stellteile mit einrastender Nullstellung	VDI 4412 (5 c);
NOT-HALT-Betätiger	Drucktaster, Griffe, Drähte, Seile, Betätigungsstangen	DIN EN ISO 13850 (4.3.6);
NOT-HALT	Pilzkopfförmiger Drucktaster, ROT (Hintergrund gelb)	VDE 0113-32 (10.7.1);
NOT-AUS	Pilzkopfförmiger Drucktaster, ROT (Hintergrund gelb)	VDE 0113-32 (10.7.2);
Betätigungslänge	max. 260 mm von der neutralen (Mitte) zur vorderen oder hinteren Position	ISO 7752-2 (9.4);

A.2.4. Farben

Tabelle A-8: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Farben

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Farben Drucktaster	s. Tabelle S. 19	DIN EN 14985 (5.3.9.2);
Farben Drucktaster	Start/Ein: weiß, grau, schwarz, grün	VDE 0113-32 (10.2.1);
Farben Drucktaster	NOT-HALT/-AUS: rot	VDE 0113-32 (10.2.1);
Farben Drucktaster	Stopp/Aus: schwarz, grau, weiß (kein grün, rot erlaubt)	VDE 0113-32 (10.2.1);
Farben Drucktaster	Wechsel: weiß, grau, schwarz	VDE 0113-32 (10.2.1);
Farben Drucktaster	Gleiche Farben (weiß, grau, schwarz) für verschiedenen Funktionen: zusätzliche Kennzeichnung (Form, Position, Symbol,...)	VDE 0113-32 (10.2.1);
Not-Halt-Betätiger: Farbe	Rot, Hintergrund wenn möglich gelb	DIN EN ISO 13850 (4.3.1);
Leuchtdrucktaster	Weiß (falls keine Zuordnung möglich)	VDE 0113-32 (10.4);
Anzeigeleuchten	Rot, gelb, blau, grün: Bediener darauf aufmerksam machen, dass Aufgabe ausgeführt werden sollte	VDE 0113-32 (10.3.3);
Anzeigeleuchten	Blau, weiß: Bestätigung oder Ende eines Wechsels oder Übergangszeit	VDE 0113-32 (10.3.1);
Optisches Warnsignal	Gelb oder gelb-orange	DIN EN 842 (4.3.2);
Optisches Notsignal	Rot	DIN EN 842 (4.3.2);

A.2.5. Wahrnehmung

Tabelle A-9: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Wahrnehmung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Optik	Defizite der optischen Wahrnehmungsfähigkeit berücksichtigen: Formen, Positionen oder Text statt nur Farbe	DIN EN 614-1 (4.4.3);
Blinksignale	bei Änderung, Unterschied Soll-Ist; sofortiges Handeln anfordern, erzeugt Aufmerksamkeit	VDE 0113-32 (10.3.3);
Beleuchtung	Blendung & Schattenbildung vermeiden, angemessene Kontraste	DIN EN 614-1 (4.5.4);
Sichtbares Signal	Während Betätigung im Sichtfeld	VDE 0196 (6.1);
Hörbares Signal	Als Antwort auf Betätigung eines Bedienteils besonders für Routinehandlungen	VDE 0196 (6.2);
Hörbares Signal	Sollte bei Anzeige sicherheitsrelevanter Informationen eine Handlung des Bedieners erfordern und solange bestehen bleiben oder wiederholt werden, bis Bedienungsperson eingreift	VDE 0196 (6.2);
Akustik	Berücksichtigung des Hörvermögens: laute Umgebungsgeräusche erfordern zusätzliche Darstellungsmöglichkeiten	DIN EN 614-1 (4.4.3);

A.2.6. Abmaße

Tabelle A-10: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Abmaße

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Massenschwerpunkt	In der Mitte zwischen beiden Händen und so nah wie möglich am Körper	DIN EN 1005 (4.3.2);
Größe	Breite: max. 60 cm (= Schulterbreite), Tiefe: max. 50 cm (empfohlen < 35 cm), Höhe: nicht sichteinschränkend	DIN EN 1005 (4.3.2);
Griffe	Handgriffe oder Grifföffnungen im Einklang mit der Lage des Masseschwerpunktes; Durchmesser: 2-4 cm, Breite: 12,5 cm, Zwischenraum oberhalb: 7 cm, Form: zylindrisch oder elliptisch	DIN EN 1005 (4.3.2);
Abstand	Horizontaler Abstand zwischen Mittelpunkten der Fußgelenken und Händen < 25 cm	DIN EN 1005 (4.3.2);
Auslegung Stellteil: Gewicht	(Je nach Klasse) 15 kg: 95%; 25 kg: 85% (sollte im Allgemeinen nicht überschritten werden) (Risikobeurteilung 4.3.3)	DIN EN 1005 (4.3.2);
Abstand	Mindestfreiraum zwischen den Hebeln muss 8 mm betragen; Mindestabstand zwischen den Mitten benachbarter Hebel 30 mm	DIN EN 12999 (5.7.1);
Kraft	Hebelkraft zwischen 2 N und 20 N;	DIN EN 12999 (5.7.1);
Hebelkraft	Rückwärts/vorwärts zwischen 5 N und 60 N; seitlich zwischen 5 N und 20 N	ISO 7752-1 (4.2.4);
Druckkraft	Kraft nicht über 10 N (außer bei Notstop oder Knöpfen mit Doppelklick)	ISO 7752-1 (4.2.1);

A.2.7. Anweisung

Tabelle A-11: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Anweisung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Allgemein	Aufnahme ergonomischer Grundsätze ins Pflichtenheft	DIN EN 614-1 (5);
Benutzerinformation	Sämtliche Angaben für sichere und ordnungsgemäße Verwendung	DIN EN ISO 12100 (6.4.1);
Benutzerinformation	Redundanz (Überprüfung des Einleitens der Maßnahme durch Selbstüberwachung oder Inspektion)	DIN EN ISO 12100 (6.4.1);

A.2.8. Benutzung

Tabelle A-12: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Benutzung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Selbsterklärungsfähigkeit	Benutzer muss Stellteile mühelos erkennen und Prozess verstehen können	DIN EN 894-1 (4.2);
Informationsverfügbarkeit	Zustand des Systems muss ohne Stören anderer Aktivitäten sofort verfügbar sein	DIN EN 894-1 (4.2.1);
Steuerbarkeit	Operator soll System beherrschen: Operator darf nicht vom Eigenrhythmus des Systems beherrscht werden	DIN EN 894-1 (4.3);
Fehlerkontrolle	Systeme sollten Fehler prüfen können und dem Benutzer Mittel zur Handhabung derartiger Fehler anbieten;	DIN EN 894-1 (4.5.1);
Fehlermeldungen	Systemfehler soll schnell vom Benutzer erkannt werden	
Fehlerbehandlungszeit	Leicht verständlich: Handlungen ohne umfangreiches Nachdenken und Hilfe vollziehbar	DIN EN 894-1 (4.5.1);
Flexibilität	Benutzer sollte ausreichend Zeit zur Fehleridentifikation und dessen Korrektur haben	DIN EN 894-1 (4.5.2);
Notsignale	Anpassung an den Benutzer (Bedürfnisse, Fähigkeiten, Lernvermögen etc.) durch z.B. anpassbare Geschwindigkeit	DIN EN 894-1 (4.6);
Notsignale-Abklingzeiten	Notsignale nicht unnötig auslösen, da Signal den Benutzer ablenkt und Leistung beeinträchtigt wird	DIN EN 894-1 (A.2.2);
Fähigkeiten	Visuelles Gedächtnis: 0,1 -1 s, akustisches Gedächtnis: 0,9 -3,5 s; Vergleichbare Signale innerhalb eines Verarbeitungszklus sollen vermieden werden	DIN EN 894-1 (A.2.1);
Verständlichkeit	Stellteile, Signale, Bedienungsanleitungen müssen den psychischen (kognitiven, informationellen, emotionalen) Fähigkeiten des Bedienungspersonals entsprechen	DIN EN 614-1 (4.4.1);
Erwartungshaltung	Arbeitsvorgang und Funktionsweise der Maschine müssen für die Bedienperson leicht verständlich sein (Grundsatz der Selbstbeschreibungsfähigkeit)	DIN EN 614-1 (4.4.2);
Fehlertoleranz	Maschinen müssen so weit als möglich mit den Erwartungen der Bedienperson (basierend auf früherer Arbeitserfahrungen und Schulung) übereinstimmen	DIN EN 614-1 (4.4.2);
Flexibilität	Fehlertoleranz und Vorgabe von Maßnahmen für Umgang mit Fehlern	DIN EN 614-1 (4.4.2);
Weiterentwicklung des Bedieners	Berücksichtigung der Erfahrung, Fähigkeiten und Fertigkeiten der bestehenden oder zu erwarteten Bediener	DIN EN 614-2 (4.1);
Anspruch	Möglichkeit zur Weiterentwicklung der Fähigkeiten (durch verschiedene Wege der Aufgabendurchführung, unterschiedliche Betriebsmodi)	DIN EN 614-2 (4.1);
	Vermeidung von Unter- oder Überforderung (auch unter anormalen Bedingungen)	DIN EN 614-2 (4.1);

A.2.9. Sicherheit

Tabelle A-13: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Sicherheit

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Risiko	Betätigung soll kein zukünftiges Risiko verursachen können	DIN EN ISO 12100 (2.8);
Risikominimierung	Eingriffe sicher und einfach durch Bedienperson	DIN EN ISO 12100 (2.11.1);
Fehleranzeige	Fehler müssen eindeutig angezeigt werden	DIN EN ISO 12100 (2.11.1);
Versehentliche Erzeugung	Maßnahmen zur Verhinderung der versehentlichen Erzeugung unerwarteter Befehle zur Inangsetzung	DIN EN ISO 12100 (2.11.1);
Unterbrechung der Energieversorgung	Stopp-Funktion muss aufrechterhalten werden	DIN EN ISO 12100 (2.11.5);
Fehlertoleranz	Hinweise auf mögliche Konsequenzen kritischer Aktionen: Bestätigung vom Operator soll vor dem ausführen solcher Aktionen nötig sein	DIN EN ISO 9241-125 (4.2.2.23);
Signalunterscheidbarkeit	Angemessene Signalunterscheidbarkeit durch geeignete Gestaltung der Anzeigen und Reduktion der Signalunsicherheit (zeitlich, räumlich, Auffälligkeit)	DIN EN ISO 9241-125 (4.2.2.23);
Zeitverzögerung	Signalunsicherheit (zeitlich, räumlich, Auffälligkeit)	DIN EN ISO 9241-125 (4.2);
Unabsichtliche Betätigung	Zeitverzögerung erfordert die geistige Vorwegnahme der Antwort des Systems vom Operator und soll deshalb vermieden werden.	DIN EN ISO 9241-125 (4.2);
	Stellteile so, dass sie nur durch eine beabsichtigte Handlung ausgelöst werden können	ISO 7752-1 (4.3.7);

A.2.10. Randbedingungen

Tabelle A-14: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Randbedingungen

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Auslegung	5. bis 95. Perzentil zur Auslegung betrachten: zusammengesetzt aus Mann und Frau	DIN EN 614-1 (4.3.2);
Herabgesetzte Wachsamkeit	Erforderliche Daueraufmerksamkeit zur Entdeckung kritischer Signale soll vermieden werden	DIN EN ISO 10075-2 (4.4 a)
Tragbare Bedienstation	Wahrscheinlichkeit des Fallens verringern: Gürtel oder Tragriemen	VDE 0113-32 (10.1.5)
Maximaltemperatur	Steuerung darf nicht wärmer als 43°C werden	ISO 7752-1 (4.1.7);
Tragegurt	Anpassbarer Tragegurt zum Tragen der Konsole ohne Hände	ISO 7752-1 (5.1.2);

A.2.11. Körperhaltung und -bewegung

Tabelle A-15: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Körperhaltung und -bewegung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Körpermaße	Maschinen müssen unter Berücksichtigung der Körpermaße des Bedienpersonals gestaltet werden (Reichweite)	DIN EN 614-1 (4.3.3);
Körperhaltungen	Ungünstige Körperhaltungen (z.B. gebückt, gebeugt, verdreht) müssen vermieden werden, Wechsel müssen gefördert werden	DIN EN 614-1 (4.3.3);
Bewegungen	Bewegungen des Körpers müssen dem natürlichen Bewegungsrhythmus entsprechen und natürlichen Abläufen folgen (z.B. extreme Stellungen der Hand-/Armelenke) und Drehungen vermeiden	DIN EN 614-1 (4.3.4);
Belastungen	Länger andauernde statische Muskelanspannung (Halten, Heben) vermeiden : Abstützung mittels Aufhängevorrichtung	DIN EN 614-1 (4.3.5);

A.2.12. Stellteilbetätigung und Betätigungsrichtung

Tabelle A-16: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Stellteilbetätigung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Übereinstimmung	Betätigungsrichtung des Stellteils muss mit Bewegungsrichtung des Maschinenteils übereinstimmen	DIN 1410 (2 & 3);
Übereinstimmung	Betätigungsrichtung des Stellteils soll mit Bewegungsrichtung des Maschinenteils übereinstimmen	ISO 7752-1 (4.3.2);
Gegensätzliche Handlungen	Bedienteil mit zwei Richtungen; Benutzung von mehreren zusammengehörigen Bedienteilen, jedes nur mit einer Richtung	VDE 0196 (5.1);
Ein Bedienteil	Zunahme: von links nach rechts, von unten nach oben, im Uhrzeigersinn, von Bedienungsperson weg	VDE 0196 (5.1.1);
Zusammengehörenden Bedienteile	Zunahme: rechts von, darüber, hinter	VDE 0196 (5.1.2);
Aus-Wirkung - ein Bedienteil	Bewegung nur in eine Richtung möglich: linkes, unteres, oder dem entgegen Uhrzeigersinn befindliches Ende	VDE 0196 (5.2); VDE 0113-103 (5.5);
Aus-Wirkung - ein Bedienteil	In zwei entgegengesetzte Richtungen: Mitte des Bewegungsbereichs	VDE 0196 (5.2); VDE 0113-103 (5.5);
Aus-Wirkung - zusammengehörige Bedienteile	Eine Wirkung der Bedienteile: linkes, unteres Ende der Gruppe	VDE 0196 (5.2); VDE 0113-103 (5.5);
Aus-Wirkung - zusammengehörige Bedienteile	Gegensätzliche Bedienteile: Mitte	VDE 0196 (5.2); VDE 0113-103 (5.5);
Heben und Senken mit Hebel	Nach hinten (zu Bediener) Heben, nach vorne Senken	VDE 0196 (7.3);
Stellteil mit selbsttätiger Rückstellung	Ständige Betätigung des Steuergeräts muss erforderlich sein, um Betrieb zu erreichen	VDE 0113-32 (9.2.6.1);
Rückstellung	Stellteil muss beim Loslassen selbständig in den Aus-Zustand bzw. neutralen Zustand zurück (Ausnahme "Aus"-Schalter)	ISO 7752-1 (4.1.4);
Bedienung	Bewegung eines Stellteils nur aus neutraler Position heraus	ISO 7752-1 (4.1.5);
Fixierung in neutraler Position	Stellteile sollen selbstständig in der neutralen Position verbleiben und nach dem Loslassen automatisch in neutrale Position zurückkehren	ISO 7752-2 (9.2);

A.2.13. Bildschirm

Tabelle A-17: Normative Anforderungen im Bereich Stellteile, Stellteilergonomie - Bildschirm

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Abmessungen	Abmessungen groß genug für schnelle und eindeutige Erkennung	VDE 0196 (7.1.1);
Sicherheitsbereich	Sicherheitsbereich größer als Normalfeld mit Freiraum dazwischen	VDE 0196 (7.7.2);
Zufällige Betätigung	Gefährliche Handlungen müssen vor zufälligem Berühren geschützt sein	VDE 0196 (7.7.3);
Freigabe	Ausführungsfreigabe durch getrennt angeordnetes Bedienteil oder zweite Betätigung desselben Bedienteils	VDE 0196 (7.7.5);

A.3. Sicherheitsvorgaben

A.3.1. Allgemein

Tabelle A-18: Normative Anforderungen im Bereich Sicherheitsvorgaben - Allgemein

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Geschwindigkeitsbereich	Fahrbewegungen bis zu 80 m/min empfohlen	VDI 4412 (5 a);
Anhalten	Steuerbefehl zum Ausschalten muss spätestens nach 550 ms am Ausgang anstehen (DIN EN 60204-1)	VDI 4412 (7.1);
Turmdrehkrane	Sichtbar angebrachtes, dauerhaft grün leuchtendes Licht	VDI 4412 (7.1);
Turmdrehkrane	Gelbes Licht, wenn Annäherung an Tragfähigkeit (aber noch innerhalb des Reaktionsbereichs) Erfolg (nicht erforderlich, wenn Info auf Fernsteuerung) (DIN EN 14439)	VDI 4412 (7.1);
Ex-Schutz	Ex-Schutz für kabellose Steuerungen in explosionsgefährdeten Bereichen	VDI 4412 (8.2);
Ausfallsicherung	Zusätzliche Einrichtungen, die bei Steuerungsausfall den Kran in einen sicheren Zustand bringen lassen (Ersatzsender, Umschaltmöglichkeit auf ehemalige Kabinensteuerung, Kabelgebundene Steuerung für Notfunktionen)	VDI 4412 (8.5);
Warnleuchten	Warnleuchten während Fahrbewegung (bei Fahrwerken oder führenden Fahrgestellen von schienenengebundenen Kranen)	VDI 4412 (10);
Mehrere Steuergeräte: Zugriff	Nur ein Steuergerät darf Zugriff haben: am Kran ist optisch anzuzeigen, welches Steuergerät oder welcher Steuerstand Zugriff hat	VDI 4412 (10);
Mehrere Steuergeräte: Übergabe	Übergabe nur bei Stillstand aller Bewegungen und wenn das erste Gerät den Kran freigegeben hat	VDI 4412 (10);
Lokale Steuerungsfunktion	Mittel zur Anwahl müssen außerhalb des Gefahrenbereichs sein	DIN EN ISO 13849-1 (5.2.4);
Lokale Steuerungsfunktion	Darf nur in Bereich, der durch Risikobeurteilung definiert wurde, Gefährdungsbedingungen auslösen	DIN EN ISO 13849-1 (5.2.4);
Sicherheitsbezogene Parameter	Bei Abweichung (z.B. Geschwindigkeit, Position) muss Steuerung Maßnahmen einleiten (z.B. Stopp, Warnsignal, Alarm)	DIN EN ISO 13849-1 (5.2.7);

A.3.2. Informationen

Tabelle A-19: Normative Anforderungen im Bereich Sicherheitsvorgaben - Informationen

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Warnhinweise	Schild am Zugang auf dem Kran, das aussagt, dass der Kran mit einer kabellosen Fernsteuerung ausgerüstet ist	DIN EN 13557 (C.8);
Warnhinweise	Ständig sichtbare Warnung, solange die kabellose Fernsteuerung eingeschaltet ist, oder eine automatische akustische und/oder sichtbare Warnung vor jeder Kranbewegung	DIN EN 13557 (C.8);
Betriebsanleitung	Informationen, dass sichergestellt ist, die kabellose Steuerung andere Systeme am Ort nicht stört oder von diesen gestört wird	DIN EN 13557 (C.9.1);
Betriebsanleitung	Tatsächliche Verzögerung für die Stopp-Funktion nach DIN EN 13557 C.3.2	DIN EN 13557 (C.9.2);
Validierung	Überprüfung festgelegter Anforderungen muss durch Hersteller angemessener in Form (visueller Inspektion, Analyse und/oder Prüfungen) durchgeführt werden	VDE 0113-1-1 (5);
Gebrauchsanweisung	Informationen zur Identifizierung, Transport, Installation, Betrieb, Wartung und Außerbetriebnahme und Entsorgung	VDE 0113-1-1 (6.1);
Gebrauchsanweisung - Informationen	Name; allgemeine Beschreibung; Umwelt- und Betriebsbedingungen; Leistungspegel emittierter Strahlung; Details Betriebsspannung; Nennbetriebsreichweite mit freier Sichtlinie; Anweisung zur Behebung möglicher Störungen; Details zu allen Stellteilen der Steuerung; ob automatisches Abschalten vorgesehen (Dauer der neutralen Übertragung); Selbsthaltefunktion vorgesehen?; Kommunikationspaarung werkseitig voreingestellt oder benutzerdefinierbar; funktionale Spezifikation sicherheitsrelevanter Steuerungsfunktionen; automatische Stoppfunktion; sicherheitsbezogene Steuerungsfunktion (SIL, PL?); Details jeder Ursache für Stoppbefehl; Ausweisung von Stopp-Rücksetzen und Wiederherstellung nach Kommunikationsverlust; Not-Halt; Rücksetzen von Not-Halt von Fernsteuerung nur, wenn man sehen kann, dass Grund für Einleitung gelöst; Angabe der Ausgänge der Basis-Station, die aktiviert werden können, wenn nur neutraler Rahmen empfangen wird; Anweisungen zur Verhinderung von nicht autorisiertem Betrieb; Fehlercodebehandlung & empfohlene Benutzerreaktionen; EMS muss jederzeit verfügbar und betriebsbereit sein; Angaben zu allen Prüfungen für Systemintegrator	VDE 0113-1-1 (6.2);
Typschild	Name, Zertifizierungskennzeichnung, Seriennummer und Modell, Betriebsfrequenzbandbreite, Nennspannung, (Batterien, Markierungen)	VDE 0113-1-1 (7);
Kennzeichnung der Steuerausrüstung	Leistungsschild am Gehäuse: Name, Zulassungszeichen, Seriennummer Bemessungsspannung, Phasenzahl und Frequenz und Bemessungsstrom; Nummer der Hauptdokumentation, Kurzschluss-Auslegung	VDE 0113-32 (16.4);
Warnhinweise	Hinweis auf Funksteuerung am Kran	ISO 7752-1 (A.2)
Warnhinweise	Entweder kontinuierliche optische Warnung während Verbindung mit Funkfernbedienung oder eine akustische und/oder optische Warnung vor Bewegungen des Krans (sofern keine Ausnahmeregelung für bestimmte Kranarten vorliegt)	ISO 7752-1 (A.2)

A.3.3. Start-Stopp-Funktionen

Tabelle A-20: Normative Anforderungen im Bereich Sicherheitsvorgaben - Start-Stopp-Funktionen

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Stopp-Funktion	Sicherheitsverhalten: Kategorie 3 oder höher (EN 954-1, 6.2.4)	DIN EN 13557 (C.2.1)
Zeitraahmen	Steuerung muss alle Kranbewegungen zum Stillstand bringen, wenn innerhalb von 0,5 s kein gültiger Datenrahmen korrekt empfangen wurde (falls erforderlich, Erhöhung auf 2 s möglich)	DIN EN 13557 (C.3.2)
Energielos Schalten	Der Stopp nach C.3.2 muss auch den Kranschalter energielos schalten, außer der Empfänger überwacht, dass die Ausgänge des Steuerungssystems mit den Ausgängen des Empfängers übereinstimmen. Ist dies der Fall, darf das energielose Schalten des Kranschalers bis zu 5 Minuten verzögert werden.	DIN EN 13557 (C.3.3)
Not-Aus	Wenn ein Not-Halt nach Kategorie 0, wie in EN 60204-32:1998, 9.2.5.4.2 gefordert, irgendeine zusätzliche Gefährdung darstellt, darf die Stopp-Funktion Kategorie 1 entsprechen.	DIN EN 13557 (C.3.4)
Stopp	Stoppfunktion als gesonderte und eindeutig erkennbare Möglichkeit; darf nicht als NOT-HALT-Gerät markiert sein	VDE 0113-32 (9.2.7.3);
Stopp	Kategorie 0 oder 1	VDE 0113-32 (9.2.7.3);
Stopp	Vorrang vor allen andere Funktionen und Arbeitsgängen; Zurücksetzen kein Neustart	VDE 0113-32 (9.2.7.3);
Stopp	So ausgelegt, das Einzelfehler in irgendeinem seiner Teile nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion führen	VDE 0113-32 (9.2.7.3);
Stopp	Not-Halt in drahtlose Steuergeräte (IEC/TC 44 in Beratung)	VDE 0113-32 (9.2.7.3);
Stopp	Reaktionszeit nicht > 550 ms	VDE 0113-32 (9.2.7.3);
Stopp	Automatischer Stopp: Fehler im drahtlosen Steuerungssystem, kein gültiges Signal innerhalb von 0,5s (außer bei vorprogrammierter Steuerung); max. Erhöhung auf 2s	VDE 0113-32 (9.2.7.3);
Sicherheitsfunktionen	Anforderungen nach IEC 62061 oder ISO 13849-1/2	VDE 0113-1-1 (4.6);
Sicherheitsfunktionen	Bei Erkennen von Störungen alle sicherheitsbezogenen Ausgänge in AUS-Zustand	VDE 0113-1-1 (4.6);
Stoppfunktion	Eine automatische Stoppfunktion und mindesten eine sicherheitsrelevanten Stoppfunktion durch bewusste menschliche Handlung	VDE 0113-1-1 (4.7.1);
Sicherheitsbezogene Abschaltfunktionen	Sicherheitsintegrität von SIL1/PLC	VDE 0113-1-1 (4.7.2);
Sicherheitsbezogene Abschaltfunktionen	Fehler in Teil der Steuerung darf nicht zu Verlust einer sicherheitsbezogene Abschaltfunktion führen	VDE 0113-1-1 (4.7.2);
Allgemeiner sicherer Stopp (GSS)	Stellteil muss Eigenschaft der Zwangsöffnung besitzen	VDE 0113-1-1 (4.7.3.3);
Allgemeiner sicherer Stopp (GSS)	Nach Beendigung der aktiven Betätigung des Stellteils (nach Einleiten der sicherheitsbezogenen Stoppfunktion), muss Wirkung des Befehls durch Verriegelung des Stellteils weiter aufrecht erhalten bleiben, bis eine manuelle Handlung erfolgt (Stopp-Befehl darf nicht ohne Verriegelung des Stellteils erzeugt werden)	VDE 0113-1-1 (4.7.3.3);
Allgemeiner sicherer Stopp (GSS)	Befehl muss bis zur manuellen Zurücksetzung aufrecht erhalten werden	VDE 0113-1-1 (4.7.3.3);
NOT-HALT-Funktion (EMS)	Markierung als NOT-HALT	VDE 0113-1-1 (4.7.3.4);
NOT-HALT-Funktion (EMS)	Funktion jederzeit verfügbar und betriebsbereit	VDE 0113-1-1 (4.7.3.4);
NOT-HALT-Funktion (EMS)	Einleitung muss in AUS-Zustand an allen sicherheitsbezogenen Stoppausgängen der Basis-Station (Schnittstelle) erfolgen	VDE 0113-1-1 (4.7.3.4);
Automatischer Stopp	Sicherheitsintegrität nicht niedriger als höchste Sicherheitsintegrität aller anderen sicherheitsrelevanten Stoppfunktionen	VDE 0113-1-1 (4.7.3.5);
Zurücksetzen	Durch bewusste Handlung (zusätzlich manuelle Rücksetzaktion nach Aufhebung des verriegelten GSS oder EMS-Stellteils)	VDE 0113-1-1(4.8);
Zurücksetzen	Darf nicht möglich sein, solange ein erkannter Fehler innerhalb der Steuerung vorhanden ist	VDE 0113-1-1(4.8);
Start	Darf nur möglich sein, wenn alle entsprechenden Sicherheitsfunktionen und/oder Schutzmaßnahmen in der richtigen Stellung und betriebsbereit sind	VDE 0113-32 (9.2.5.2);
Stopp	Vorrang vor zugeordneter Start-Funktion	VDE 0113-32 (9.2.5.3);
Stopp	Rücksetzen der Stopp-Funktion darf keinen gefahrbringenden Zustand einleiten	VDE 0113-32 (9.2.5.3);
HOT-Halt, NOT-AUS	Rückstellung des Befehls darf Hebezeug nicht in Gang setzen, sondern nur Wieder-in-Gang-Setzen ermöglichen	VDE 0113-32 (9.2.5.4);
NOT-HALT	Stopp-Kategorie 0 (Energiezufuhr unverzüglich unterbrochen) oder 1 (so gesteuert, dass gefahrbringende Bewegung so schnell wie möglich angehalten wird)	VDE 0113-32 (9.2.5.4.2);
Netzanschlusschalter	Wenn er NOT-AUS erfüllt, muss er leicht zugänglich sein	VDE 0113-32 (5.3.6);
Kranschalter	NOT-HALT muss von Bedienstation aus für alle Bewegungsantriebe bestätigt werden können	VDE 0113-32 (5.3.7.1);
Kranschalter	Anforderungen für Lastschalter nach IEC 60947-3	VDE 0113-32 (5.3.7.2);
Erkennung von Störungen	Bei Erkennen von Störungen alle sicherheitsbezogenen Ausgänge in AUS-Zustand	VDE 0113-1-1(4.6);
Anhaltender Stopp	Anhaltende STOPP-Befehle (z. B. Verriegelung), um einen Wiederanlauf zu verhindern	DIN EN ISO 12100 (2.11.1);
Anhaltender Stopp	Steuerungen müssen so konstruiert sein, dass die Bewegungen von Maschinenteilen, von der Maschine selbst oder von der Maschine gehaltenen Werkstücken und/oder Lasten auf die Parameter für eine sichere Konstruktion begrenzt sind	DIN EN ISO 12100 (2.11.1);
NOT-AUS	Kabellose Steuereinrichtung als einzige Steuerung an Brückenkran: kein Not-Halt-Taster zusätzlich zum Stopp-Taster (wenn keine Zugangsmöglichkeiten zu Kran und kein Zugangsweg am Kran)	DIN EN 15011 (5.3.5.3);
Stopp-Funktion	Sicherheitsbezogene Stoppfunktion muss Vorrang vor betriebsmäßigen Stopp haben	DIN EN ISO 13489-1 (5.2.1);
Manuelle Rückstellfunktion	Getrenntes, manuell zu bedienendes Gerät im sicherheitsbezogenen Teil der Steuerung; darf nur erreicht werden, wenn alle Sicherheitsfunktionen und Schutzvorrichtungen funktionsfähig sind	DIN EN ISO 13489-1 (5.2.2);
Manuelle Rückstellfunktion	Darf keine Bewegung oder Gefährdungssituation einleiten; muss beabsichtigte Handlung sein	DIN EN ISO 13489-1 (5.2.2);
Manuelle Rückstellfunktion	Nur durch Loslassen des Betätigungselements in betätigter (Ein)Position	DIN EN ISO 13489-1 (5.2.2);
Manuelle Rückstellfunktion	Performance Level der sicherheitsbezogenen Teile so, dass Einbeziehung der manuellen Rückstellfunktion die erforderliche Sicherheit der zugehörigen Sicherheitsfunktion nicht mindert	DIN EN ISO 13489-1 (5.2.2);
Verzögerung	Hersteller muss die tatsächliche Verzögerung der Stop-Funktion angeben	ISO 7752-1 (A.3.2);

A.3.4. Tragfähigkeit

Tabelle A-21: Normative Anforderungen im Bereich Sicherheitsvorgaben - Tragfähigkeit

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Tragfähigkeit (Diagramm/Tabelle)	Tragfähigkeit dargestellt auf Fernsteuerpult, auf separaten Schild an Fernsteuerung oder auf vom Boden aus sichtbarem Schild (z.B. am Ausleger)	DIN EN 14439 (7.3.2);
Tragfähigkeitsanzeige	Turmdrehkrane: bei Fernsteuerung darf Tragfähigkeitsanzeigen am Kran installiert sein (optisches Warnsignal)	DIN EN 14439 (5.4.2.5.1);

A.3.5. Akustische Warnung

Tabelle A-22: Normative Anforderungen im Bereich Sicherheitsvorgaben - Akustische Warnung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Betätigung	Brücken- und Portalkrane müssen Warneinrichtung besitzen, die vom Bediener betätigt wird	DIN EN 15011 (5.7.5);
Hörbarkeit	Gefahrensignal muss so sein, dass jede Person es hören kann (evtl. Gehörschutz beachten)	DIN EN ISO 7731 (4.1);
Unterscheidbarkeit	Gefahrensignal muss von Geräuschen der Umgebung ausreichend zu unterscheiden und eindeutig sein	DIN EN ISO 7731 (4.2.1);
Vorrang	Gefahrensignale haben Vorrang vor allen anderen akustischen Signalen	DIN EN ISO 7731 (4.2.1);
Überschreiten der Mithörschwelle	Gefahrensignal muss effektive Mithörschwelle deutlich überschreiten: A-bewerteter Schalldruckpegel darf überall im Signalempfangsbereich nicht niedriger als 65 dB sein	DIN EN ISO 7731 (4.2.2);
Messverfahren	Messverfahren 4.2.2.2	DIN EN ISO 7731 (4.2.2);
Schalldruckpegel	A-bewerteter Schalldruckpegel im Empfangsbereich > 100dB: zusätzlich optische Signale	DIN EN ISO 7731 (4.2.2);
Geräuschemission	Den A-bewerteten Emissions-Schalldruckpegel an der (den) Bedienposition(en) (im Führerhaus und/oder, sofern Fernsteuerung vorgesehen ist, herkömmlicherweise in einem Abstand von 10 m vom Hubwerk entfernt bestimmt, siehe D.3), sofern er 70 dB überschreitet; falls dieser Pegel 70 dB nicht überschreitet, ist eine entsprechende Angabe zu machen. Die Angabe des Wertes muss das Format einer Einzahl- Angabe nach EN ISO 4871 aufweisen:	DIN EN 14439 (7.2.5);
Max. Lautstärke	Max. 118 dB im Empfangsbereich	DIN EN ISO 7731 (4.2.2);
Schalldruckpegel - Bereich	Überschreitung des Störschallpegels um ≥ 15 dB und A-bewerteter Schalldruckpegel ≥ 65 (bei deutlicher Unterscheidung vom Störschall kann geringer Pegel ausreichend sein)	DIN EN ISO 7731 (6.2);
Schalldruckpegel - Grenzen	Vermeidung von zu hohem Schalldruckpegel (z.B. mehr als 30 dB in 0,5 s)	DIN EN ISO 7731 (6.2);
Frequenzmerkmale	Frequenzbereich: 500 - 2500 Hz; zwei Hauptkomponenten: 500 - 1500 Hz	DIN EN ISO 7731 (6.3);
Zeitverlauf	Pulsierende Signale (Pulsfrequenz 0,5 - 4 Hz) bevorzugen, unterscheidbar von Störschall	DIN EN ISO 7731 (6.4.1);
Zeitverlauf Frequenzen	Durchlauf der Grundfrequenzen von 500 -1000 Hz	DIN EN ISO 7731 (6.4.2);
Zeitdauer	Spätestens 1s nach Beginn über 2 s	DIN EN ISO 7731 (6.4.3);
Warnsignal	Einrichtung zur Warnung von Personen in Umgebung, um zu signalisieren, dass der Kran in Betrieb ist (akustisches Signal oder Blinklichter)	DIN EN 12999 (5.6.6);
Warnsignal	Hörbare Warneinrichtung, z. B. Hupe: muss vom Bediener von jedem Steuerstand aus auszulösen sein, es sei denn, der Steuerstand ist nicht für den Normalbetrieb vorgesehen	DIN EN 12999 (5.6.6);
Warnsignal	Unterscheidbar von den Betriebssignalen	ISO 7752-1 (5.1.1);

A.3.6. Elektrische Ausrüstung

Tabelle A-23: Normative Anforderungen im Bereich Sicherheitsvorgaben - Elektrische Ausrüstung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Allgemein	Elektrische Ausrüstung muss Sicherheitsanforderungen erfüllen, die mit Risikobeurteilung ermittelt wurden	VDE 0113-32 (4.2.3);
Leistungsschütze	Zuordnungsart 2 nach IEC 60947-4-1, 8.2.5.1	VDE 0113-32 (4.2.2);
Leistungsschütze	Verhindern von Kontaktverschleiß	VDE 0113-32 (4.2.2);
Gleichstromversorgung	0,85 ... 1,15 Nennspannung	VDE 0113-32 (4.3.3);
Gleichstromversorgung	Spannungsunterbrechung nicht länger als 5 ms	VDE 0113-32 (4.3.3);
Wechselstromversorgung	0,9 ... 1,1 Nennspannung	VDE 0113-32 (4.3.3);
Wechselstromversorgung	Spannungsunterbrechung nicht länger als 3 ms	VDE 0113-32 (4.3.3);

A.3.7. Architektur

Tabelle A-24: Normative Anforderungen im Bereich Sicherheitsvorgaben - Architektur

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Gestaltungsprozess	Gestaltungsprozesse jeder durch ein sicherheitsrelevantes Steuerungssystem implementierten Sicherheitsfunktion muss mindestens eine Sicherheitsfunktionsspezifikation und Gestaltung des sicherheitsrelevanten Steuerungssystems und die damit verbunden Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten umfassen	VDE 0113-50 (4.2);
Spezifikation einer Sicherheitsanforderung		VDE 0113-50 (5);
Spezifikation der funktionalen Anforderungen	Alle Einzelheiten jeder Sicherheitsfunktion: Beschreibung, Bedingung, Priorität, Betriebshäufigkeit, Bedarfs-Betriebsart, Reaktionszeit, Schnittstellen, Prüfungen, Beschreibung der Fehlzustandsreaktionsfunktionen, Betriebsumgebung	VDE 0113-50 (5.2.2);
Architektur des sicherheitsrelevanten Steuerungssystems	Jede Sicherheitsfunktion muss in Struktur aus Subfunktion(en) aufgeschlüsselt werden	VDE 0113-50 (6.2.2);
Architektur des sicherheitsrelevanten Steuerungssystems	Jede Subfunktion: Sicherheitsanforderungen, Eingaben und Ausgaben	VDE 0113-50 (6.2.2);
Sicherheitsanforderungen des sicherheitsrelevanten Steuerungssystems	Sicherheitsanforderungsstufe, die von dem sicherheitsrelevanten Steuerungssystem erreicht werden kann, muss für jede Sicherheitsfunktion separat berücksichtigt werden	VDE 0113-50 (6.3.2);
Hardware-Sicherheitsanforderung	Berechnung	VDE 0113-50 (6.3.2.1);
Gestaltung Subsystemarchitektur		VDE 0113-50 (7);
Softwaregestaltung	8.4.2 Softwaresicherheitsanforderungen nach SW-Stufen	VDE 0113-50 (8.4);
Planung der Validierung der Sicherheit		VDE 0803-2 (7.3);
Sicherheitsanforderungen	System hat sowohl Sicherheitsfunktionen als auch Nichtsicherheitsfunktionen: gesamte Hard- und Software muss als sicherheitsbezogen behandelt werden (außer Unabhängigkeit kann gezeigt werden)	VDE 0803-2 (7.4.2.4);
Sicherheitsanforderungen	Anforderungen an H&S müssen durch Sicherheits-Integritätslevel der Sicherheitsfunktion mit dem höchstem Sicherheits-Integritätslevel bestimmt werden (außer Unabhängigkeit)	VDE 0803-2 (7.4.2.3);
Synthese von Elementen zum Erreichen der erforderlichen systematischen Eignung	Sicherheitsbezogenes System kann in Elemente unterschiedlicher systematischer Eignung aufgeteilt werden	VDE 0803-2 (7.4.3);
Systematische Eignung	Führt systematischer Fehler (systematische Eignung SC N (N=1,2,3) nicht zu Ausfall der Sicherheitsfunktion sondern nur in Kombination mit zweiten systematischen Fehler (Element mit systematischer Eignung SC N), kann systematische Eignung der Kombination der beiden Elemente als systematische Eignung von SC (N+1) betrachtet werden (bei ausreichender Unabhängigkeit)	VDE 0803-2 (7.4.3.3);
Systematische Eignung	Systematische Eignung einer Kombination kann, wenn jedes Element SC N besitzt, höchstens SC (N+1) betragen	VDE 0803-2 (7.4.3.2);
Unabhängigkeit von Elementen	Ausreichende Unabhängigkeit muss durch Analyse gemeinsamer Ursachen begründet werden, um zu zeigen, dass Wahrscheinlichkeit einer Beeinträchtigung zwischen Elementen und zwischen Elementen und Umgebung ausreichend gering im Vergleich zum Sicherheitsintegritätslevel der betrachteten Sicherheitsfunktion ist	VDE 0803-2 (7.4.3.4);
Quantifizierung der Auswirkung von zufälligen Hardwareausfällen	Für jede Sicherheitsfunktion muss die erreichte Sicherheitsintegrität des sicherheitsbezogenen Systems infolge zufälliger Hardwareausfälle abgeschätzt kleiner oder gleich dem in der Spezifikation der Anforderungen festgelegten Ausfallgrenzwerte sein	VDE 0803-2 (7.4.5.1);
Anforderungen an Systemverhalten bei Erkennung eines Fehlers	Erkennung eines gefahrbringenden Fehlers muss entweder zu festgelegten Reaktion führen, um sicheren Zustand zu erreichen oder aufrechtzuerhalten, oder zur Isolation des fehlerhaften Bestandteils des Teilsystems führen, um weiterhin sicheren Betrieb zu ermöglichen	VDE 0803-2 (7.4.8);
Zusätzliche Anforderungen an Datenkommunikation	Abschätzen des Ausfallmaßes des Kommunikationsprozesses (Übertragungsfehler, Wiederholungen, Verlust, falsche Abfolge, Verfälschung, Einfügung, Verzögerungen und Masquerade)	VDE 0803-2 (7.4.11);
Integration	Angemessene Dokumentation des Integrationstests mit Testergebnissen und Aussagen, ob Ziele und Kriterien erreicht worden sind	VDE 0803-2 (7.5.2.4);
Softwaregestaltung	Software hat sowohl Sicherheitsfunktionen als auch Nichtsicherheitsfunktionen: gesamte Software muss als sicherheitsbezogen behandelt werden (außer Versagen von Nichtsicherheitsfunktion beeinflusst Sicherheitsfunktion nicht nachteilig)	VDE 0803-3 (7.4.2.8);
Softwaregestaltung	Sicherheitsfunktionen verschiedener Sicherheits-Integritätslevel: höchstes Sicherheits-Integritätslevel (außer ausreichend Unabhängigkeit zeigbar)	VDE 0803-3 (7.4.2.9);
Softwaregestaltung	Systematische Eignung eines Softwareelements niedriger als SI-Level der Sicherheitsfunktion: Kombination mit weiteren Elementen, sodass Kombi mindestens dem SI-Level entspricht	VDE 0803-3 (7.4.2.10);

A.3.8. Prüfung

Tabelle A-25: Normative Anforderungen im Bereich Sicherheitsvorgaben - Prüfung

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Vorgehen zur Schockprüfung		VDE 0468-2-27
Schockformen	Halbsinus, Sägezahn, Trapez	VDE 0468-2-27 (4.1);
Vorgehen zur Fallprüfung	Kippfallen und Umstürzen; freies Fallen	VDE 0468-2-31
Umstürzen	Aus üblicher Gebrauchslage Kippen um Grundkante und fallenlassen auf benachbarte Seitenfläche	VDE 0468-2-31 (5.1.3.3);
Kippfallen	Auf Fläche oder auf Kante oder Ecke	VDE 0468-2-31 (5.1.3.1+2);
Freies Fallen	Aus üblicher Gebrauch- und Transportlage	VDE 0468-2-31 (5.2);
Wiederholtes freies Fallen	Vorgegebene Anzahl von Stürzen	VDE 0468-2-31 (5.3);
Tragbare Bedienstation	Unbeabsichtigter Betrieb durch Stöße und Vibrationen muss minimiert werden	VDE 0113-32 (10.1.5)
Tragbare Bedienstation	Prüfungen: Freifallprüfung IEC 60068-2-32; Schockprüfung IEC 60068-2-27	VDE 0113-32 (10.1.5)

A.3.9. Elektromagnetische Verträglichkeit

Tabelle A-26: Normative Anforderungen im Bereich Sicherheitsvorgaben - Elektromagnetische Verträglichkeit

Bezeichnung	Anforderung	Norm
Allgemein	Keine elektromagnetisch Störung oberhalb des für vorgesehene Betriebsumgebung zulässigen Niveaus	VDE 0113-32 (4.4.2);
Grenzwerte	EMV Gruppennormen IEC 61000-6-1 bis 4 legen Grenzwerte für Störaussendung und Störfestigkeit fest	VDE 0113-32 (4.4.2);
Vorgaben	Für Störfestigkeit muss das elektrische System mit EN 61000-6-2 übereinstimmen	DIN EN 12999 (5.9.2)
Vorgaben	Für Störaussendung muss das elektrische System mit EN 61000-6-4 übereinstimmen	DIN EN 12999 (5.9.2)
Maßnahmen gegen elektromagnetische Störungen	Filtern der Energieversorgung, Abschirmen der Kabel, Gehäuse konzipiert, um hochfrequente Abstrahlung zu minimieren; Funkenstörtechniken	VDE 0113-32 (4.4.2);
Maßnahmen für Widerstandsfähigkeit gegen leitungsgebundene und abgestrahlte Hochfrequenzstörung	Funktionspotentialausgleich: Verbindungen empfindlicher Stromkreise an Masse, Verbindungen der Masse zur Erde	VDE 0113-32 (4.4.2);
Maßnahmen für Widerstandsfähigkeit gegen leitungsgebundene und abgestrahlte Hochfrequenzstörung	Direkte Verbindung empfindliche elektrische Ausrüstung oder Stromkreise mit Schutzleiterkreis oder Leiter der Funktionserdung	VDE 0113-32 (4.4.2);
Maßnahmen für Widerstandsfähigkeit gegen leitungsgebundene und abgestrahlte Hochfrequenzstörung	Räumliche Trennung empfindlicher Kreise von Störquellen	VDE 0113-32 (4.4.2);
Maßnahmen für Widerstandsfähigkeit gegen leitungsgebundene und abgestrahlte Hochfrequenzstörung	Gehäuse konzipiert um hochfrequente Ein- und Abstrahlung zu minimieren	VDE 0113-32 (4.4.2);
Maßnahmen für Widerstandsfähigkeit gegen leitungsgebundene und abgestrahlte Hochfrequenzstörung	EMV-gerechte Verdrahtungspraxis: Verdrehte Leiter (Vermindern der Auswirkung von Gegentaktstörungen); ausreichender Abstand zwischen Störungen aussenden Leitern und Leitern empfindlicher Stromkreise; Ausrichtung der Kabel und Leitungen bei Kreuzungen so gut wie möglich auf 90°; Weiterführungen: so dicht wie möglich an Masseebene; Benetzung von elektrostatischen und/oder elektromagnetischen Abschirmungen mit Anschlüssen niedriger Hochfrequenzimpedanz	VDE 0113-32 (4.4.2);
Funktionale Sicherheit	Sicherheitsintegrität = Wahrscheinlichkeit, dass ein sicherheitsbezogenes System die erforderlichen Sicherheitsfunktionen unter sämtlichen angegebenen Bedingungen innerhalb eines angegebenen Zeitraums zufriedenstellend ausführt	VDE 0839-1-2 (5.1);
Erreichen der funktionalen Sicherheit im Hinblick auf elektromagnetische Störgrößen	Schritte im Entwurfsprozesse	VDE 0839-1-2 (5.4);
Erreichen der funktionalen Sicherheit im Hinblick auf elektromagnetische Störgrößen	EMV auf andere Systeme sicherstellen	VDE 0839-1-2 (7);
EMV-Gesichtspunkte auf Systemebenen	Elektromagnetische Eigenschaften eines sicherheitsbezogenen Systems hängen von elektromagnetischen Eigenschaften jedes einzelnen Betriebsmittels ab	VDE 0839-1-2 (7.2);
EMV-Gesichtspunkte auf Geräteebene	Einflussfaktoren: äußere Umgebung, lokale elektromagnetische Umgebung (andere Betriebsmittel in unmittelbarer Nachbarschaft), Anforderungen aus System-/Geräteaspekte	VDE 0839-1-2 (7.3);
EMV-Prüfungen		VDE 0839-1-2 (9);

A.4. Weitere ergonomische Kennwerte

Es existieren zusätzlich zu den Normen und Richtlinien aus dem vorangegangenen Abschnitt umfangreiche Quellen mit ergonomischen Kennwerten zur Systemgestaltung. Schmidtke et al. geben in [Sch-2013] einen ausführlichen Überblick über alle ergonomischen Kennwerte, die sich für die Gestaltung technischer Systeme aus Normen, normähnlichen Richtlinien, wissenschaftlichen Publikationen und Erfahrungswerten ergeben. Da

die für Kransteuerungen wesentlichen Kennwerte bereits in den normativen Anforderungen enthalten sind, wird auf eine ausführliche Darstellung im Rahmen des vorliegenden Berichts verzichtet.

B. Erklärvideos zur Online-Studie (Wortlaut)

B.1. Linearhebel

Ein Linearhebel ist eine übliche Funkfernbedienung bei Kransteuerung. Ein Linearhebelsystem hat in der Regel mehrere Linearhebel. Mit jedem Hebel kann genau ein Freiheitsgrad des Krans gesteuert werden. Das heißt, mit dem Vor- und Zurückziehen des Linearhebels bewegt sich der Arm des Krans in seiner positiven und negativen Richtung. In unserem Fall gibt es vier Linearhebel. Sie können sehen, mit welchem Freiheitsgrad die jeweiligen Linearhebel verbunden sind. Für eine flüssige Bewegung in beliebiger Raumrichtung, müssen mehrere Linearhebel in Kombination angesteuert werden.

Sie sehen hier die vier Linearhebel, jeweils mit ihrer Wirkung dargestellt. Die Pfeile auf der linken Seite stehen für das Vor- bzw. Zurückziehen des Hebels. Sollte ein Linearhebel Ihrer Meinung nach für die Bewegung irrelevant sein, wählen Sie bitte die Option „keine Steuerung“. In der Vogelperspektive ist eine Drehung im Uhrzeigersinn zu erkennen. Gemäß der Icons wählen Sie nun den richtigen Linearhebel aus. Der Beschriftung folgend entspricht eine Bewegung des Linearhebels nach oben einer Drehung im Uhrzeigersinn. Daher klicken Sie nun den Pfeil nach oben an und haben so den ersten Teil der Lösung. Neben einer Drehung hat sich der Arm des Krans außerdem verkürzt. Im Video ist zu erkennen, dass die beiden Knickarme in der Mitte daran beteiligt sind. Wie bei der Drehung, können Sie die richtige Lösung auch hier anhand der Beschriftung bestimmen. Da der letzte Arm des Krans in dieser Bewegung keine Rolle gespielt hat, wählen Sie bei diesem Linearhebel einfach „keine Steuerung“.

B.2. Meisterschalter

Ein Meisterschalter, oder besser bekannt unter dem Namen Joystick, ist eine übliche Funkfernbedienung bei Kransteuerung. Mit dem Meisterschalter kann man die Position der Last direkt steuern, ohne sich über die genauen Bewegungsmechanismen des Krans Gedanken machen zu müssen. Die gezeigte Steuerung erkennt automatisch die Position des Bedieners relativ zur Last, sodass eine Bewegung des Joysticks nach rechts stets auch eine Bewegung der Last nach rechts aus der aktuellen Perspektive bedeutet. Nutzen Sie also einfach Ihre eigene Position als Referenzpunkt und steuern Sie die Last, wie sie es für angebracht halten.

Wir haben den kontinuierlichen Meisterschalter hier in 8 Richtungen diskretisiert. Abhängig von der Richtung, in die Sie das Steuerelement bewegen würden, wählen Sie bitte die

entsprechende Option aus (vgl. Abbildung 4-9). Sollten für eine Bewegung mehrere Steuerungsrichtungen nacheinander vonnöten sein, können diese in den Zeilen untereinander gewählt werden.

C. Kommentare und Hinweise zum Anforderungsabgleich

1. Die Verfügbarkeit der intuitiven Laststeuerung ist rein durch die Verfügbarkeit der verwendeten Komponenten (Funksteuerung, Sensorik, Steuergerät) bestimmt. Beim Einsatz von Industrieprodukten mit entsprechend hoher Verfügbarkeit, wie es bei Kransteuerungen üblich ist, ist von einer unverändert hohen Verfügbarkeit der intuitiven Laststeuerung im Vergleich zu herkömmlichen Steuerungen auszugehen.
2. Bei der intuitiven Laststeuerung handelt es sich um ein mechatronisches Bediensystem mit revolutionärem Interaktionsparadigma. Durch den innovativen Charakter kann eine Verletzung von normativen Vorgaben nicht ausgeschlossen werden, da Normen per Definition die aktuellen Regeln der Technik abbilden, und disruptive Änderungen hierüber oft hinausgehen. Neue Interaktionen machen daher häufig angepasste Regeln erforderlich. Wo es sinnvoll möglich war, wurden normative Anforderungen berücksichtigt.
3. Es ist die gleiche funktionale Sicherheit wie bei Serien-Hebemitteln erreichbar, wenn konsequent auf entsprechend zertifizierte Komponenten zurückgegriffen wird. Daher wird die Anforderung als erfüllt betrachtet. Um ein entsprechendes Performance Level der intuitiven Laststeuerung sicherzustellen, ist - über die Inhalte des Forschungsprojekts hinaus - insbesondere auf entsprechend sichere Sensorik zurückzugreifen und eine zertifizierbare Integration der Komponenten sicherzustellen.
4. Der automatische Umgang mit Hindernissen im Kranbetrieb steht nicht im Fokus des vorliegenden Forschungsprojekts. Bedingt durch die große räumliche Ausdehnung von Kranstrukturen und häufig wechselnde Lasten stoßen vorhandene Sensorikkonzepte hier schnell an Grenzen. Im Rahmen der Benutzerentlastung ist es jedoch wünschenswert, den Benutzer nicht nur bei seinen Steuerungsaufgaben, sondern auch bei den Überwachungsaufgaben zu entlasten. Dies sollte Gegenstand weiterer Forschungstätigkeiten sein. Die Wunsch-Anforderung ist nicht erfüllt.
5. Bei der intuitiven Laststeuerung wurde mit CANopen bzw. CANopen-Safety auf ein etabliertes Standardprotokoll zurückgegriffen. Die Übertragbarkeit des Systems ist somit sichergestellt, und kann sowohl in Form einer Adaption an Neugeräte als auch als Nachrüstung erfordern, sofern das Trägersystem CANopen unterstützt. Dies ist bereits bei vielen Geräten der Fall. Grundsätzlich ist das Konzept der intuitiven Laststeuerung auch auf andere Kommunikationssysteme übertragbar.
6. Die Implementierung von erweiterten Robotikfunktionen für automatisierbare Tätigkeiten im Arbeitsraum steht nicht im Fokus des Forschungsprojekts, ist aber Gegenstand weiterer Untersuchungen. Aus diesem Grund wurde der Entwicklung dieser

Funktionen keine Priorität eingeräumt, und die Wunsch-Anforderung kann nicht erfüllt werden.

7. Bei der Systemgestaltung wurde auf etablierte Grundsätze der Dialoggestaltung sowie ein iteratives Gestaltungskonzept zurückgegriffen, die sich nachweislich für die Gestaltung von lernförderlichen Systemen eignen. Die schnelle Erlernbarkeit durch die Probanden der Evaluationsstudie mit äußerst geringem Erkläraufwand spricht für ein lernförderliches System. Insbesondere die Novizen zeigen, dass für die intuitive Laststeuerung kein Vorwissen und keine Erfahrungswerte notwendig sind, was die Lernförderlichkeit des Systems belegt.
8. Die zusätzlichen Hardware-Kosten beschränken sich rein auf die Sensorik und liegen unter 500 €. Die Kosten für die erweiterte Softwarefunktionalität sind Entwicklungskosten und fallen daher nur einmal an. Es entstehen keine zusätzlichen Wartungskosten.
9. Der Betriebstemperaturbereich von -30°C bis 50°C kann aufgrund der verwendeten Sensorik zur Messung der Benutzerorientierung mit dem Demonstrator nicht realisiert werden. Es existiert jedoch vergleichbare Sensorik, die die angegebene Temperaturspezifikation problemlos erfüllt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass sich diese Anforderung in zukünftigen Systemen erfüllen lässt.
10. Im Rahmen des Forschungsprojekts findet keine Zertifizierung des Systems im Rahmen der Maschinenrichtlinie statt. Daher kann auch keine letztgültige Aussage hierüber getroffen werden. Gespräche mit Kran- und Steuerungsherstellern lassen aber darauf schließen, dass sich das Konzept im Rahmen der Maschinenrichtlinie umsetzen lässt, wenn entsprechend dokumentierte Sicherheits- und Fehleranalysen durchgeführt werden.
11. Als Demonstrator-Kran kommt ein LKW-Ladekran mit einer maximalen Ausladung von 11,1 m und einer maximalen Hublast von ca. 400 kg (bei größtmöglicher Ausladung) zum Einsatz. Die Arbeitsgeschwindigkeiten der Einzelgelenke sind gleich oder größer der angegebenen Werte. Die Anforderungen sind erfüllt.
12. Es wird mit CANopen bzw. CANopen-Safety auf ein Standard-Busprotokoll zurückgegriffen. Die verwendeten Steckverbindungen entsprechen aktuellem Industriestandard.
13. Es findet - mit Ausnahme der kraninternen Überlastsicherung - keine Hublasterkennung und demzufolge keine Rückspiegelung auf die Funksteuerungs-Displays statt. Diese Funktionalitäten waren für die Entwicklung der intuitiven Laststeuerung nicht prioritär. Die Wunsch-Anforderung ist nicht erfüllt.
14. Durch die Verwendung von CANopen bzw. CANopen-Safety können die Steuerungs- und Sensorwerte einfach aus dem CAN-Bus ausgelesen und geloggt werden.
15. Bei den genannten Funktionen handelt es sich um erweiterte Funktionalitäten, die für die Entwicklung des Steuerungskonzepts nicht notwendig waren. Die Implementie-

nung von erweiterten Robotikfunktionen für automatisierbare Tätigkeiten im Arbeitsraum steht nicht im Fokus des Forschungsprojekts, ist aber Gegenstand weiterer Untersuchungen. Aus diesem Grund wurde der Entwicklung dieser Funktionen keine Priorität eingeräumt, und die Kann - bzw. Wunsch-Anforderungen können nicht erfüllt werden.

16. Die intuitive Laststeuerung besitzt - analog zu vielen aktuellen Kran-Funksteuerungen - keinen Totmannknopf. Die Soll-Anforderung ist nicht erfüllt, kann aber in zukünftigen Systemen vorgesehen werden.
17. Die intuitive Laststeuerung besitzt eine Not-Stop-Funktion mit Performance Level d, Kategorie 3 nach [Deu-2016d].
18. Kranbewegungen werden bei der intuitiven Laststeuerung nur durch Joystickbewegungen ausgelöst. Der auf der Oberseite der Funksteuerung umlaufende Grifftrand schützt die Joysticks vor ungewollter Betätigung.
19. Die Funksteuerung sowie das Steuergerät haben entsprechende EMV-Tests beim Hersteller durchlaufen und gelten damit als robust gegenüber elektromagnetischen Störungen. Für die Sensorik zur Messung der Benutzerorientierung ist hierzu nichts bekannt. Daher gilt diese Anforderung nur als teilweise erfüllt.
20. Der Nutzen von haptischer Rückmeldung bei der Teleoperation von Maschinen ist wissenschaftlich umstritten und die Qualität der Schnittstelle ist von vielen äußeren Faktoren abhängig. Zudem wird eine haptische Rückmeldung von verschiedenen Bedienern sehr unterschiedlich beurteilt. Um ein System zu entwickeln, dass für möglichst viele Bediener angenehm ist, wird daher auf eine haptische Rückmeldung verzichtet. Die Soll-Anforderung ist nicht erfüllt.
21. Es ist - analog zu vielen aktuellen Kran-Funksteuerungen - kein Zustimmschalter verbaut. Typische Fehlerfälle, wie z. B. herunterfallende oder unachtsam abgelegte Steuerungen oder zu große Neigungen des Funksenders, werden durch Inertialsensorik erkannt und führen zum Abschalten der Steuerung. Die Anforderung nach einem Zustimmschalter ist somit indirekt erfüllt: Nur in plausiblen Fällen bewirkt eine Benutzereingabe eine entsprechende Kranbewegung.
22. Zur haptischen Rückmeldung siehe Kommentar Nummer 20.
23. Die Bedienung mit einer Hand ist möglich, aber nicht zu empfehlen. Bei der Einhandbedienung kann die Last nicht gleichzeitig in der x-y-Ebene sowie in z-Richtung bewegt werden. Daher ist diese Kann-Anforderung nur teilweise erfüllt.