

Handhabungs- und Montagekonzept für schwere Lasten in der Nutzfahrzeugproduktion

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von
Mathias Matheis

**Saarbrücken
2023**

Tag des Kolloquiums: 03.03.2023
Dekanin/Dekan: Univ.-Prof. Dr. Ludger Santen
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller
Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. Christian Bur

Kurzzusammenfassung

Die Nutzfahrzeugproduktion ist durch eine hohe Variantenvielfalt gekennzeichnet. Im Bereich der Montage müssen eine Vielzahl sperriger und schwerer Lasten bei engen Toleranzen gehandhabt werden. Die Tätigkeiten sind geprägt von einem hohen Anteil manueller Prozesse. Betriebsmittel wie Krane und Hebezeuge unterstützen die Mitarbeiter dabei meist nur beim Heben der Last.

Die Entwicklung eines intelligenten, teilautomatisierbaren Unterstützungssystems soll zur Verbesserung der Ergonomie, Akzeptanz, Arbeitssicherheit, Qualität und Prozesszeit der Handhabungsaufgaben beitragen.

Das Augenmerk auf Modularität und Skalierbarkeit sowie die Fokussierung auf den Menschen und damit einhergehend die Themen Ergonomie und Usability ermöglichen eine anforderungsgerechte Umsetzung und stellen eine Übertragbarkeit sicher.

Charakteristisch für das Konzept ist die Unterteilung in eine servomotorisch unterstützte Positionierkinematik und eine passiv ausgeführte Orientierkinematik. Die Positionierkinematik übernimmt dabei das Zuführen der Last und die Orientierkinematik ist für die feinen Rotationsbewegungen am Montageort und für die Lastaufnahme zuständig.

Das Konzept wurde als Demonstrator aufgebaut und validiert. Im Vordergrund stand dabei die Auslegung der Bedienung durch direkte Manipulation an der Last. Darüber hinaus wurden die Teilautomatisierbarkeit im Rahmen der Mensch-Roboter-Kollaboration untersucht sowie Ergonomieeinflüsse und Usability bewertet.

Abstract

The commercial vehicle production is characterized by a high variance. In the area of assembly, a large number of bulky and heavy loads need to be handled with close tolerances. The tasks often include a high proportion of manual processes. Manufacturing equipment including cranes and hoists usually only support the employees when they lift the loads.

The development of an intelligent, partially automatable assist device should contribute to the improvement of ergonomics, worker acceptance, occupational safety, quality and process time of the handling tasks.

The attention on modularity and scalability as well as the focus on the human worker and the associated topics of ergonomics and usability enable the requirements-based realization and ensure the transferability.

A distinctive feature of the concept is the segmentation into a servo-driven positioning-kinematics and a passive orientation-kinematics. The positioning-kinematics executes the load motion part "supply/feeding" and the orientation-kinematics is responsible for the load motion part "fine rotary movements" at the assembly point and for the load attachment.

The concept was set up and validated as a demonstrator. In the foreground thereby was the operator control design through direct manipulation at the load. In addition, an examination of a semi-automation functionality in the context of human-robot collaboration was conducted and ergonomic influences and usability were evaluated.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als angestellter Doktorand im Bereich Technologiemanagement Trucks der Daimler AG in Stuttgart. An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen danken, die mich bei der Anfertigung meiner Doktorarbeit unterstützt haben.

- Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller, als Leiter des Lehrstuhls Montagesysteme an der Universität des Saarlandes und dem Forschungsbereich am ZeMA danke ich sehr für die Betreuung der Arbeit, für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die konstruktiven Gespräche und die daraus entstandenen Ideen und wissenschaftlichen Anregungen und für die allzeit freundliche Unterstützung.
- Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber, Leiter des Lehrstuhls Konstruktionstechnik an der Universität des Saarlandes für die Übernahme des Koreferats sowie für das Interesse und die konstruktiven Hinweise bei der Durchsicht dieser Arbeit.
- Meinen Vorgesetzten bei der Daimler AG Dr. Martin Rohleder, Dr. Anne-Katrin Tomys-Brummerloh, Torsten Grüninger, Torsten Koellner, Dr. Ekkehard Brümmer und Hans-Peter Dörflinger, die mir die Bearbeitung des Themas ermöglicht und mich bei meiner Arbeit begleitet, unterstützt und motiviert haben.
- Herrn Paul Dick und dem Team der EEPOS GmbH für die freundliche und hilfsbereite Unterstützung beim Aufbau des Demonstrators, der Durchführung der Validierungsversuche sowie für die partnerschaftliche Bearbeitung der Forschungs- und Entwicklungsaufgabe.
- Den wissenschaftlichen Mitarbeitern des ZeMAs Ortwin Mailahn, Andreas Ginschel und Tobias Masiak für die kreativen Workshops und ihr Engagement bei begleitenden Projektarbeiten sowie dem gesamten ZeMA Team für die stets offene und freundliche Zusammenarbeit.
- Den Bachelor- und Masterarbeitern Denis Hessel, Isabell Mencher, Sören Roman Marko und Christian Riemer für den Einsatz und das Engagement bei ihren Abschlussarbeiten, die bedeutsame Beiträge zu dieser Arbeit hervorgebracht haben.
- Meinem Kollegen Dr.-Ing. Urs Eisele für die wissenschaftlichen Diskussionen, die fachliche und methodische Unterstützung und die freundschaftlich geprägte Zeit.
- Meinen Eltern Liane und Hans Matheis sowie meinem Bruder Sebastian Matheis für die immer uneingeschränkte Unterstützung und großartige Motivation, die mir die Anfertigung dieser Arbeit ermöglicht haben. Vielen Dank!

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Technik in Forschung und Industrie	6
2.1	Abgrenzung Montage und Handhabung in der Produktion	6
2.1.1	Montage	8
2.1.2	Handhabung	10
2.2	Gliederung von Handhabungs- und Bewegungseinrichtungen	14
2.2.1	Gliederung von Handhabungseinrichtungen	15
2.2.2	Gliederung von Bewegungseinrichtungen	16
2.3	Programmgesteuerte Bewegungsautomaten	17
2.4	Manuell gesteuerte Bewegungseinrichtungen	18
2.4.1	Manipulatoren	18
2.4.2	Teleoperatoren	22
2.4.3	Hebezeuge	23
2.4.4	Steuerungsvarianten von Balancern	26
2.5	Teilautomatisierbare intelligente Unterstützungssysteme (IAD)	28
2.5.1	Einordnung der assistierenden Handhabungstechnik	28
2.5.2	Funktionen intelligenter assistierender Handhabungsgeräte	32
2.5.3	Vorteile intelligenter assistierender Handhabungsgeräte	33
2.5.4	Beispielhafte IAD aus Forschung und Industrie	35
2.6	Fazit zum Stand der Technik in Forschung und Industrie	39
3	Analyse und Anforderungen	41
3.1	Analysebereich Lkw-Montage	41
3.2	Handhabungsgeräte in der Lkw-Montage	45
3.2.1	Handhabungsgeräte im Fahrerhausinnenausbau	45
3.2.2	Handhabungsgeräte in der Aufbaumontage	46
3.3	Analyse der kinematischen Struktur von Handhabungsgeräten	49
3.3.1	Kinematischer Aufbau und Regionalstrukturen	50
3.3.2	Analyse der Regionalstrukturen von Manipulatoren	53
3.4	Prozessanalyse und Ableitungen von Anforderungen	57
3.4.1	Prozessanalyse	57
3.4.2	Exemplarischer Montageprozess ATS-Box	63
3.4.3	Hauptanforderungen an Konzept	72

4	Konzept	76
4.1	Modularer Aufbau des Konzepts	76
4.2	Modul Positionier-Kinematik.....	79
4.3	Modul Sensorik	80
4.3.1	Sensorbox Horizontalbewegungen	80
4.3.2	Elektronischer Vertikalbalancer.....	83
4.4	Modul Orientier-Kinematik und Lastaufnahme	87
4.4.1	Anforderungen an Lastaufnahmeeinrichtung und Low-Cost-Ansatz	87
4.4.2	Methodische Vorgehensweise zum Entwerfen von Lastaufnahmemitteln	91
4.4.3	Funktionsanalyse und Funktionsstruktur für Lastaufnahmemittel...93	
5	Realisierung des modularen IAD-Konzepts	97
5.1	Aufbau des Demonstrators.....	97
5.1.1	Demonstrator – Modul Positionier Kinematik	98
5.1.2	Demonstrator – Modul Sensorik.....	100
5.1.3	Demonstrator – Modul Orientier-Kinematik und Lastaufnahmemittel.....	101
5.1.4	Demonstrator – Vertikalbalancer und Bediengriff.....	102
5.1.5	Demonstrator – Experimentalumgebung.....	103
5.2	Parametrierung und Optimierung der Steuerung	104
5.2.1	Grundlegendes Steuerungs- und Regelungskonzept Sensorbox.....	104
5.2.2	Kalibrierung Sensorbox.....	106
5.2.3	Parametrierung mittels statistischer Versuchsplanung.....	110
5.2.4	Zusatz- und Sicherheitsfunktionen	121
5.3	Validierung der Usability und Ergebnisse.....	125
5.3.1	Ergonomievergleich – Kraftmesshandschuh	125
5.3.2	Teilautomatisierbarkeit des IAD	129
5.3.3	Prototyp LCA-Lastaufnahmemittel	135
5.3.4	Abschließender Vergleich mit Hauptanforderungen.....	138
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	141
6.1	Zusammenfassung.....	141
6.2	Fazit und Ausblick	144
7	Literaturverzeichnis.....	147
8	Anhang	156

Abbildungsverzeichnis

List of figures

Bild 1.1:	Aufbau der Arbeit und Hauptkapitel	3
Bild 2.1:	Produktionsarten (Eigene Darstellung nach [EVER89, S. 11])	7
Bild 2.2:	Montageorganisationsprinzipien, vgl. [EVER89, S. 175–177]; [FELD14, S. 668–669]	7
Bild 2.3:	Teilfunktionen der Montage, vgl. [LOTT82, S. 7–10]; [LOTT12, S. 2]; [JONA00, S. 6–7].....	9
Bild 2.4:	Der Begriff Handhaben im Deutschen und Englischen Sprachgebrauch [HESS16a, S. 16–17]	10
Bild 2.5:	Handhaben als Teilfunktion der Montage, vgl. [LOTT12, S. 2]; vgl. Bild 2.3	11
Bild 2.6:	Handhaben als Teilfunktion des Materialflusses, vgl. [VDI 2860, S. 2].....	11
Bild 2.7:	Koordinatensysteme und Freiheitsgrade eines Handhabungsobjektes, vgl. [VDI 2860, S. 2]; [HESS16a, S. 40]; [HESS16b, S. 446].....	12
Bild 2.8:	Teilfunktionen des Handhabens und deren Gliederung [VDI 2860, S. 4]	13
Bild 2.9:	Handhaben als Basisaufgabe der Montage [MÜLL11, S. 1–2]; vgl. [EILE15, S. 6]	14
Bild 2.10:	Gliederung von Handhabungseinrichtungen nach ihrer Hauptfunktion [VDI 2860, S. 14]	15
Bild 2.11:	Gliederung von Bewegungseinrichtungen nach Hauptfunktion [VDI 2860, S. 14]	16
Bild 2.12:	Gliederung von programmgesteuerten Bewegungsautomaten [VDI 2860, S. 14]	17
Bild 2.13:	Manuell gesteuerte Bewegungseinrichtungen vgl. [VDI 2860, S. 15]; [HESS01, S. 5–6].....	18
Bild 2.14:	Steuerungsarten für Manipulatoren [HESS98, S. 3]	21
Bild 2.15:	Steuerungsarten für Hebezeuge [HESS98, S. 3].....	24
Bild 2.16:	Hebezeuge mit Balancer Steuerung (Eigene Darstellung nach [HESS01, S. 11]; [HESS01, S. 51–59])	25
Bild 2.17:	Balancer Steuerungsvarianten; nach [HESS01, S. 51–52].....	26
Bild 2.18:	Einordnung von IAD in die Gliederung der Handhabungstechnik (vgl. [HESS16a, S. 434]; [HESS16b, S. 338–339]).....	29
Bild 2.19:	Virtuelle Grenzbereiche Admittanz-Prinzip (vgl. [HESS16a, S. 434]; [HESS16b, S. 339])	31
Bild 2.20:	IAD Funktionalitäten (Eigene Darstellung nach [IEEE03, S. 1]).....	33

Bild 2.21:	Technologische Vorteile von IAD (Eigene Darstellung nach [KAZE02, S. 222]).....	33
Bild 2.22:	IAD Bedienstruktur Varianten (vgl. [BICC08, S. 1342–1343]).....	35
Bild 3.1:	Analysebereich Lkw-Montage – Bsp. Mercedes-Benz Werk Wörth [MATH16a, S. 12/6]; Bildquellen: Daimler Truck	42
Bild 3.2:	Handhabungsgeräte im Bereich Fahrerhausinnenausbau, Bsp. Mercedes-Benz Werk Wörth; Bildquellen: Daimler Truck	46
Bild 3.3:	Konzepte automatisierte Powerpack Montage [WIRT08]; Bildquellen: Daimler Truck.....	47
Bild 3.4:	Pneumatische Manipulatoren in der Aufbaumontage, Bsp. Mercedes-Benz Werk Wörth; Bildquellen: Daimler Truck	48
Bild 3.5:	Elektrische Kettenzug Hebezeuge in der Aufbaumontage, Bsp. Mercedes-Benz Werk Wörth; Bildquellen: Daimler Truck	49
Bild 3.6:	Offene und geschlossene kinematische Ketten (Eigene Darstellung; Bildquelle: [IHS19]).....	51
Bild 3.7:	Bezeichnungsform kinematische Regionalstrukturen; vgl. [SCHO87, S. 27–29].....	52
Bild 3.8:	Praxisvergleich der Regionalstrukturen von Handhabungsgeräten (Eigene Darstellung, Bildquellen: [SCHO87, S. 78]; Unidex; Jäger Handling; Kuka; Strödter)	54
Bild 3.9:	Hettinger-Tabelle (Eigene Darstellung nach [HETT81, S. 39])	58
Bild 3.10:	Vorgehensweise Prozessanalyse	59
Bild 3.11:	Handhabungsprozesse für Bewegungsanalyse; Bildquellen: Daimler Truck	60
Bild 3.12:	ATS-Box Varianten (Eigene Darstellung; Bildquellen: Daimler Truck)	64
Bild 3.13:	Montagerrelevante Produktmerkmale MCS- und SCS-ATS-Box; Bildquellen: Daimler Truck.....	65
Bild 3.14:	Layout ATS-Box Montageprozess; Eigene Darstellung; Bildquellen: Daimler Truck	66
Bild 3.15:	Ladungsträger zur Bereitstellung der ATS-Box	66
Bild 3.16:	Teilprozessschritte ATS-Box Montage; Bildquellen: Daimler Truck....	67
Bild 3.17:	Montagevorranggraph und Prozessschaubild ATS-Box Montage	68
Bild 3.18:	Prozesszeit für Handhabung während ATS-Box Montage.....	69
Bild 3.19:	Handhabungsgerät ATS-Box Montage; Bildquellen: Daimler Truck ...	69
Bild 3.20:	Lastaufnahmemittel ATS-Box Montage; Bildquellen: Daimler Truck ..	70
Bild 3.21:	Randbedingungen und Herausforderungen ATS-Box Montage	71
Bild 3.22:	Anforderungen an das Handhabungskonzept (vgl. [MATH16b, S. 590–591])	73
Bild 4.1:	Modulare Architektur des Konzepts (vgl. [MATH16a, S. 12/11]; [MATH16b, S. 590–591]; [MATH16c, S. 15/7]).....	77
Bild 4.2:	Positionierkinematik basierend auf Kranbaukasten System mit Hubachse	79

Bild 4.3:	Prinzipielle Funktionsweise Sensorbox Horizontalbewegungen (vgl. [MATH16a, S. 12/14]; [MATH16b, S. 591–593]; [MATH16c, S. 15/8])	82
Bild 4.4:	Aufbau EEPOS Prototyp Sensorbox mit Feder-Dämpfer-System (Eigene Darstellung; Bildquelle: EEPOS)	83
Bild 4.5:	Integrationsmöglichkeiten Kraftsensor Bediengriff BINAR Quicklift (Eigene Darstellung nach [BINA19b]; [BINA20a]; [BINA20b]; Bildquelle: BINAR)	85
Bild 4.6:	Integrationsmöglichkeiten Kraftsensor Bediengriff GORBEL G-Force iQ (Eigene Darstellung nach [GORB20, S. 8]; Bildquelle: GORBEL)	86
Bild 4.7:	Unterschiedliche Arten von Lastaufnahmeeinrichtungen (Eigene Darstellung nach [DIN 15003, S. 1–3])	88
Bild 4.8:	Handhabungsobjekte für IAD Konzept.....	89
Bild 4.9:	Methodische Vorgehensweise zur Entwicklung eines Lastaufnahmemittels; vgl. [VDI 2221, S. 9].....	91
Bild 4.10:	Hierarchische Funktionsstruktur – Funktionsbaum.....	95
Bild 4.11:	Verknüpfte Funktionsstruktur	95
Bild 5.1:	Aufbau Demonstrator.....	98
Bild 5.2:	Dimensionen Demonstrator	99
Bild 5.3:	Servomotorisch angetriebener Fahrwerk-Trolley für Kranschienensystem (Eigene Darstellung; Bildquelle: EEPOS)	100
Bild 5.4:	Sensorbox Demonstrator	100
Bild 5.5:	Lastaufnahmemittel Demonstrator.....	101
Bild 5.6:	Integration Seilbalancer Sensorik und Bedieneinheit	102
Bild 5.7:	Experimentelle Versuchsumgebung	104
Bild 5.8:	Systemschema	104
Bild 5.9:	Schema grundlegendes Regelungskonzept	105
Bild 5.10:	Erläuterung Werte Wegmesssensoren in Sensorbox	107
Bild 5.11:	IAD- und Lastzustände für Nullpunkt Ermittlung (schematische Darstellung)	108
Bild 5.12:	Kalibrierung Sensorbox und Ermittlung des Nullpunkts	109
Bild 5.13:	Faktoren Versuchsplan Parametrierung PI-Regler	111
Bild 5.14:	Messung der mechanischen Losbrechkraft der Sensorbox.....	112
Bild 5.15:	Bewegungspfad „Zuführen“, (Haltepunkte auf Montagedreieck)	114
Bild 5.16:	Bewegungspfad „Positionieren“, (DinA3-Blatt für Feinbewegungen)	115
Bild 5.17:	Bewertung Bewegungspfad „Positionieren“, (DinA3-Blatt für Feinbewegungen).....	116
Bild 5.18:	Zielgrößenoptimierung für Systemzustand „ohne Last“	120
Bild 5.19:	Funktionsweise „Überganglose Teleskopierfunktion“, (schematisch)	122
Bild 5.20:	Anti-Drift-Funktion – Funktionsdiagramm, (schematisch)	124
Bild 5.21:	Anti-Pendel-Funktion – Erkennung, (schematisch).....	125

Bild 5.22:	Kraftmesshandschuh Equipment.....	126
Bild 5.23:	Ergonomie-Messreihen Kraftmesshandschuh – Vorgehensweise....	127
Bild 5.24:	Messreihenergebnisse Kraftmesshandschuh	128
Bild 5.25:	Wechsel zwischen Betriebsarten Manipulator und Roboter.....	130
Bild 5.26:	Teilautomatisierungs- und Sicherheitskonzept für IAD auf Basis Sensorbox	131
Bild 5.27:	Kraftmessung möglicher Kontakt-/Kollisionsfall	132
Bild 5.28:	Auswertung der Kraftmessung für möglichen Kontakt-/Kollisionsfall	133
Bild 5.29:	Beispiele aus Entwurfsphase Lastaufnahmemittel Konzept „sphärisches Gelenk“	136
Bild 5.30:	Prototyp Lastaufnahmemittel – Orientierkinematik	137
Bild 8.1:	Zielgrößenoptimierung für Systemzustand „pendelnde Last“	166
Bild 8.2:	Zielgrößenoptimierung für Systemzustand „starre Last“	166
Bild 8.3:	Teillösungen für Funktion „Orientierung ändern“	168
Bild 8.4:	Teillösungen für Funktion „Bedienkraft unterstützen“	169
Bild 8.5:	Teillösungen für Funktion „Orientierung begrenzen“	170
Bild 8.6:	Teillösungen für Funktion „Orientierung fixieren“	171

Tabellenverzeichnis

List of tables

Tabelle 2.1: Übersicht IAD Beispiele	36
Tabelle 3.1: Bewegungsanalyse Handhabungsobjekte in der Endmontage.....	61
Tabelle 3.2: Konzeptanforderungen und Erläuterungen (vgl. [MATH16a, S. 12/10]; [MATH16b, S. 590–591]; [MATH16c, S. 15/6])	73
Tabelle 5.1: Notenskala und Kriterien für Bedienerbewertung	115
Tabelle 5.2: Faktorstufen des Wirkungsflächenversuchsplans.....	118
Tabelle 5.3: Sollwerte und Obergrenzen für Zielgrößenoptimierung (Minimieren)	119
Tabelle 5.4: Übersicht optimierte Reglerparameter für spezifische Lastart	120
Tabelle 8.1: Variationen dreiachsiger Regionalstrukturen [SCHO87, S. 36]	156
Tabelle 8.2: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Eintelekopiert, ohne Last“ ...	157
Tabelle 8.3: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Austelekopiert, ohne Last“ ..	158
Tabelle 8.4: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Eintelekopiert, Pendelnde Last“	159
Tabelle 8.5: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Austelekopiert, Pendelnde Last“	160
Tabelle 8.6: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Eintelekopiert, Starre Last“ ..	161
Tabelle 8.7: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Austelekopiert, Starre Last“ .	162
Tabelle 8.8: Messreihe mechanische Losbrechkraft Sensorbox	163
Tabelle 8.9: Wirkungsflächenversuchsplan	164
Tabelle 8.10: Messwerte Experimente Wirkungsflächenversuchsplan.....	165
Tabelle 8.11: Messwerttabelle Kraftmesshandschuh Messreihe „B“	167
Tabelle 8.12: Messwerttabelle Kraftmesshandschuh Messreihe „C“	167

Abkürzungsverzeichnis

Abbreviations

ATS	After Treatment System (Abgasnachbehandlung)
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
CVT	Continuously Variable Transmission
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
EC	Electronically Controlled
EoL	End-of-Line
FU	Frequenzumrichter
ATS	After Treatment System
GM	General Motors
HHG	Handhabungsgerät
IAD	Intelligent Assist Device (Intelligentes Unterstützungssystem)
JiS	Just in Sequence
KBK	Kranbaukasten
LAM	Lastaufnahmemittel
LCA	Low-Cost-Automatisierung
LMM	Leitmerkmalmethode
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation
OG	Orientierungsgrad
OZ	Ordnungszustand
PG	Positionierungsgrad
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SLT	Sonderladungsträger

1 Einleitung

Introduction

1.1 Problemstellung

Research issue

Die Nutzfahrzeugindustrie ist in den letzten Jahrzehnten immer stärker geprägt durch eine steigende Produktvarianz. Die Gründe dafür sind zum einen in der Regionalisierung der Produkte zu finden. Zum anderen gibt es speziell im Lkw-Segment eine stark voranschreitende Individualisierung der Kundenanforderungen. Diese Umstände führen auch zu einer steigenden Komplexität in Produktionsbereichen wie der Montage [SCHU08, S. 81–83]. Darüber hinaus befindet sich die Nutzfahrzeugindustrie gerade in einem strukturellen Wandel hin zu elektrifizierten oder wasserstoffbasierten Antrieben. Um den bestehenden als auch zukünftigen Komplexitätsanforderungen gerecht zu werden, wird vor allem bei der Produktentwicklung auf Modulbauweise zurückgegriffen. Im Bereich der Montage bedeutet das ein zunehmendes Aufkommen von vormontierten Modulkomponenten, deren Handhabung durch Größe und Gewicht mit Herausforderungen einhergeht [COLG03, S. 2516].

Die Nutzfahrzeug-Endmontage zeichnet sich damit durch eine geringe Automatisierungstiefe und eine Vielzahl manueller Handhabungsprozesse aus. Aufgrund der Produktgröße gibt es zudem eine hohe Zahl unterschiedlicher Komponenten- und Werkstückvarianten, die aufgrund ihrer Größe und Masse nicht mehr rein manuell gehandhabt werden können. Diese Lasten werden in der Montage oftmals mit Hilfe günstiger und einfacher Hebezeuge oder speziell konstruierter, aufgabenspezifischer Handhabungseinrichtungen gehandhabt. Häufig unterstützen diese Systeme jedoch nur das Heben der Last. Da die variantenreichen Lasten allerdings bei teils engen Toleranzen geführt, positioniert, orientiert und montiert werden müssen, ist es die Aufgabe des Mitarbeiters diese Bewegungen umzusetzen. In vielen Fällen muss die Last dabei bspw. mit dem stetig geförderten Montageobjekt synchronisiert oder während des Montagevorgangs durch feinfühligere Bewegungsabfolgen eingefädelt werden. Es ist dabei eine Tatsache, dass die Erfahrung sowie körperliche Verfassung des Mitarbeiters Auswirkungen auf die Prozessrobustheit und damit auf Zeit und Qualität des Montageprozesses haben. Ein beständiges Thema ist dabei die Ergonomie. Sie rückt aufgrund des gerade in Deutschland voranschreitenden demografischen Wandels immer stärker in den Fokus [HERR08, S. 1–21]. Demzufolge erscheint die Überprüfung von ergonomisch unterstützenden Handhabungseinrichtungen als bedeutend. Es gilt dabei insbesondere auch ergonomisch günstig gestaltete technische Hilfsmittel wie Handhabungsgeräte einzusetzen (vgl. [ABEL11, S. 196–197]). Für eine erfolgreiche Implementierung bedarf es jedoch einer flexiblen Einsetzbarkeit und Wandelbarkeit.

1.2 Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Objectives, Tasks and Modus Operandi

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines modularen und skalierbaren Konzepts zur Handhabung und Montage von großen und schweren Komponenten oder Werkzeugen am Beispiel der Nutzfahrzeugindustrie mit einer generellen Übertragbarkeit auf die Großbauteilmontage.

Im Fokus der Arbeit steht die Unterstützung des Mitarbeiters mit dem konkreten Ziel des Aufbaus eines Demonstrators eines modularisierten Handhabungsgeräts mittels standardisierter Elemente. Das Hauptaugenmerk der Modularisierung ist die Darstellung von einzeln verwendbaren standardisierten Einheiten oder Elementen, die je nach Anforderung an die Handhabungs- und Montageaufgabe kombiniert werden können. Durch die Kombination kann die Funktionalität erhöht werden, um komplexeren Handhabungsaufgaben gerecht zu werden. Hierbei werden jedoch nicht alle Elemente standardisiert, sondern lediglich methodisch ausgewählte Elemente. Bestehende standardisierte Elemente können unverändert oder skaliert übernommen werden. Zur Vereinfachung der prototypischen Umsetzbarkeit werden möglichst viele existierende und standardisierte Module, die am Markt verfügbar sind, verwendet und in einer Art Baukastensystem zur Verfügung gestellt. Nicht-standardisierte Elemente können für eine aufgabenspezifische Anpassung durch Anwendung methodischer Hilfestellungen entwickelt werden.

Ausgangspunkt für die Modularisierung und Standardisierung des Handhabungsgerätes ist ein Spektrum verschiedener Handhabungs- und Montageaufgaben, die anhand einer praktischen Analyse beschrieben, gegliedert und eingegrenzt werden. Auf diese Weise soll das System vereinfacht und die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit erhöht werden.

Ein weiteres Ziel des Konzepts ist die optimierte Unterstützung des Menschen bei der Handhabung von großen und schweren Lasten. Die Unterstützung bezieht sich zum einen auf die Ergonomie. So soll die ergonomische Belastung möglichst gering gehalten werden, die sich im Wesentlichen durch die körperlichen Auswirkungen bei der Durchführung von Bewegungen und bei der Einnahme von Positionen und Körperhaltungen während der Nutzung des Handhabungsgerätes darstellt. Zum anderen bezieht sich die Unterstützung des Mitarbeiters auf die Optimierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und insbesondere auf die Verbesserung der Bedienergonomie. Das Ziel besteht darin, eine leichte, intuitive und sichere Bedienung zu ermöglichen, die die Kontrollierbarkeit des Systems und damit vor allem die Akzeptanz des Bedieners erhöht. Im Vordergrund steht diesbezüglich die Implementierung einer möglichst einfachen Systemsteuerung, um dem Mitarbeiter bei der Bewegung der Last optimal zu unterstützen. Damit soll er sich während eines Montage- oder Fügeprozesses bestmöglich auf die komplexen und feinfühlig Positionier- und Orientierbewegungen fokussieren und konzentrieren. Diese Herangehensweise dient als Grundlage, um die Prozessqualität zu verbessern.

Um für eine spätere Serienanwendbarkeit möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wird zudem die Teilautomatisierbarkeit eines solch neuartigen Systems evaluiert und geprüft. Die Automatisierung nicht wertschöpfender Prozessanteile kann zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit solcher Anlageninvestitionen beitragen. Es handelt sich somit um einen bedeutsamen Baustein bei Planung, Entwicklung und Einsatz neuer Produktionstechnologien. Durch die Implementierung einer intelligenten Mensch-Maschine Schnittstelle und unterstützender Antriebe innerhalb des modularen Systems sind die grundlegenden Voraussetzungen für die Automatisierung von Teilprozessen des Handhabungsgeräts gegeben. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher die Integration einer Teilautomatisierungsfunktion innerhalb des modularen Konzepts untersucht und bewertet werden. Das Ziel ist die Koexistenz und möglicherweise direkte Interaktion im Arbeitsraum des Menschen ohne trennende Schutzeinrichtungen. Für solch ein Modell erscheint die Überprüfung der groben Anwendungsmöglichkeiten sowie deren Risiken und die Auswirkungen auf die technische Komplexität des Gesamtsystems als bedeutsam.

1.3 Aufbau der Arbeit

Structure of the thesis

Die vorliegende Arbeit entspricht einer anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung. In **Kapitel 1** ist die zu lösende praktische Problemstellung sowie die Zielsetzung und Aufgabenstellung beschrieben. Die Vorgehensweise gliedert sich in sechs Schritte, die sich in der Gliederung der Arbeit wiederfinden und in **Bild 1.1** dargestellt sind.

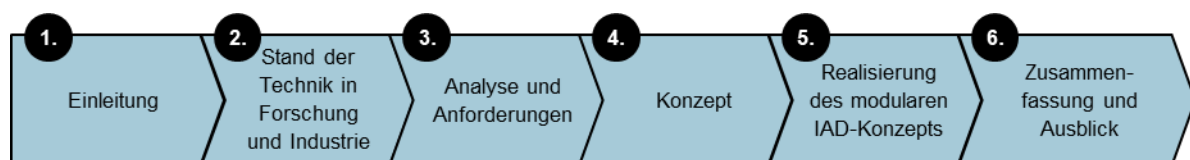


Bild 1.1: Aufbau der Arbeit und Hauptkapitel

Structure of the thesis and main chapters

In **Kapitel 2** werden die Grundlagen und der Stand der Technik erläutert. Dabei erfolgt zu Beginn eine Abgrenzung der Begriffe Montage und Handhabung, gefolgt von einer grundlegenden Gliederung verschiedener Handhabungs- und Bewegungseinrichtungen. Ein besonderes Augenmerk wird dann auf die programmgesteuerten und auf die manuell gesteuerten Bewegungseinrichtungen gelegt, um die relevanten Grundlagen des Betrachtungsbereichs darzustellen. Ein weiterer wichtiger Teil dieses Kapitels ist die Einführung des Begriffs der teilautomatisierbaren intelligenten Unterstützungssysteme, die den Stand der Technik vor allem in der Forschung abbilden. Hierzu erfolgt eine Einordnung der assistierenden Handhabungstechnik sowie die Beschreibung und Erläuterung der Funktionen sowie der Vorteile dieser Systeme. Schlussendlich werden verschiedene beispielhafte

intelligente Unterstützungssysteme aus Forschung und Industrie dargestellt, auf deren Erkenntnissen und Entwicklungen diese Arbeit aufbaut.

Da im Rahmen der Arbeit sowohl ein Konzept als auch eine basale Produktentwicklung anhand eines konkreten Betrachtungsbereichs durchgeführt wird, erfolgt in **Kapitel 3** eingehend die Analyse des Aufgabenbereichs sowie seiner Umgebungs- und Rahmenbedingungen. Dabei wird im Wesentlichen auf die Besonderheiten des Bereichs der Lkw-Montage sowie auf die dort verwendeten Handhabungsgeräte eingegangen. Darauf aufbauend erfolgt eine Analyse der kinematischen Strukturen von Handhabungsgeräten und die Ableitung der idealen universell einsetzbaren Regionalstruktur für den Anwendungsfall der Nutzfahrzeugmontage. Des Weiteren wird anhand einer Prozessanalyse methodisch ein exemplarischer Montageprozess zur Entwicklung und Validierung des Konzepts ausgewählt und beschrieben. Am Ende des Kapitels werden die daraus abgeleiteten Hauptanforderungen an das Konzept zusammengefasst und erläutert.

Basierend auf der Problemstellung, dem Stand der Technik und den Analysen und abgeleiteten Anforderungen wird in **Kapitel 4** das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept für ein modular aufgebautes, skalierbares intelligentes Unterstützungssystem zur Handhabung schwerer Lasten erläutert. Zu Anfang wird auf den modularen Gesamtaufbau eingegangen. Im Weiteren erfolgt dann die grundlegende Funktionsbeschreibung jedes einzelnen Moduls wie Positionier-Kinematik oder Sensorik für Horizontal- oder Vertikalbewegungen. Darin enthalten sind jeweils die begründete Auswahl von Elementen und Komponenten oder die im Rahmen der Arbeit beigetragenen neuartigen Elemente oder Entwicklungen. Hervorzuheben ist hierbei die Sensorbox für Horizontalbewegungen, die auf einem Patent der Firma EEPOS basiert und deren Entwicklung und Parametrierung der Steuerung ein zentrales Element der Arbeit darstellt. Weiterhin wird auch das für die prozessspezifische Orientier-Kinematik bzw. das Lastaufnahmemodul eine gesonderte Anforderungsanalyse durchgeführt, die mit einer methodischen Vorgehensweise in Kombination mit einer allgemeinen Funktionsstruktur zur Lösungssuche und Designentwicklung vervollständigt wird.

In **Kapitel 5** wird anschließend die Realisierung des zuvor beschriebenen Konzepts konkretisiert. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird dazu der mechanische und systemische Aufbau des Demonstrators mit den jeweiligen Modulen sowie deren ausgewählter Komponenten beschrieben. Neben dem Handhabungsgerät gehört zum Demonstrator auch die experimentelle Versuchsumgebung. Im zweiten Abschnitt des Kapitels wird die Parametrierung und Optimierung der Steuerung der Sensorbox behandelt. Darunter fällt zuerst die grundlegende Erläuterung des angewendeten Steuerungs- und Regelungskonzepts. Die Parametrierung folgt anschließend mit einer Kalibrierung der Sensorbox sowie einer Parametrierung der Reglereinstellungen unter Anwendung der Methode der statistischen Versuchsplanung. Abschließend werden noch entwickelte und integrierte Zusatz- und Sicherheitsfunktionen aufgezeigt und erklärt. Im dritten und letzten Abschnitt des Kapitels erfolgt die praktische Validierung

des Konzepts. Als erstes wird die eingangs beschriebene Zielsetzung der Ergonomieverbesserung mittels Kraftmessversuchsreihen validiert. Als zweites wird die Fragestellung der Teilautomatisierbarkeit anhand der komplexesten Handhabung eines Bauteils geklärt. Das dritte Thema dieses Unterkapitels beschreibt die Anwendung der Methodik zur Generierung eines Low-Cost-Automation-Lastaufnahmemittels sowie das daraus resultierende Ergebnis. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem finalen Vergleich der Hauptanforderungen mit den entwickelten Konzept- und Demonstratorfunktionalitäten.

Das abschließende **Kapitel 6** enthält basierend auf den zuvor erarbeiteten Ergebnissen und Erkenntnissen eine Zusammenfassung der Arbeit. Zum Abschluss wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie Einsatzmöglichkeiten gegeben.

2 Stand der Technik in Forschung und Industrie

State of the Art in Research and Industry

Das nachfolgende Kapitel dient dazu, ein grundlegendes Verständnis des Betrachtungsbereichs der Arbeit zu generieren. Hierzu werden zuerst anhand von Normen und Richtlinien die relevanten Grundlagen betrachtet. Dazu gehört eine Abgrenzung der Begrifflichkeiten von Montage und Handhabung in der Produktion sowie die vergleichende Gliederung von Handhabungs- und Bewegungseinrichtungen mit detaillierteren Merkmalen und Funktionen von programmgesteuerten und manuell gesteuerten Bewegungseinrichtungen. Das Kapitel wird danach ergänzt um den Stand der Technik in Wissenschaft und Industrie zu dem deduzierten Bereich der intelligenten Unterstützungssysteme. In diese Kategorie fällt die aus der Forschungsfrage abgeleitete Entwicklungsrichtung. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Übersicht beispielhafter IADs aus Forschungsprojekten und Industrie sowie einem Fazit, das den Forschungsansatz und -bedarf klärend beschreibt.

2.1 Abgrenzung Montage und Handhabung in der Produktion

Differentiation assembly and handling in production

Im industriellen Bereich ist die Montage ein wesentlicher Teil der Produktion. Die Produktion wird als vom Menschen bewirkter Transformationsprozess beschrieben, bei dem aus natürlichen oder bereits produzierten Ausgangsstoffen unter Einsatz von Energie und Arbeitskraft Wirtschafts- oder Gebrauchsgüter erzeugt werden [BECK08, S. 9]. In der Produktion ist der Montage eine Teilefertigung im Unternehmen oder bei Lieferanten vorangestellt [WARN93, S. 1].

Die Art der Produktion oder Fertigung ist dabei abhängig von der Wiederholhäufigkeit und der produzierten Jahresstückzahl. Wie in **Bild 2.1** dargestellt, wird zwischen Einzel-, Kleinserien-, Großserien- und Massenproduktion unterschieden. Die Grenzen zwischen den einzelnen Produktionsarten sind dabei fließend und überlappend. Sie hängen stark von der Komplexität der Produktionsprozesse ab [EVER89, S. 11].

Am Ende des gesamten Produktionsprozesses werden in der Montage aus einer Vielzahl von Teilsystemen, die aus Einzelteilen oder Baugruppen bestehen können, Produkte höherer Komplexität zusammengebaut, die wiederum vorgegebene Funktionen erfüllen. Alle Teilschritte müssen meist in einem bestimmten Zeitintervall erfolgen [WARN75, S. 11].

Die Montage wird dabei sowohl von der Produktionsart als auch durch die angewendeten unterschiedlichen Organisations- und Ablaufprinzipien beeinflusst.

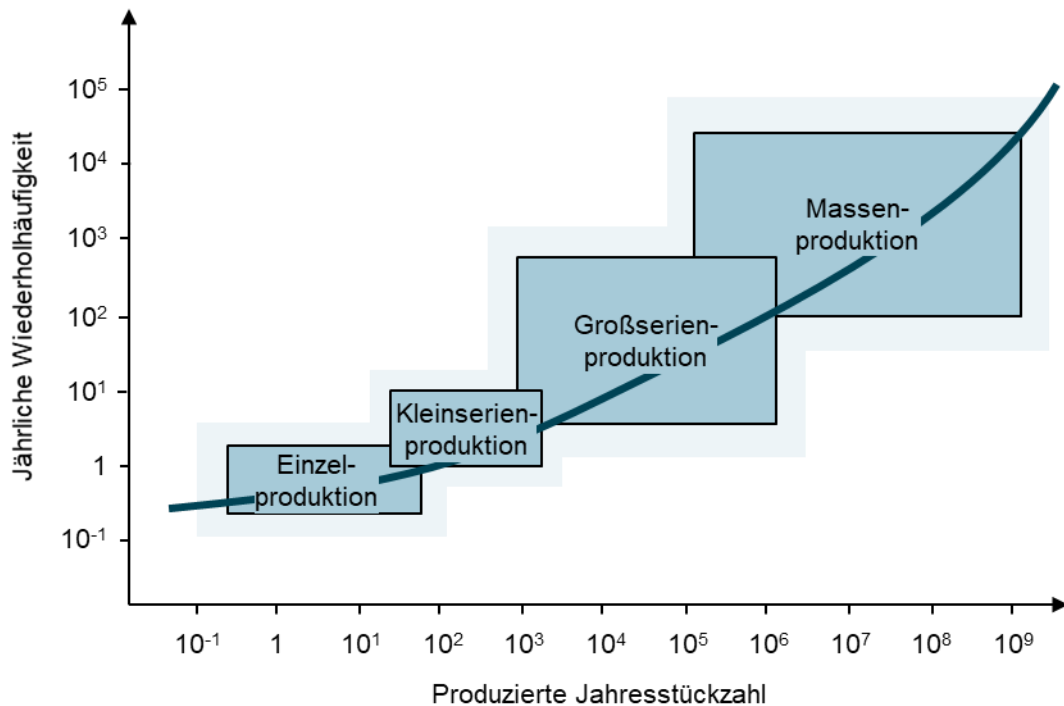


Bild 2.1: Produktionsarten (Eigene Darstellung nach [EVER89, S. 11])

Production principles

Charakterisiert wird nach „der Bewegung des Montageobjekts“ und nach „Bewegung der Montagearbeiter“ während des Produktions- und Montageprozesses. Beide Elemente können entweder bewegt werden oder stationär bleiben. Dabei existieren vier Grundprinzipien: Baustellenmontage, Gruppenmontage, Fließmontage und kombinierte Fließmontage. Eine Übersicht ist in **Bild 2.2** dargestellt.

	Baustellenmontage	Gruppenmontage	Reihenmontage	Straßenmontage	Taktstraßenmontage	kombinierte Fließmontage
Montageobjekt	stationär	stationär	bewegt	bewegt	bewegt	bewegt
Montagearbeiter	stationär	bewegt	stationär	stationär	stationär	bewegt
Bewegungsablauf	-	• Periodisch • Aperiodisch	• Aperiodisch • Ohne Puffer	• Periodisch • Mit Puffer	• Periodisch • Ohne Puffer	• Kontinuierlich • Ohne Puffer
Skizze						

Bild 2.2: Montageorganisationsprinzipien, vgl. [EVER89, S. 175–177]; [FELD14, S. 668–669]

Organizational assembly principles

Die Baustellen- und Gruppenmontage folgt dem Verrichtungsprinzip. Das Montageobjekt steht dabei stationär an einem Ort. Die dem Fließprinzip folgenden Montageorganisationsformen können in mehrere Unterkategorien unterteilt werden.

Sie unterscheiden sich im Wesentlichen anhand des zeitlichen Bewegungsablaufes des Montageobjektes. Die Reihenmontage hat einen relativ freien Bewegungsablauf ohne festen Takt. Bei Bedarf können einzelne Stationen sogar übersprungen werden. Die Taktstraßenmontage hingegen muss einen genauen Takt einhalten. Eine etwas flexiblere Version ist die Straßenmontage, die zwar auch einem festen Takt folgt, jedoch ausgleichende Pufferstationen zwischen den Montagestationen aufweist. Speziell bei Produktionsarten mit hohen Stückzahlen wie im Automobilbau wird die kombinierte Fließmontage angewendet. Hierbei bewegt sich sowohl das Montageobjekt als auch der Montagemitarbeiter entlang der Montagelinie [EVER89, S. 175–177]; [FELD14, S. 668–669]; [WEST06, S. 198–200].

Im Hinblick auf die Handhabung und Montage von schweren Lasten bestimmen sowohl die Produktionsart als auch das Ablaufprinzip der Montage die Rahmenbedingungen für unterstützende Betriebsmittel. Die Produktionsart ist dabei stark verantwortlich für die Taktzeit und den Drang zur Automatisierung während das Ablaufprinzip wesentlich den Arbeitsraum und die Bewegungen der Lasten beeinflusst.

2.1.1 Montage

Assembly

Die Montage umfasst eine Vielzahl verschiedener Prozesse, Aufgaben und Vorgängen. LÖHR gliedert die Teilfunktionen der Montage in Fügen, Handhaben, Prüfen, Justieren und Sonderfunktionen [LÖHR77, S. 49].

Nach LOTTER können die wesentlichen Montagevorgänge unter den Funktionen Handhaben und Fügen zusammengefasst werden. Somit basieren die meisten Aufgaben der Montage auf den Definitionen und Kategorisierungen der VDI Richtlinie 2860 „Montage und Handhabungstechnik“ und der Norm DIN 8593-0 „Fertigungsverfahren Fügen“. Die Tätigkeiten des Justierens und Kontrollierens sowie Sonderoperationen wie bspw. Reinigen oder Entgraten werden als umfassende, zusätzliche Montagefunktionen bezeichnet [LOTT12, S. 2]. Die Teilfunktionen der Montage werden in **Bild 2.3** dargestellt.

Der Begriff Montage betrachtet somit alle Vorgänge, die notwendig sind, um einen geometrisch bestimmten Körper zusammenzubauen. Wird der Interpretation von [LOTT82, S. 7–10] gefolgt, so lassen sich die in **Bild 2.3** dargestellten Montagefunktionen nach primären und sekundären Funktionen unterscheiden. Primärfunktionen, die unter dem Begriff Fügen zusammengefasst sind, tragen dabei direkt zum Montagefortschritt bei und sind als wertschöpfende Prozesse anzusehen. Die übrigen Montagefunktionen werden als sekundär eingeordnet. Es handelt sich dabei um zusätzlich notwendige sekundäre Vorgänge, die den Wertschöpfungsgrad nicht direkt erhöhen und deren Anteile aus Rationalisierungsgründen zu reduzieren sind [SPUR86, S. 591]; [JONA00, S. 6–7].

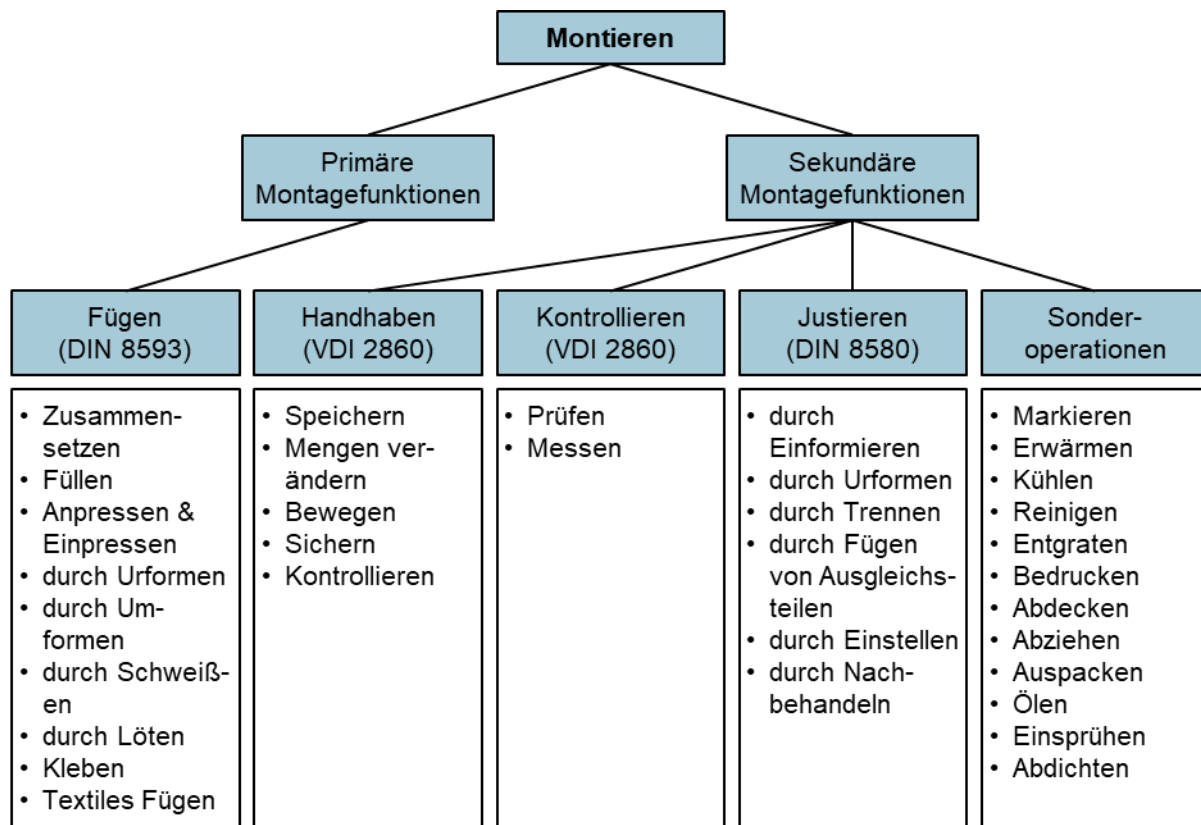


Bild 2.3: Teilfunktionen der Montage, vgl. [LOTT82, S. 7–10]; [LOTT12, S. 2]; [JONA00, S. 6–7]

Partial functions of assembly

Der Primärmontagevorgang Fügen wird nach [DIN 8593-0, S. 3] definiert als dauerhaft angelegtes Verbinden oder sonstiges Zusammenbringen von Werkstücken geometrisch bestimmter Form. Dabei ist es jedoch nicht gleichzusetzen mit der Montage oder Montieren, da Montieren zwar stets unter Anwendung von Fügeverfahren durchgeführt wird, jedoch auch zusätzliche sekundäre Handhabungs- und Hilfsvorgänge einschließt [DIN 8593-0, S. 2].

Mit Blick auf die Montage von immer komplexeren mechatronischen Produkten wie im Automotivebereich kombiniert und ergänzt MÜLLER die Richtlinien VDI 2860 und DIN 8593-0 und klassifiziert die Funktionen Handhaben und Fügen als Basisaufgaben der Montage. Zusätzlich zu den bekannten Definitionen und Kategorisierungen identifiziert er zusätzlich Inbetriebnehmen als Basisaufgabe, wobei ein Produkt im Sinne der mechatronischen Teilsysteme für parametrisiert, gestartet und getestet gilt. Hilfsprozesse und Sonderoperationen stehen als Unterstützungsprozesse der Montage ergänzend zur Seite [MÜLL11, S. 1–2]; vgl. [EILE15, S. 6].

Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass die Handhabung eine sehr bedeutsame Funktion bzw. einen wesentlichen Prozess der Montage darstellt und in der Regel mit vielen weiteren Montagefunktionen, wie z.B. Fügen, verknüpft und kombiniert ist. Im nächsten Schritt wird daher der Begriff Handhabung näher beleuchtet.

2.1.2 Handhabung

Handling

Im alltäglichen Sprachgebrauch aber auch in der Fachliteratur werden eine Vielzahl von Begriffen für das Handhaben selbst und für angrenzende ähnliche Funktionen eingesetzt. HESSE strukturiert die bedeutsamsten Begriffe aus dem Deutschen und Englischen Sprachgebrauch anhand der Abfolge einer Bewegungssequenz in hierarchischer Form (siehe **Bild 2.4**). Es fällt auf, dass der Sequenzbeginn „Aufnehmen“ (to pick) und der Endpunkt „Ablegen“ (to place) ein Komplementärpaar darstellen [HESS16a, S. 16–17].

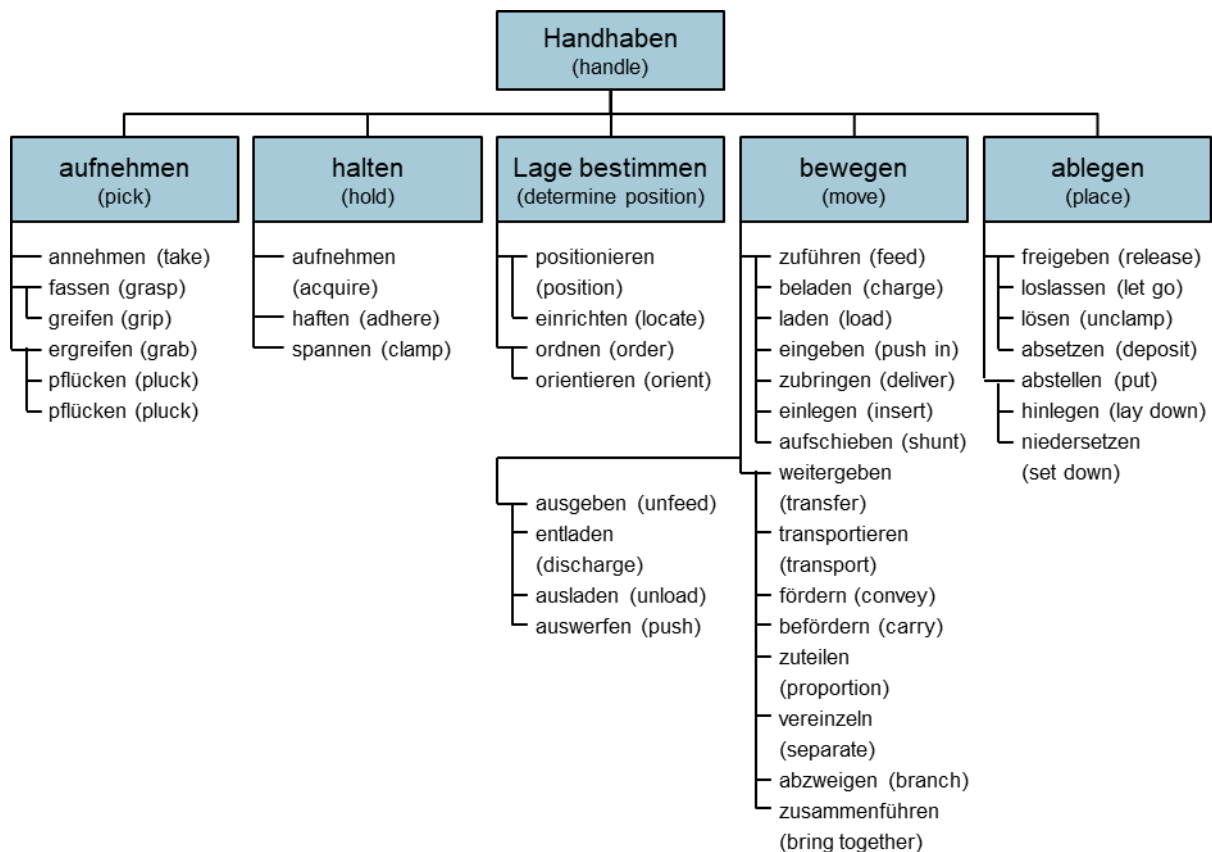


Bild 2.4: Der Begriff Handhaben im Deutschen und Englischen Sprachgebrauch [HESS16a, S. 16–17]

The term handle in German and English Language

Im produzierenden industriellen Bereich kann der Begriff Handhaben aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Wie oben schon erwähnt, ist Handhaben zum einen eine Teilfunktion der Montage wie in **Bild 2.5** dargestellt.

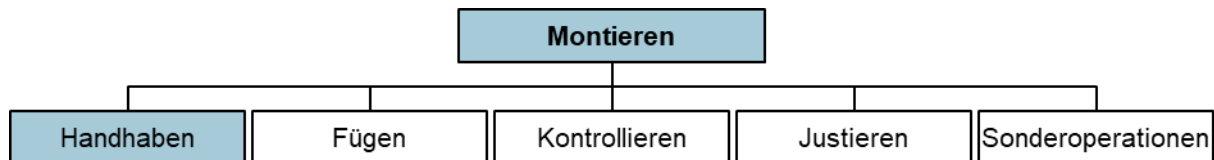


Bild 2.5: Handhaben als Teilfunktion der Montage, vgl. [LOTT12, S. 2]; vgl. **Bild 2.3**

Handle as partial function of assembly

Wird zum anderen jedoch der technischen Richtlinie VDI 2860 „Montage- und Handhabungstechnik“ gefolgt, so ist „Handhaben“ eine Teilfunktion des Materialflusses, wie in **Bild 2.6** dargestellt.

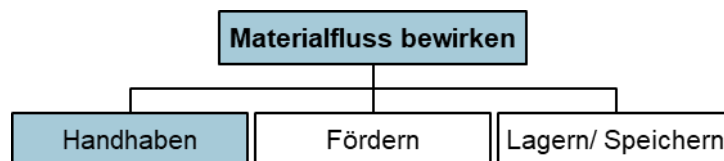


Bild 2.6: Handhaben als Teilfunktion des Materialflusses, vgl. [VDI 2860, S. 2]

Handle as partial function of material flow

Abgrenzend zu den weiteren Teilfunktionen „Fördern“ und „Lagern“ wird der Begriff Handhaben folgendermaßen definiert:

„Handhaben ist das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem.

Es können weitere Bedingungen - wie z.B. Zeit, Menge und Bewegungsbahn - vorgegeben sein.“ [VDI 2860, S. 2]

Das setzt grundlegend zwei Koordinatensysteme voraus (siehe **Bild 2.7**):

- Das körpereigene Koordinatensystem (uvw): es beschreibt das zu handhabende Objekt als geometrisch bestimmten Körper. Der Ursprung liegt innerhalb der Hüllfläche des Handhabungsobjekts und wird mit ihm mitbewegt. Oftmals wird als Ursprung der Schwerpunkt oder der Schnittpunkt der Symmetrieachsen verwendet.
- Das Bezugskordinatensystem (xyz): es beschreibt das den Körper umgebende System. Koordinatenursprung und Richtung der Achsen sind entsprechend der Aufgabenstellung wählbar. In der Praxis wird oftmals die x-Achse in die Fließrichtung einer räumlich angeordneten Montagelinie gelegt. Die y-Achse ist auf horizontaler Ebene quer zur Fließrichtung und die z-Achse vertikal dazu.

Durch beide Koordinatensysteme kann Position und Orientierung eines Körpers im Raum eindeutig beschrieben werden.

Wie in **Bild 2.7** dargestellt, wird die Position des Handhabungsobjekts durch die drei translatorischen Freiheitsgrade UVW und die Orientierung durch die drei rotatorischen Freiheitsgrade ABC festgelegt. Das oben genannte körpereigene Koordinatensystem

des Handhabungsobjekts lässt sich somit durch drei Drehungen (ABC) und drei Verschiebungen (UVW) in das Bezugskordinatensystem (xyz) überführen. Der Orientierungsgrad (OG) gibt an, in wieviel Freiheitsgraden der Rotation die Orientierung des Objekts bestimmt ist. Entsprechend gibt der Positionierungsgrad (PG) an, in wieviel Freiheitsgraden der Translation die Position des Körpers bestimmt ist. Der Ordnungszustand (OZ) ist wiederum das Verhältnis von OG und PG und gibt an in wieviel Freiheitsgraden die räumliche Anordnung des Körpers bestimmt ist [VDI 2860, S. 2–3]; vgl. [HESS16a, S. 40]; [HESS16b, S. 446].

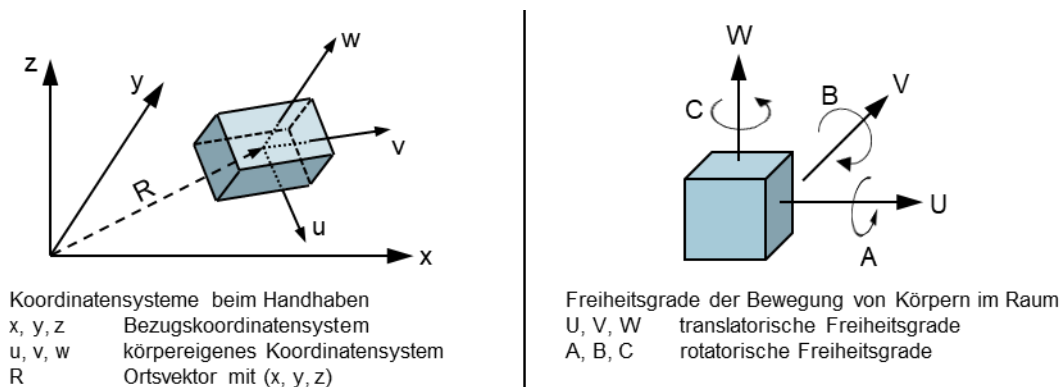


Bild 2.7: Koordinatensysteme und Freiheitsgrade eines Handhabungsobjektes, vgl. [VDI 2860, S. 2]; [HESS16a, S. 40]; [HESS16b, S. 446]

Coordinate systems and degrees of freedom of handling objects

Handhaben enthält damit alle Vorgänge, die den Werkstoff- oder Werkstückfluss durch eine Fertigungs- oder Montageeinrichtung bewirken. Eine klare Trennung zum „Fördern“ ist dabei entscheidend. Das Fördern bezeichnet im Wesentlichen den Materialtransport im Werksbereich [DOLE65, S. 103]. Zudem charakterisiert sich sowohl das Fördern als auch das Lagern durch rein translatorische Bewegungen. Einzig beim Handhaben ist durchgehend eine zusätzliche Orientierung vorgegeben. Weiterhin können sich beide Funktionen im Unterschied zu „Handhaben“ auch auf formlose Stoffe oder Körper mit unbekannter Geometrie beziehen [VDI 2860, S. 3].

Eine weitere Segmentierung des Handhabens erfolgt entsprechend **Bild 2.8** in die Teilfunktionen Bewegen, Sichern, Speichern (Halten von Mengen), Mengen verändern, und Kontrollieren. Die Teilfunktionen können zudem in Elementarfunktionen und zusammengesetzte Funktionen untergliedert und durch ergänzenden Funktionen vollständig beschrieben werden [VDI 2860, S. 4]; vgl. [HESS16b, S. 442–443].

Speziell bei der Handhabung großer Massen wird oftmals vom Heben schwerer Lasten gesprochen. Im Unterschied zu „Handhaben“ bezeichnet dieser Begriff allerdings nur das senkrechte Aufwärtsfördern als Teilvorgang beim Fördern, was nur ein gerichtetes Fortbewegen innerhalb eines Systems darstellt [VDI 2411, S. 7].

Mit dem Augenmerk auf das Handhaben großer und schwerer Lasten stehen die beiden Teilfunktionen Bewegen und Sichern im Fokus dieser Arbeit. Nach VDI 2860 sind die Elementarfunktionen des Bewegens das Drehen und das Verschieben. Beim Drehen wird das Handhabungsobjekt von einer Orientierung in eine andere überführt. Der Ursprung des körpereigenen Bezugskordinatensystems bleibt dabei gleich. Beim Verschieben hingegen erfährt der Körper eine Translationsbewegung zwischen zwei Positionen entlang einer Geraden. Hierbei bleibt die Orientierung des Handhabungsobjekts unverändert.

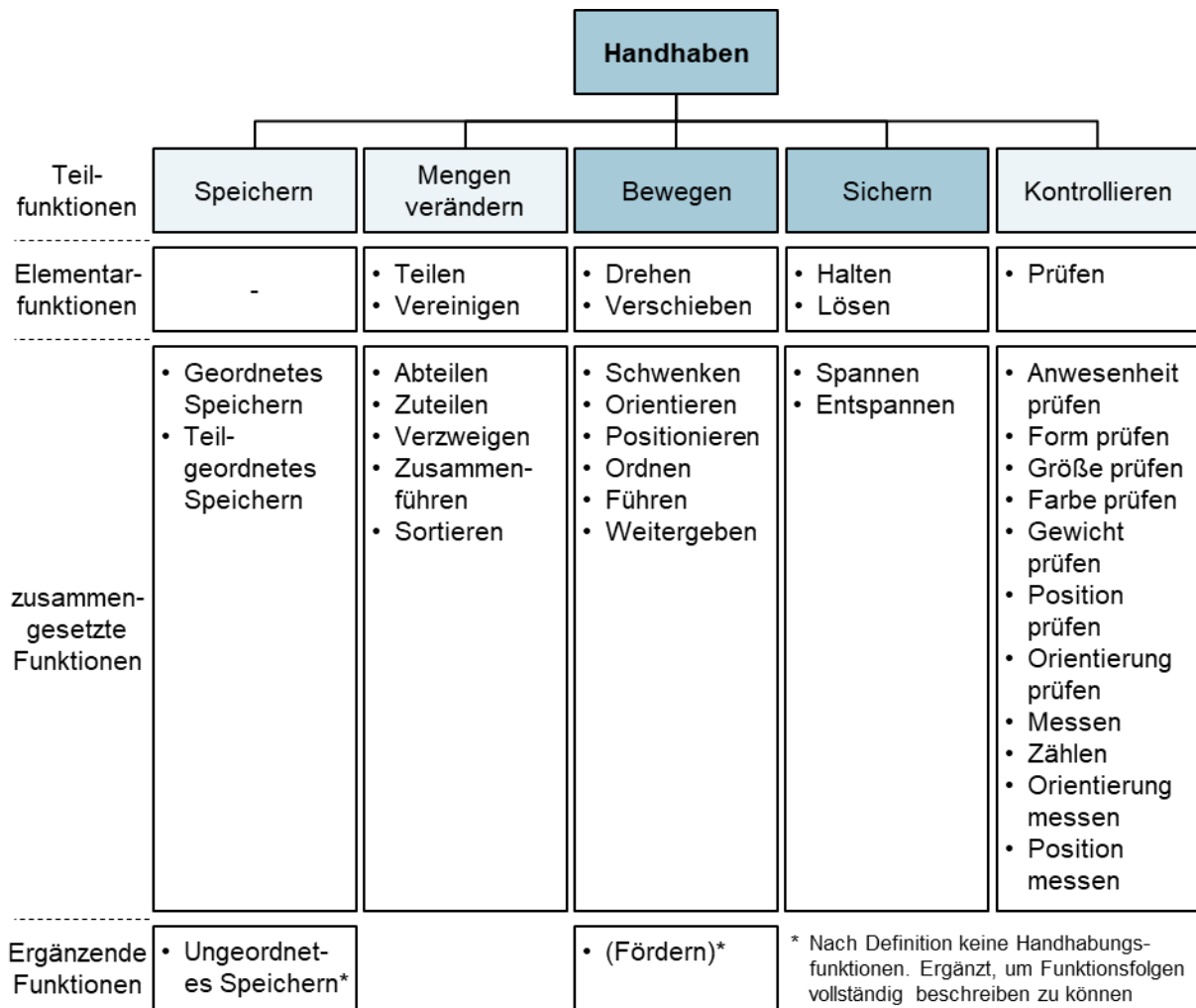


Bild 2.8: Teilfunktionen des Handhabens und deren Gliederung [VDI 2860, S. 4]

Breakdown of partial functions of handling

Aus beiden Elementarfunktionen können zudem noch verschiedene zusammengesetzte Funktionen wie das Schwenken, Orientieren, Positionieren, Ordnen, Führen und Weitergeben generiert werden. Schwenken bezeichnet eine Orientierungs- und Positionsänderung des Körpers, durch Rotation um eine körperferne Achse. Orientieren bewegt einen Körper aus einer undefinierten in eine definierte Orientierung und Positionieren bewegt das Handhabungsobjekt entsprechend aus einer unbestimmten Ist-Position in eine vorgegebene Soll-Position. Beim Ordnen wird der Körper sowohl aus einer unbestimmten Orientierung und

Position in eine festgelegte Bewegungsrichtung bewegt, was meist bei mehreren gleichartigen Objekten erfolgt. Führen schildert eine bahnförmige Bewegung von einer Position zur nächsten wodurch die Orientierung des Handhabungsobjekts zu jederzeit vorgegeben ist. Demgegenüber beschreibt das Weitergeben eine Bewegung von einer Position zur nächsten entlang einer undefinierten Bahn. Nur die Orientierung und Position am Anfang und Ende der Bewegung sind festgelegt [VDI 2860, S. 5–6].

Die Teilfunktion Sichern wird in die Elementarfunktionen Halten und Lösen untergliedert. Halten dient dabei dem vorübergehenden Erhalten eines räumlichen Anordnungszustandes in einer fixierten Position und Orientierung, was beim Lösen wieder umgekehrt wird. Spannen und Entspannen sind dementsprechend abgeleitete Funktionen unter Anwendung des Kraftschlussprinzips [VDI 2860, S. 6].

MÜLLER fokussiert die Montage moderner mechatronischer Produkte und untergliedert den Begriff Handhaben prozessorientiert und praxisnah in die Aufgaben Zuführen, Transportieren und Sichern (siehe **Bild 2.9**). Die einzelnen Handhabungsaufgaben sind als Bewegungen des Montageobjekts definiert. Zuführen beschreibt die Bewegung vom Bereitstellungs-ort zum eigentlichen Montageprozess. Transportieren ist die Bewegung der Montageobjekte von einem Montageort zum nächsten (zum Beispiel innerhalb einer Montagelinie von einer Montagestation zur nächsten). Sichern bzw. Entsichern beschreibt das Nichtzulassen oder Zulassen einer Bewegung und erzeugt somit eine definierte räumliche Anordnung entsprechend der Definition aus VDI 2860. Sichern ist häufig notwendig, um Transport- oder Zuführaufgaben durchzuführen [MÜLL11, S. 1–2]; vgl. [EILE15, S. 6].

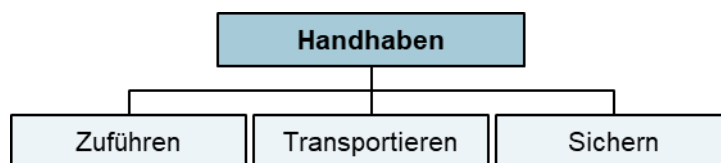


Bild 2.9: Handhaben als Basisaufgabe der Montage [MÜLL11, S. 1–2]; vgl. [EILE15, S. 6]

Handling as basic assembly operation

Da im Rahmen dieser Arbeit das Handhaben von schweren Lasten in der Montage bearbeitet wird, geht es primär um die Handhabungsbewegungen beim Zuführen vom Bereitstellungs-ort an den Montageort und im Anschluss um die Montagebewegungen während des eigentlichen Montageprozesses.

2.2 Gliederung von Handhabungs- und Bewegungseinrichtungen

Classification of handling devices

In den letzten Jahrzehnten wurden eine Vielzahl an Handhabungseinrichtungen für unterschiedlichste Zielstellungen entwickelt. Im Vordergrund standen zum Beispiel die Gesundheit der Mitarbeiter, kürzere Prozesszeiten bei der Handhabung, Erhöhung der von einer Person bewegbaren Lasten und Erweiterung des Arbeitsraums [HESS01, S. 1].

2.2.1 Gliederung von Handhabungseinrichtungen

Classification of handling devices

Zur Umsetzung von spezifischen Handhabungsfunktionen wie Bewegen und Sichern (vgl. **Bild 2.8**) bedarf es technischer Handhabungseinrichtungen. Sie sind die Funktionsträger des Handhabens und lassen sich entsprechend ihrer Hauptfunktion in Gerätegruppen kategorisieren, wobei in einer Handhabungseinrichtung oftmals auch mehrere Teilfunktionen kombiniert realisiert sein können [VDI 2860, S. 14]. **Bild 2.10** zeigt die Gliederung der Gerätegruppen entsprechend der Teilfunktionen des Handhabens (vgl. **Bild 2.8**). Da sich diese Arbeit mit Handhabungsvorgängen in der Montage von schweren Lasten beschäftigt, liegt der Fokus auf Bewegungseinrichtungen. Die Bewegungseinrichtungen werden im Allgemeinen mit Halteeinrichtungen zur Lastaufnahme kombiniert, die jedoch in der Regel spezifisch für die jeweilige Anwendung entwickelt und angepasst sind. Hierbei steht eher die Schnittstelle und generelle Randbedingungen im Vordergrund.

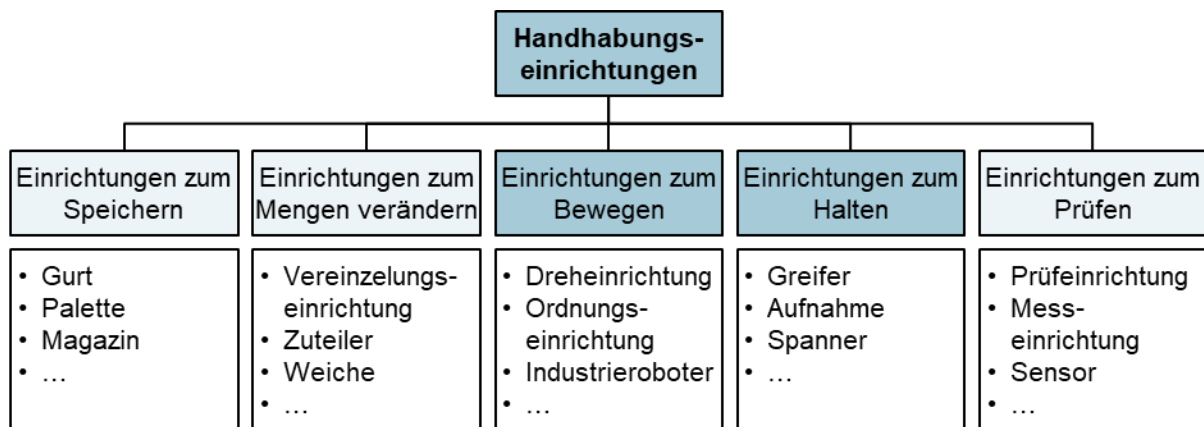


Bild 2.10: Gliederung von Handhabungseinrichtungen nach ihrer Hauptfunktion [VDI 2860, S. 14]

Classification of handling units based on main function

Handhabungseinrichtungen zum Bewegen gibt es in diversen Ausführungen. Oftmals werden neben der reinen Bewegungsaufgabe noch zusätzliche Handhabungsaufgaben erledigt. Je nach Anwendungsfall werden daher speziell angepasste oder universelle Bewegungseinrichtungen eingesetzt [WANN10, S. Bild 7.55].

2.2.2 Gliederung von Bewegungseinrichtungen

Classification of moving devices

Entsprechend der Gliederung von Bewegungseinrichtungen der VDI Norm 2860 werden in erster Ebene Bewegungseinrichtungen nach ihrer Hauptfunktion unterschieden (siehe **Bild 2.11**).

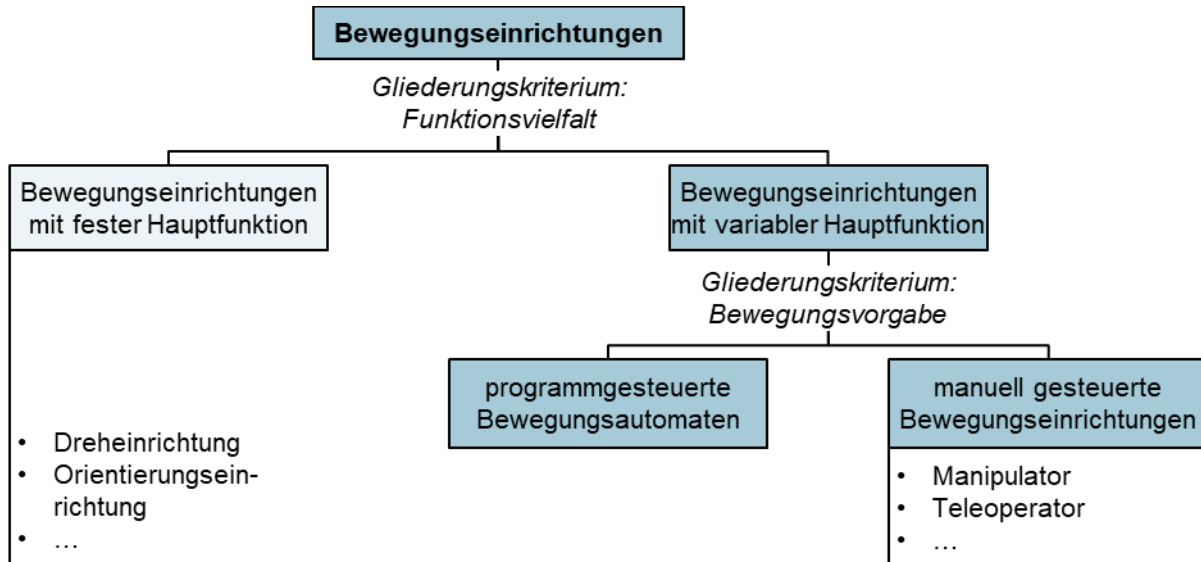


Bild 2.11: Gliederung von Bewegungseinrichtungen nach Hauptfunktion [VDI 2860, S. 14]

Classification of moving devices based on main function

Bewegungseinrichtungen mit fester Hauptfunktion erfüllen in der Regel nur eine festgelegte, spezielle Bewegungsfunktion (vgl. **Bild 2.8**). Die Bewegungsabfolge ist dabei Kern des Gerätedesigns und normalerweise nicht veränderbar. Dieser Gerätetyp wird meist in der Großserien- oder Massenfertigung eingesetzt [WANN10, S. Bild 7.55]. Typische Anwendungsfälle sind getriebeartige Kinematiken, die immer dieselbe Bewegung in einer Produktionsanlage, wie beispielsweise in der Verpackungsindustrie ausführen. Sie werden jedoch kaum in variantenreichen Großserienmontagen zum Bewegen schwerer und großer Lasten eingesetzt und werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Bewegungseinrichtungen mit variabler Hauptfunktion können hingegen universell eingesetzt werden und lassen sich sowohl maschinell als auch manuell steuern. Maschinell bzw. programmgesteuerte Bewegungsautomaten können feste oder programmierte Bewegungsabläufe ausführen. Sie sind in der automatisierten Produktion Stand der Technik. Hierzu gehören Roboter und einfachere Geräte. Manuell gesteuerte Bewegungseinrichtungen sind häufig bei der Handhabung schwerer Lasten in der variantenreichen Montage anzutreffen. Dazu gehören z.B. Manipulatoren und Teleoperatoren [HESS16a, S. 11].

Da im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept für ein teilautomatisierbares Unterstützungssystem zur Entlastung des Mitarbeiters bei der Handhabung großer,

schwerer Lasten entwickelt werden soll, werden die beiden Arten variabler Bewegungseinrichtungen im Weiteren näher beleuchtet.

2.3 Programmgesteuerte Bewegungsautomaten

Program controlled universal robotics

Nach [VDI 2860, S. 14–15] lassen sich die universell einsetzbaren, automatisierbaren programmgesteuerten Bewegungsautomaten nach ihrer Programmierart unterscheiden (siehe **Bild 2.12**). Auf der einen Seite gibt es die klassischen fest programmierten Bewegungsautomaten, wie bspw. Einlegegeräte. Zu Beginn gab es diese ablaufprogrammierten Handlingsautomaten nur kurvengesteuert, z.B. an Maschinen zur Glühlampenherstellung. Bewegungen können dabei auf mechanische Weise geändert werden. Winkel und Wege werden bspw. durch Austausch von Kurvenscheiben oder Verstellen von Endanschlägen modifiziert. Vorteile sind extrem kurze Zykluszeiten, die jedoch mit hoher Inflexibilität durch die feste Programmierung gepaart sind [HESS98, S. 2].

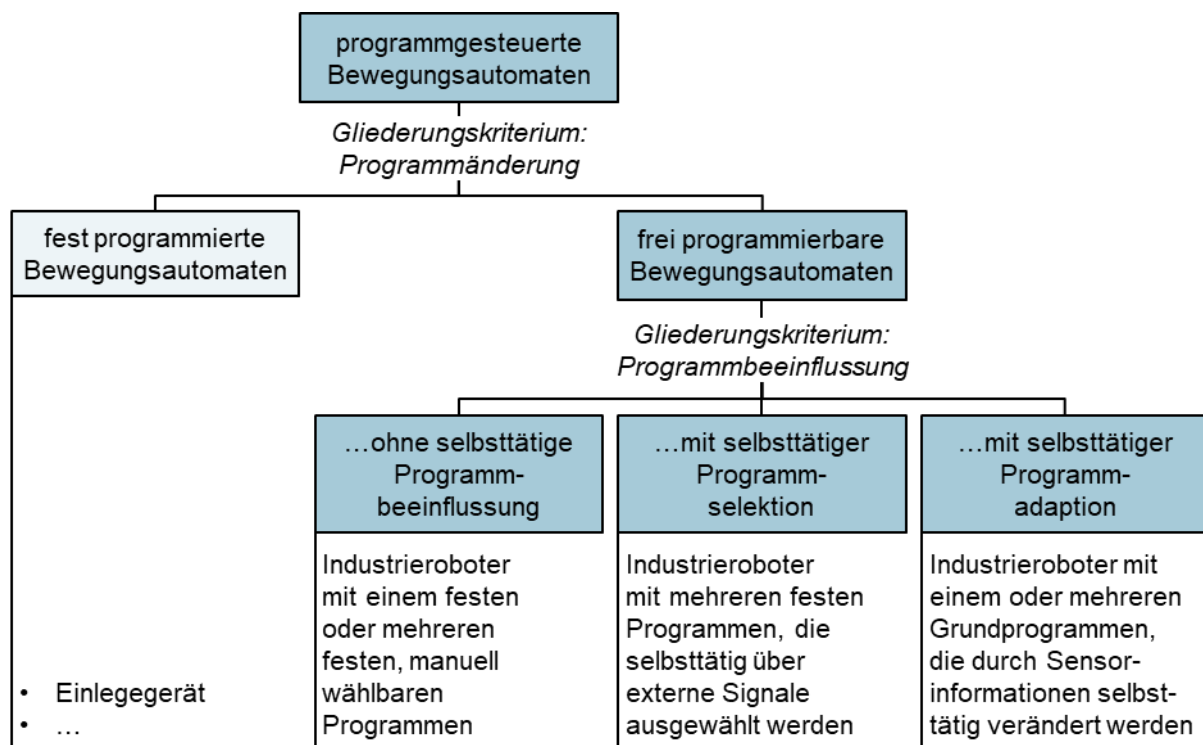


Bild 2.12: Gliederung von programmgesteuerten Bewegungsautomaten [VDI 2860, S. 14]

Classification of program controlled universal robotics

Aus diesem Grund finden diese Einrichtungen im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Betrachtung. Andererseits können bei frei programmierbaren Bewegungsautomaten die Bewegungen ohne mechanische Eingriffe nur durch Änderung des Programms umgestaltet oder angepasst werden. Sie lassen sich entsprechend den Möglichkeiten ihrer Programmbeeinflussung in programmierbare Bewegungseinrichtungen ohne selbsttätige Programmbeeinflussung, mit selbsttätiger Programmselektion und mit

selbsttätiger Programmadaptation unterscheiden. In der Praxis werden frei programmierbare Bewegungsautomaten im Allgemeinen als Industrieroboter bezeichnet [VDI 2860, S. 14–15].

Da in dieser Arbeit anhand eines Demonstrators auch ein gewisser Umfang der Teilautomatisierung erforscht werden soll, wird an dieser Stelle auf die verschiedenen Programmierarten hingewiesen. Industrieroboter lassen sich je nach Steuerung direkt (online) oder indirekt (offline) programmieren. Online kann bspw. manuell, durch Vormachen (Play-back-Methode) oder durch Anfahren von Stützpunkten (Tech-in-Methode) programmiert werden. Offline wird die Aufgabe ohne den Roboter mit der jeweiligen Programmiersprache textuell beschrieben [FELD14, S. 327–328]. Da im Rahmen des Prototypaufbaus nur die Prinziptauglichkeit der Teilautomatisierung im Vordergrund steht, ist die Auswahl eines geeigneten Programmierverfahrens nur sekundär und nicht Hauptaugenmerk dieser Arbeit.

2.4 Manuell gesteuerte Bewegungseinrichtungen

Manual operated movement devices

Die manuelle Steuerung als Teil eines Unterstützungssystems für den Mitarbeiter steht im Vordergrund der Arbeit. Daher werden die manuell gesteuerten Bewegungseinrichtungen hier genauer beleuchtet und analysiert.

Der Definition aus der Richtlinie VDI 2860 folgend werden die Bewegungen bei manuell gesteuerten Bewegungseinrichtungen durch den Menschen gesteuert. Als Praxisbeispiele für Handhabungsaufgaben werden direkt gesteuerte Manipulatoren und ferngesteuerte Teleoperatoren genannt [VDI 2860, S. 15]. HESSE fügt noch Hebezeuge als weitere Gerätegruppe hinzu [HESS01, S. 5–6]. Eine Übersicht ist in **Bild 2.13** dargestellt.

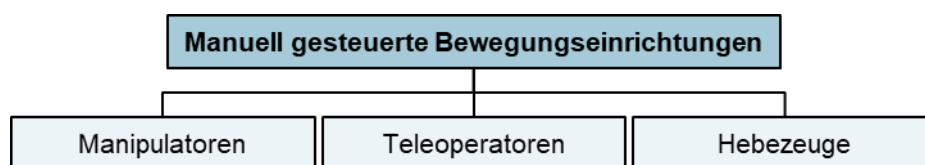


Bild 2.13: Manuell gesteuerte Bewegungseinrichtungen vgl. [VDI 2860, S. 15]; [HESS01, S. 5–6]

Manual controlled handling devices

2.4.1 Manipulatoren

Manipulators

Manipulatoren stellen ein vielfältiges Spektrum manuell gesteuerter Bewegungseinrichtungen dar, die hauptsächlich für Handhabungsaufgaben eingesetzt werden [VDI 2860, S. 15]. Generell leitet sich der Begriff „Manipulator“ vom Lateinischen *manus* ab, was Arm, Hand bedeutet. Der Begriff bezeichnet dabei

manuell gesteuerte Bewegungsmaschinen zum Handhaben diverser Objekte. Es gilt jedoch zu beachten, dass der Englische Begriff „Manipulator“ etwas allgemeiner verstanden wird und sowohl manuelle als auch automatische Steuerungen miteinschließt [HESS95, S. 150]; [HESS01, S. 5]. Etwas detaillierter betrachtet, handelt es sich somit um Mechanismen zur Reduktion oder gar Aufhebung des Kraftaufwandes durch den Menschen beim Handhaben von Lasten, deren Entwicklung erheblich durch die Humanisierung der Arbeitsplätze und zur sicheren Handhabung radioaktiven Materials in heißen Zellen vorangetrieben wurde [HESS98, S. 2]. HESSE liefert eine anschauliche Definition und bezeichnet einen Manipulator als *„Vorrichtung oder Gerät, dass durch eine Energie angetrieben wird, die nicht von Lebewesen ausgeht und einen Bediener in die Lage versetzt, ihn bei der Handhabung von körperlichen Objekten zu unterstützen. Der Manipulator wird durch die Bedienung einer Steuerung geführt, die mit dem Lastaufnahmemittel verbunden ist und/oder durch direkte und fortlaufende Führung der Last.“* [HESS01, S. 7]; vgl. [DIN EN 14238, S. 1–32]. Ein essentielles Merkmal von Manipulatoren, was sie zu Hebezeugen abgrenzt, ist die pendelfreie Aufnahme von Lasten mit einem möglichen außermittigen Masseschwerpunkt, der es ermöglicht, z.B. in Öffnungen einzuschwenken [HESS01, S. 10]. Abgesehen von den unterschiedlichen Einsatzgebieten unterscheidet KÖHLER die Manipulatoren nach grundsätzlicher Bauweise und nach der Steuerung [KÖHL81, S. 4]. Demnach gibt es sieben Kategorien:

- **Mechanische Parallel-Manipulatoren:** Sie werden in der Regel zur Übertragung von Handkräften vom Bediener durch eine Wanddurchführung in eine heiße Zelle eingesetzt. Es handelt sich dabei steuerungsseitig um ein Master-Slave-System, bei dem Bedien- und Arbeitsarm mechanisch gekoppelt sind [HESS01, S. 5]. Der befehlende Teil (Master, Bedienarm) gibt die Bewegung vor und der arbeitende Teil (Slave, Arbeitsarm) kopiert sie [HESS95, S. 153]; [HESS01, S. 13]. Diese Kategorie besitzt eine wenig komplexe Greifzange und kommt ohne Übersetzung oder Servo-Einrichtungen zwischen Bedienungs- und Arbeitsarm aus. Die Kraftübertragung erfolgt vielfach mit Stahldrahtseilen oder Stahlbändern [KÖHL81, S. 6–14].
- **Servo-Parallel-Manipulatoren:** Diese Kategorie ist ähnlich den mechanischen Parallel Manipulatoren. Im Unterschied werden jedoch die mechanischen Elemente zur Kraftübertragung zwischen Bedien- und Arbeitsarm mittels eines elektrischen oder elektrohydraulischen Systems abgebildet. Das bietet die Möglichkeit die manuellen Bedienkräfte bei der Übertragung auf den Arbeitsarm zu verstärken und Kraftreflexion einzusetzen [KÖHL81, S. 14]. Dadurch werden die Kräfte vom Arbeitsarm an den Bediener rückgekoppelt, wodurch ein Tastgefühl entsteht [HESS01, S. 5–6].
- **Ferngreifer:** Bei dieser Kategorie handelt es sich um Laborgeräte, die als „verlängerte“ Hände dienen. Der prinzipielle Aufbau ist ein Effektor an einer langen Stange [HESS01, S. 6]. Gelagert sind diese wenig komplexen mechanischen Geräte in einer Kugeldurchführung in der Abschirmwand, die sich zur besseren

Bedienung blockieren lässt. Ferngreifer können jedoch nur kleine Lasten handhaben und haben einen sehr eingeschränkten Arbeits- und Bewegungsbereich [KÖHL81, S. 18–20].

- **Kraftmanipulatoren:** Geräte aus dieser Kategorie sind in der Regel elektromotorisch angetrieben und werden durch Taster gesteuert. Der kinematische Aufbau setzt sich meistens aus einem Trägersystem und einem Arm zusammen [KÖHL81, S. 20]. Kraftmanipulatoren können insbesondere schwere Objekte bis zu einer Tonne Masse handhaben [HESS95, S. 130]. Es gibt Bauformen mit bis zu acht Bewegungsachsen. Im kerntechnischen Umfeld werden diese normalerweise einzeln nacheinander angesteuert, was sehr langsam ist. Bei Modellen, die in der Industrie eingesetzt werden, können auch mehrere Achsen parallel bewegt werden [HESS01, S. 5–6].
- **Manipulatoren mit Positionsregelung:** Diese Manipulatorart besitzt zum einen die Eigenschaften eines Servo-Parallel-Manipulators. Zum anderen erfolgt die Bedienung jedoch mit einem leichten, tragbaren Bedienarm. Dieses sogenannte Exoskelett besitzt je Bewegung eine laterale Positionsregelung [KÖHL81, S. 26–28]. Der Mensch gibt somit als Master die Bewegungen über das getragene Exoskelett vor, die kraftverstärkt vom Arbeitsarm (Slave) ausgeführt werden. Besitzt das Bedienexoskelett eingebaute Antriebe, wird von einem aktiven Exoskelett gesprochen. Der Bediener (Master) steuert den Arbeitsarm (Slave) dabei lateral und beide Elemente verschmelzen dabei zu einer Einheit [HESS98, S. 4–5].
- Rechnergestützte und rechnergesteuerte Manipulatoren
- Zusätzlich programmierbare Manipulatoren

Bei den Geräten der beiden letztgenannten Typen sind mehrere Programme gespeichert, die einen halbautomatischen Betrieb ermöglichen. Der Bediener muss dabei nur Befehle oder Daten für den Programmstart eingeben und kann sich im Anschluss auf die Überwachung des Programms konzentrieren [KÖHL81, S. 28]. Demzufolge entsprechen diese Typen praktisch schon den frei programmierbaren Bewegungsautomaten bzw. Industrierobotern, wie schon in **Bild 2.12** dargestellt. Teilweise ist jedoch eine zusätzliche Bedienung wie beim Kraft-Manipulator oder Servo-Parallel-Manipulator möglich.

Basierend auf der Einteilung von KÖHLER, detailliert HESSE die Gliederung von Manipulatoren nach deren Steuerung und unterscheidet auf oberster Ebene in Manipulatoren mit kopierender und nicht kopierender Steuerung. Die Übersicht ist in **Bild 2.14** zu finden.

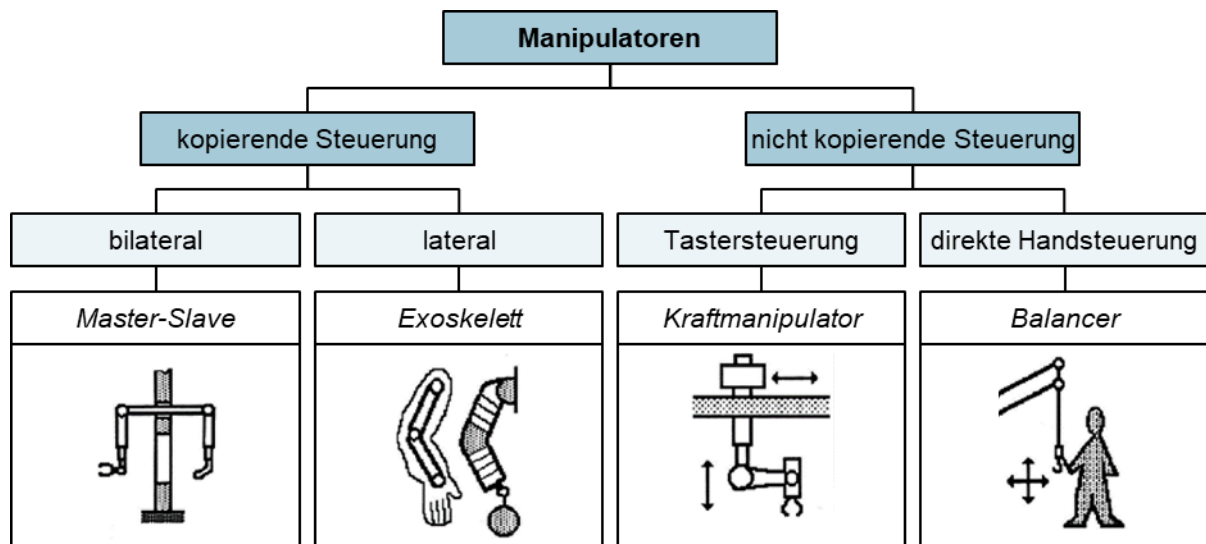


Bild 2.14: Steuerungsarten für Manipulatoren [HESS98, S. 3]

Control modes for manual operated manipulators

Manipulatoren mit kopierender Steuerung besitzen einen Bedienmechanismus, dessen Kinematik dem des Arbeitsarms entspricht. So können die Bewegungen des Bedieners vom Aktuator kopiert werden. Bei einer bilateralen Steuerung werden die vom „Slave arm“ auftretenden Arbeitswiderstände, Schwer- und Trägheitskräfte zurück auf den „Master arm“ übertragen [HESS95, S. 37]. Dies ist bspw. bei mechanischen oder Servo-Parallel-Manipulatoren in Master-Slave-Bauweise der Fall. Hingegen wird von einer lateralen Steuerung gesprochen, wenn die vom Menschen vorgegebenen Bewegungen von Rumpf und Extremitäten über ein getragenes Exoskelett kraftverstärkt ausgeführt werden [HESS01, S. 5]. Das trifft z.B. bei Manipulatoren mit Positionsregelung zu.

Manipulatoren mit nicht kopierender Steuerung können zum einen mit einer Tastersteuerung wie beim Kraftmanipulator versehen sein. An dieser Stelle fügt HESSE zum anderen eine zusätzliche Kategorie, nämlich die direkte Handsteuerung hinzu. Sie ist einer weiteren Manipulator-Art, dem Balancer-Manipulator, zugeordnet. KÖHLER bezeichnet Balancer-Manipulatoren als artverwandt mit den Kraft-Manipulatoren, da sie meist von einem Hebel oder Drehgriff, der nahe der Lastaufnahmeeinrichtung angebracht ist, gesteuert werden. Sie werden immer häufiger in der Industrie eingesetzt und besitzen sowohl hydraulisch, elektrisch oder pneumatisch angetriebene, als auch nicht angetriebene Bewegungsachsen [KÖHL81, S. 26]. Nach HESSE steht die direkte Handsteuerung als spezifisches Merkmal dieses Manipulator Typs im Vordergrund. Die anhängende Last wird bei der Lastaufnahme automatisch in einen Schwebezustand gebracht und der Manipulator wird vom Bediener direkt handbewegt [HESS95, S. 23]. Somit liegt neben der Steuerung ein weiteres Hauptmerkmal des Balancers im Ausgleich von Gewichtskräften gegen die Schwerkraft [HESS98, S. 4]. Neben dem Begriff Balancer gibt es noch eine Reihe synonyme Bezeichnungen wie Lastarmmanipulator oder Ausgleichsheber. Balancer gelten als jene Manipulator-Art, die gerade im industriellen Sektor seit mehreren

Jahrzehnten vermehrt eingesetzt werden, um den Spalt der Technisierung zwischen Roboter und manuellen Tätigkeiten auszufüllen [HESS16a, S. 418]. So fügt sich der Balancer genau zwischen Industrieroboter und Hebezeuge ein. Die Größe der Balancer-Manipulatoren ist auf den Menschen abgestimmt, sodass er die Bedienmittel gut mit Händen und Armen erreichen kann. Diese Auslegung führt zu einem hohen Bedienkomfort [HESS98, S. 5–6]. Balancer-Manipulatoren werden von den Herstellern oftmals baukastenmäßig zusammengesetzt und angeboten. Der Lastarmmanipulator oder der Lastheber ist die zentrale Bewegungskinematik. Dieses Modul wird z.B. als Standsäulentyp, hängend an einer Deckenbefestigung, seitlich an einer Wandkonsole oder in Laufschienebauformen zusammengestellt. Speziell bei der Kombination mit einem Fahrwerk oder Deckenschienen lässt sich die Reichweite bzw. der Arbeitsraum vergrößern. Im Vergleich zum Kraft-Manipulator wird beim Balancer oftmals nur die Vertikalbewegung als eigentlich schweres Heben durch Antriebe unterstützt. In vielen Fällen wird nach der Lastaufnahme die Anhängelast durch einen Drehschalter bis zur „Schwereelosigkeit“ eingestellt [HESS93, S. 19–20]. Der Masseausgleich wird häufig pneumatisch umgesetzt und erfolgt nach manueller Einstellung automatisch. Mittels entsprechender Stellelemente kann er im Anschluss reguliert werden [HESS92, S. 218]. Horizontale Bewegungen werden manuell ausgeführt. Hierbei werden leichtgängige Gelenke und eine reibungsarme Kinematik eingesetzt [HESS93, S. 19–20]. Es gilt dabei, nur die Reibungskräfte in den Gelenken durch manuell aufzubringende Kräfte zu überwinden [HESS92, S. 217]. Zusammenfassend gilt es zu sagen, dass im Vergleich zur Tastersteuerung des Kraft-Manipulators die direkte Handsteuerung der Balancer gerade bei den vertikalen Hebebewegungen mit speziellen Bedienhebeln oder Drehgriffen feinfühlicher, stufenlos und damit auch schneller erfolgen kann. Der Gewichtsausgleich nach Aufnehmen der Last erfolgt entweder manuell oder automatisch. Im Schwebezustand kann dann eine direkte Handsteuerung unter anderem auch direkt an der Last erfolgen.

2.4.2 Teleoperatoren

Teleoperators

Teleoperatoren sind nach VDI 2860 ferngesteuerte Manipulatoren [VDI 2860, S. 15]. Sie werden aus der Ferne handgeführt und hauptsächlich in Gießereien oder Kernreaktoren, aber auch in der Meeres- und Weltraumtechnik eingesetzt. Im Prinzip in Umgebungen, in denen sich der Mensch gar nicht oder nur mit Hilfsmitteln aufhalten kann [HESS93, S. 27]; [HESS95, S. 277]. Dabei erfolgt nur eine indirekte Sicht auf den Handhabungsort. Im Normalfall über ein Fernsehbild. Die vom Operateur ausgeübten Bewegungsbefehle können entweder original, kraft- oder gar maßstabsverändert abgebildet werden [HESS93, S. 28].

Es gibt verschiedene Bedienmodi für Teleoperatoren. Sie unterscheiden sich in der Form der interaktiven Verbindung zwischen Operateur und Teleoperator. Nachfolgend werden fünf Steuerprinzipien dargestellt [HESS95, S. 266]:

- **Allgemeines Prinzip:** Operateur empfängt Informationen vom Einsatzort, kann aber nicht darauf einwirken.
- **Master-Slave-Positionssteuerung:** Operateur steuert nach direkter oder indirekter Sicht (z.B. Fernsehbild)
- **Master-Slave-Steuerung mit Krafrückkopplung:** Operateur erfährt zusätzlich zu vorheriger Steuerart die am Einsatzort ausgeübte Kraft.
- **Supervisory-Steuerung:** Operateur wählt zwischen manueller, überwachender oder automatischer Steuerung. Bei überwachender Steuerung werden falsche Befehle des Operateurs steuerungsseitig erkannt und abgelehnt.
- **Autonomer Roboter:** Operateur beobachtet die autonomen Bewegungen des Teleoperators und greift nur in kritischen Situationen stoppend ein.

Da diese Bewegungseinrichtungen fast ausschließlich für den Einsatz in gefährlichen Umgebungen oder für Aufgaben mit speziellen Anforderungen, wie in der Medizin, vorgesehen sind, werden sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.4.3 Hebezeuge

Lifting devices

Hebezeuge können generell vom Manipulator durch die fehlende Kinematik zur Führung der Bewegung abgegrenzt werden. Sofern bei einer manuell gesteuerten Bewegungseinrichtung kein „Manipulatorarm“ vorhanden ist, sondern die Last nur mittels eines biegeschlaffen Elements wie einem Stahlseil, einer Kette oder eines Flachriemens gehoben wird, wird im Rahmen dieser Arbeit mit Blick auf die Handhabung in der Montage von einem Hebezeug gesprochen. Hebezeuge ermöglichen die pendelnde Bewegung einer Last. Allerdings ist eine exzentrische Lastaufnahme oder Momentenabstützung nicht möglich [HESS01, S. 10]. Oftmals wird auch der Begriff Hubeinheit oder Hubwerk verwendet [HESS01, S. 6]. Dazu würden im engeren Sinne auch Hubzylinder ohne biegeschlaffe Lastaufnahme gehören, die in dieser Arbeit unter dem Begriff Hebezeug nicht direkt betrachtet werden. Davon abgesehen ist bei beiden Begriffen deutlich erkennbar, dass der technische Ursprung und Fokus auf dem vertikalen Heben der Last liegt. Es handelt sich somit um Arbeitsmittel zum Heben und Senken von Lasten, die aber ebenfalls eine begrenzte horizontale Bewegung erlauben [HESS98, S. 3]. Auch Hebezeuge lassen sich entsprechend ihrer Steuerungsart kategorisieren. Ähnlich wie bei Manipulatoren existieren Geräte mit Tastersteuerung oder mit direkter Handsteuerung. Die Übersicht ist in **Bild 2.15** dargestellt.

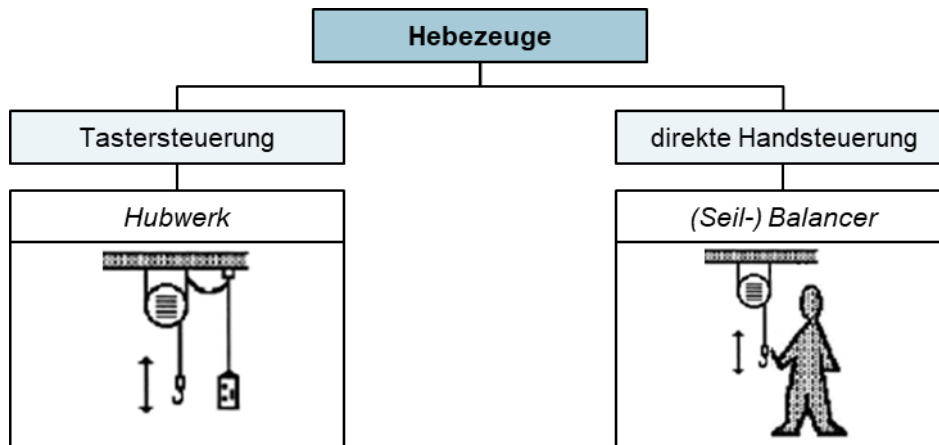


Bild 2.15: Steuerungsarten für Hebezeuge [HESS98, S. 3]

Control modes for manual operated lifting devices

Die Steuerung bei regulären Hubeinheiten erfolgt per Tastendruck. Die Aufwärtsbewegung wird dadurch maschinell durch das Hubwerk umgesetzt. Die Hubgeschwindigkeit ist dabei stark vom jeweils eingesetzten Antrieb und der Regelung des Tastschalters abhängig. Es existieren Hebezeug-Ausführung mit einfacher, mehrfacher oder stufenloser Hubgeschwindigkeit. Sofern ein Hubwerk noch horizontal in ein oder mehreren Achsen bewegbar ist, wird es als Kran bezeichnet [VDI 2411, S. 13]. Es gibt verschiedenste Kranvarianten. Im Bereich der Montage der industriellen Produktion sind in der Regel Hallen-Brückenkrane mit Laufkatze für große schwere Lasten und Säulen- oder Wandschwenkkrane mit Katzausleger für kleinere Traglasten häufig anzutreffen; vgl. [VDI 2411, S. 14]. In der Montage werden zur Handhabung schwererer Bauteile oder Behälter oftmals kostengünstige Elektrokettzüge als Hubwerk eingesetzt. Sie werden in der Regel als Hubwerk in einem Schwenkkran oder einem Kranbaukastensystem mit Deckenschienen eingesetzt. Der Mitarbeiter kann so mit der einen Hand den Haken oder Greifer inklusive Last horizontal bewegen und sogleich mit der zweiten Hand die Auf- und Ab-Steuerung per Knopfdruck betätigen.

Ähnlich wie bei den Manipulatoren gibt es jedoch auch Hebezeuge mit einer direkten Handsteuerung, denen eine Balancer-Funktion zugrunde liegt. Bei dieser Kategorie, werden die vertikalen Auf- und Abwärtsbewegung manuell vom Bediener gesteuert. Der Balancer hält dabei die Last immer im Gleichgewicht zur Schwerkraft. Aus diesem Grund ist die manuell aufzubringende Kraft vergleichsweise gering und kann feinfühlig dosiert werden [HESS98, S. 17–18]. In **Bild 2.16** ist eine Übersicht der typischen Hebezeuge mit Balancer Steuerung dargestellt.

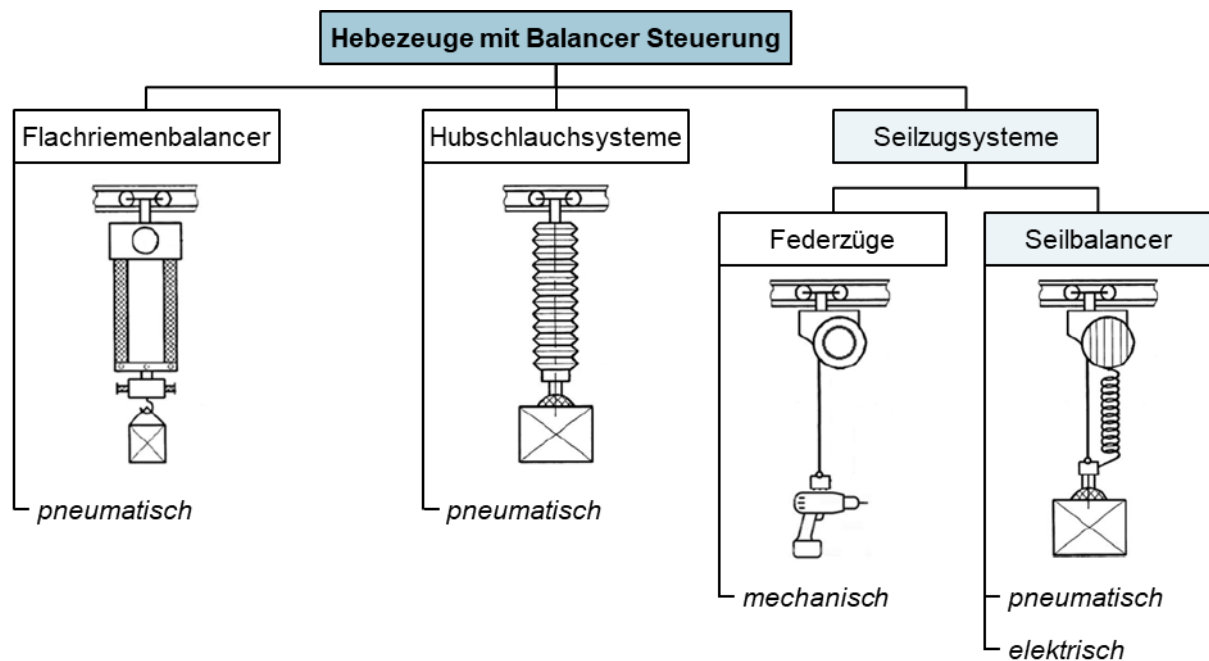


Bild 2.16: Hebezeuge mit Balancer Steuerung (Eigene Darstellung nach [HESS01, S. 11]; [HESS01, S. 51–59])

Balancer lifting devices

Der **Flachriemenbalancer** basiert auf einer Konstruktion mit zwei Spezialriemen, die zur Hubvergrößerung in einem umgekehrten Flaschenzugprinzip über Rollenpaare geführt sind. Angetrieben wird dieser Balancer mittels einem horizontal liegenden Pneumatikzylinder, der bestimmte Umlenkrollen verschiebt und somit die Auf- und Ab-Bewegung des Flachriemens erzeugt [HESS01, S. 51–52]. Aufgrund des Pneumatiktriebs und der damit verbundenen fehlenden Skalierbarkeit wird dieser Typ in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Die Konstruktion von **Hubschlauchsystemen** beruht auf einem vertikal angeordneten mehrlagigen Gewebe-Faltenschlauch. Durch Aufbringen eines Vakuums kann der Faltenschlauch eine Hubbewegung ausführen. Für den Balancer Betrieb wird die Last mit dem Bediengriff bis zur gewünschten Höhe angehoben. Im Anschluss kann das Objekt in der Schwebelage gehalten werden. Oftmals ist das Hubschlauchsystem mit einem Vakuum-Saug-Greifer verbunden und wird vorwiegend in der Verpackungsindustrie zum Umsetzen von Lasten wie Kartons, Fässer, Säcke, Gehäuse, und Platten genutzt [HESS01, S. 54–55]. Im Vergleich zu den Flachriemenbalancern ist der Energieaufwand für den pneumatischen Antrieb um ein vielfaches höher. Dafür können mit dem Saugluftstrom aber auch poröse Objekte gehoben werden [HESS98, S. 65]. Da diese Geräte nur für einen gewissen Traglastbereich und spezielle Anwendungen zum Einsatz kommen, werden sie in dieser Arbeit nicht weiter beachtet.

Zur Komplettierung der Übersicht sind an dieser Stelle auch noch die **Federzüge** bzw. Federzugbalancer genannt. Sie werden meist zur Aufhängung von Handwerkzeugen wie Schraubern genutzt, wozu sie in verschiedenen Traglastbereichen auswählbar

sind. Für den Gewichtsausgleich sind Federn verbaut und es lässt sich ein Schwebezustand für eine bestimmte Last und eine bestimmte Länge des Seilzugs einstellen [HESS01, S. 56]. Diese Geräte werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Die am häufigsten anzutreffenden Gerätetypen mit Schwerkraftausgleich sind allerdings Hubwerke mit Seilzügen. Sie werden als **Seilbalancer** bezeichnet [HESS01, S. 6]. Bei diesen Geräten kann der Gewichtskraftausgleich über den gesamten Hubbereich automatisch geregelt werden. Von Vorteil ist die Möglichkeit, das Seil eines Seilbalancers im Inneren einer Profilrohrkonstruktion, in einer Teleskopachse oder über Rollen an einem Gelenkarm zu führen. Damit ist es ein vielseitig einsetzbares Hubwerk mit Balancierfunktion, das aufgrund der kleinen bewegten Massen auch sehr dynamisch zu handhaben ist [HESS01, S. 56]. Seilbalancer gibt es mit pneumatischem und elektrischem Antrieb. Vornehmlich die elektrisch angetriebenen Varianten bieten einige Vorzüge für den universellen und kostengünstigen Einsatz von Balancern, da sie mit verschiedensten Kinematiken kombiniert werden können.

2.4.4 Steuerungsvarianten von Balancern

Balancer control modes

Generell besitzen Balancer verschiedene Steuerungsvarianten. HESSE zählt je nach Antrieb, Ausführung und Anforderungen vier existierende Grundmodi auf, die in **Bild 2.17** dargestellt sind [HESS01, S. 51–52].

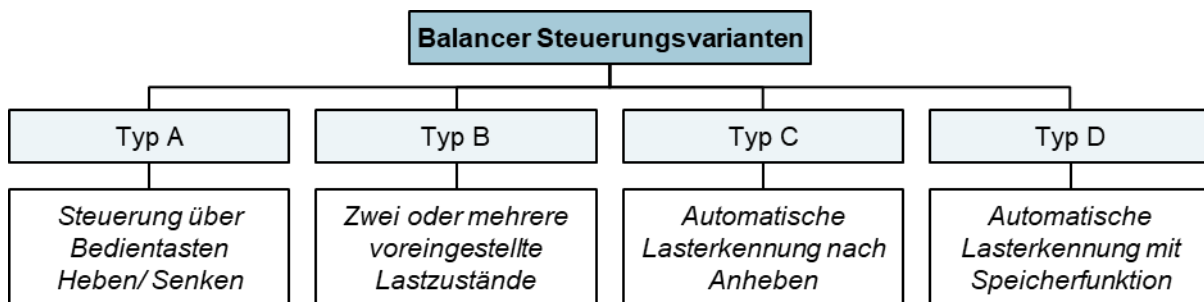


Bild 2.17: Balancer Steuerungsvarianten; nach [HESS01, S. 51–52]

Balancer Control modes

Die Steuerungsvarianten unterscheiden sich nach den folgenden Kriterien:

- **Typ A:** Steuerung über Bedientasten (Heben/Senken) → siehe Tastersteuerung
- **Typ B:** Balanciersteuerung mit zwei einstellbaren Lastzuständen. Zum Beispiel wird in Lastzustand 1 nur das Lastaufnahmemittel gehandhabt (Leerhub). In Lastzustand 2 wird das Lastaufnahmemittel mit Last gehandhabt (Lasthub). Diese Steuerung wird in der Regel pneumatisch mit zwei einstellbaren Balancierventilen umgesetzt und ist nur für die Handhabung einer immer gleichen Last brauchbar. Das Umschalten erfolgt meist durch einen Schalter im Greifer (offen/geschlossen).

Es existieren jedoch auch komplexere Steuerungen gleichen Aufbaus für mehr als zwei Lastzustände. Für die jeweilige Last gibt es dann zugeordnete Auswahlknöpfe am Bediengerät [HESS98, S. 83–84].

- **Typ C:** Balanciersteuerung mit automatischer Lasterkennung. Bei dieser Steuerung wird die Last nach dem Anheben automatisch erkannt und kompensiert. Dies ist für einen bestimmten vorgegebenen Lastbereich möglich. Die Lasterkennung erfolgt mittels eines Kraftsensors und einer Auswerteelektronik. Mit Hilfe der Elektronik lassen sich unter anderem auch die Hub- und Senkbewegungen beeinflussen sowie dynamische Massenkräfte ausgleichen. Das Heben und Senken erfolgt aber immer an einem Bediengriff [HESS98, S. 84–85].
- **Typ D:** Balanciersteuerung wie Typ C, jedoch mit Speicherfunktion. Nach dem Anheben einer Last kann der Lastzustand per Knopfdruck vom Bediener elektronisch gespeichert werden. Im Anschluss kann die Kraffteinleitung für die Hubbewegung direkt an der Last und nicht nur am Bediengriff erfolgen. Diese direkte Handführung an der Last ist sehr flexibel und universell, da der Bediener an verschiedensten Stellen und aus unterschiedlichsten Positionen heraus manipulieren kann. Speziell für Balanciersteuerungen von Typ D gilt es jedoch zu sagen, dass das Rücksetzen des Speicherbetriebs in den Normalbetrieb in den meisten Fällen durch eine externe Information erfolgen muss. Dem System muss signalisiert werden, dass die Last gelöst wird. Oftmals wird das durch einen im Lastaufnahmemittel integrierten Schalter gelöst, der beim Öffnen des Greifers aktiviert wird [HESS98, S. 84].

Speziell bei der Montage müssen Lasten am Ende des Handhabungsvorgangs oftmals eingefädelt, abgelegt oder eingehängt werden. Im Balancierbetrieb mit der Steuerung Typ D kann bei der direkten Handführung an der Last gerade bei früheren Geräten während des Absetz- oder Ablegevorgangs der Last jedoch eine Art „Hüpf-Effekt“ auftreten. Da die automatisch erkannte Last gespeichert wird, erfolgt das Heben und Senken bei der direkten Handführung an der Last über manuelle Kraffteinwirkung auf die Last. Die Sensoren erkennen somit, ob die Last „leichter“ (Heben) oder schwerer wird (Senken). Beim Absetzen der Last erkennt der Sensor jedoch genauso wie beim Heben eine reduzierte Last, da diese z.B. auf dem Tisch liegt. Als Folge versucht die Balanciersteuerung die Last wieder anzuheben, worauf sie der Bediener wieder hinunter drückt, um sie abzulegen. Daraus folgt der in der Praxis sogenannte „Flummy-“ oder „Hüpfball-Effekt“. Neuere Systeme können diesen Vorgang jedoch anhand des Kraft-Zeit-Verlaufs erkennen und schalten den Balanciermodus in Folge automatisch ab. Somit kann die direkte Handsteuerung an der Last mitunter auch im Montageumfeld eingesetzt werden.

2.5 Teilautomatisierbare intelligente Unterstützungssysteme (IAD)

Semi-automated intelligent assist devices (IAD)

In den vorigen Kapiteln wurde eine große Anzahl unterschiedlichster Handhabungseinrichtung klassifiziert, kategorisiert und abgegrenzt. Mit Blick auf Handhabungsaufgaben in der Fahrzeugindustrie, lassen sich für den Einsatz von Handhabungseinrichtungen grob zusammengefasst zwei verschiedene Grundrichtungen erkennen.

Auf der einen Seite finden sich programmierbare Handhabungsgeräte bzw. Industrieroboter für Automatisierungszwecke. Sie sind aus Sicherheitsgründen vom Mitarbeiter abgegrenzt und relativ inflexibel oder aufwändig bezüglich der Anpassungsfähigkeit an die Handhabungsaufgabe. Des Weiteren gibt es speziell für schwere Lasten nur eine äußerst geringe Anzahl an Geräten.

Auf der anderen Seite gibt es die manuell gesteuerten Bewegungseinrichtungen, wie Manipulatoren oder Hebezeuge, in unterschiedlichsten Bauformen und Ausführungen, zum Teil auch als Balancer mit Schwerkraftausgleich. Manipulatoren sind dabei in der Regel sehr aufgabenspezifisch ausgelegt, Hebezeuge dagegen vergleichsweise vielfältig einsetzbar. Dafür bieten sie jedoch nur eine begrenzte Unterstützung, vor allem beim Heben von Lasten.

Diese Einteilung beruht hauptsächlich auf der Automatisierbarkeit bzw. auf der Steuerung und Bedienung der Handhabungseinrichtungen. Mittlerweile wird jedoch an einer neuen Kategorie von intelligenten assistierenden Handhabungsgeräten geforscht. Es handelt sich dabei um hybride Systeme, die stark auf die Unterstützung des Mitarbeiters fokussieren und seine Stärken in der Flexibilität und beim genauen Manövrieren und Positionieren von Lasten gezielt einsetzen. Parallel dazu sind sie sogar teilautomatisierbar.

2.5.1 Einordnung der assistierenden Handhabungstechnik

Classification of assistive handling technology

Es ist feststellbar, dass mit Fokus auf die Automotive-Industrie die typischen Einrichtungen der Produktion permanent durch den Einsatz von Industrierobotern transformiert wurden. Die größten Veränderungen sind speziell in Bereichen mit rauen Umgebungsbedingungen oder Sicherheitsrisiken, wie in den Bereichen Rohbau und Lackierung erkennbar. Es existieren einerseits speziell in der Pkw-Produktion mehrere automatisierte Anlagen in der Montage. Wird der Blick andererseits auf die Produktion von variantenreicheren Produkten, wie Lkw, Traktoren oder andern Nutzfahrzeugen mit geringerer Stückzahl gewandt, sind im Vergleich nur wenige Beispiele im Einsatz. Gerade in diesem Industriesektor blieben die anderen Gewerke neben Rohbau und Lackierung über Jahrzehnte hinweg von der Entwicklung und Wandlung zur Automatisierung fast ausgelassen. Vor allem im Bereich der Endmontage aber auch in angrenzenden Lager- und Logistikbereichen sind immer noch eine Vielzahl der

klassischen manuell gesteuerten und pneumatisch angetriebenen Manipulatoren und Hebezeuge anzutreffen [AKEL99, S. 730]. Speziell im Bereich der Fahrzeug-Endmontage wird primär noch auf die konventionellen Handhabungsgeräte, wie Kettenzüge oder Manipulatorarme mit pneumatischen Balancern, vertraut. Im Englischen werden diese Geräte auch unter dem Begriff „**assist devices**“ (Unterstützungssysteme) zusammengefasst. Da diese Systeme hauptsächlich auf den Schwerkraftausgleich abzielen, kommen sie gerade mit der Tendenz zu immer schwereren Montagemodulen und generell mit schweren Lasten an ihre Grenzen hinsichtlich der Beweglichkeit. Hauptproblem ist die ergonomische Belastung beim horizontalen Bewegen der Last aufgrund der Massenträgheit. Beispiele sind Richtungs- oder Geschwindigkeitsänderungen oder das Überwinden der Reibkraft in den Gelenken [WANN98, S. 1].

Aus diesem Grund wurde mit der Forschung von sogenannten intelligenten Unterstützungssystemen begonnen, auf Englisch „**Intelligent assist device**“ (IAD). Sie stellen eine neue Kategorie hybrider Handhabungseinrichtungen dar, die eine direkte physische Interaktion mit dem Bediener ermöglichen und speziell für Handhabungsaufgaben in der Montage designet sind. Die Zielsetzung ist die Reduktion von ergonomischen Risiken bei Verbesserung der Sicherheit, Qualität und Produktivität. Das charakteristische Merkmal dieser neuen Gattung hybrider Bewegungseinrichtungen ist die Nutzung softwarebasierter Fähigkeiten und Möglichkeiten in Verbindung mit elektromechanischer Hardware, wie sensorische und aktuatorische Subsysteme [AKEL99, S. 730]. Wie in **Bild 2.18** dargestellt, lassen sich IAD somit entsprechend den vorigen Ausführungen als hybride Handhabungseinrichtungen für die Montage zwischen den vollautomatischen Industrierobotern und den manuell gesteuerten „assist devices“ wie Manipulatoren und Hebezeugen einordnen.

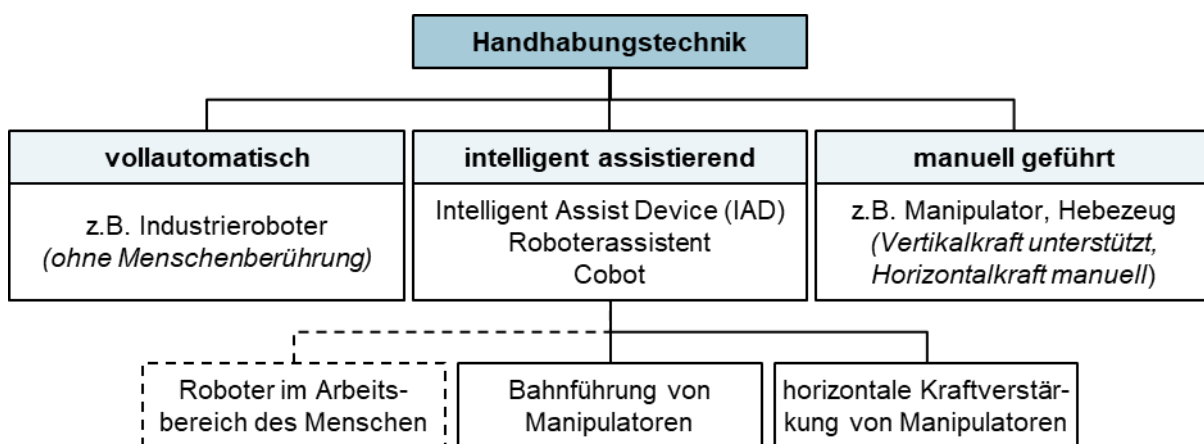


Bild 2.18: Einordnung von IAD in die Gliederung der Handhabungstechnik (vgl. [HESS16a, S. 434]; [HESS16b, S. 338–339])

Classification of IAD in handling technology structure

Der Begriff IAD wird allerdings sehr vielfältig verwendet. Oftmals wird für IAD synonym der Begriff „**Cobot**“ (auf Deutsch: **Kobot**) verwendet. Der Begriff steht für

kollaborierender bzw. kooperierender oder kooperativer Roboter. In der Forschung wird unter diesem Begriff eine neue Klasse von Handhabungssystemen eingestuft. Im Vordergrund steht hierbei die Kombination der Vorteile von Industrierobotern (Programmierung, Bahnführung, Präzision) und handgeführten Manipulator- oder Seilbalancern (leichte Bedienung, geringere Kosten). Die Entwicklung dieser Systeme setzt sich zum Ziel, ein wirtschaftliches und ergonomisches Handhabungssystem für die Aufgaben in der Produktion zu schaffen [SURD12, S. 10]. Im Vergleich zum klassischen Roboter arbeitet der Cobot nicht vollautomatisch und autark, sondern eng mit dem Menschen zusammen [HESS16a, S. 433]. Insbesondere im Bereich der Handhabung kann ein Cobot jedoch auch als Unterkategorie von IAD verstanden werden, der mindestens softwarebasierte virtuelle Führungsoberflächen und teilweise auch eine Verstärkung der menschlichen Bedienkraft besitzt [AKEL99, S. 728]. Dementsprechend wird zwischen passiven Cobots, die nur eine Bahnführung besitzen und aktiven Cobots mit zusätzlicher Kraftunterstützung unterschieden [AKEL99, S. 730–731]. Wie schon vom Begriff erkennbar, ist ein Cobot primär oder ursprünglich ein Roboter. Ein primäres Erkennungsmerkmal des Cobots ist ein Bediengriff in der Nähe des Endeffektors, der die vom Bediener eingeleiteten kleinen Kraftmomente verstärkt und in eine Bewegung umsetzt. Neben dem Schwerkraftausgleich werden dabei speziell auch Trägheits- und Reibkräfte ausgeglichen. So können schwere Lasten bei kleinstem Kraftaufwand bewegt werden. Ein Cobot besitzt dabei keine autonom durchführbaren, vorprogrammierten Bewegungsabläufe. Zur Unterstützung des Bedieners können allerdings Bereiche einprogrammiert werden, die nicht überschritten werden können [FELD14, S. 330]. Die horizontale Kraftverstärkung dient in der Regel der Kompensation von prozessual bedingten Kräften, die aufgrund der Massenträgheit der Last oder z.B. bei Anpressvorgängen in der Montage auftreten. Cobots für schwere Lasten mit speziellem Bediengriff werden meist mit dem sogenannten „Admittanz-Prinzip“ geregelt. Dabei ist im Bediengriff ein Kraft-Momenten-Sensor verbaut, der die Bedienkräfte des Menschen erfasst und in eine entsprechende Roboterbewegung umsetzt. Der Cobot wird dabei so geregelt, dass der Bediener eine in alle Richtungen gleichmäßige, virtuelle Masse-Feder-Dämpfer-Systemreaktion empfindet. Die Einstellungen dieses virtuellen Systems lassen sich beliebig parametrieren. So wird in der Regel die große Trägheit einer schweren Last reduziert. Bei präzisen Montage- oder Einfädelvorgängen kann hingegen eine höhere Dämpfung notwendig sein [SURD12, S. 10–11]; vgl. [DUCH12, S. 148–159]. Die Regelung nach dem Admittanz-Prinzip stellt somit eine Methode der Robotersteuerung durch Kontakt mit der Umgebung oder mit dem Bediener dar. Die Referenzeingaben sind dabei Sollpositionen. **Bild 2.19** zeigt den schematischen Aufbau eines Arbeitsbereichs mit verschiedenen computergesteuert festgelegten Grenzbereichen basierend auf dem Admittanz-Prinzip. Die Zonen können z.B. als virtuelle Wände, aktive Schranken oder Bereiche mit unterschiedlicher Dämpfung ausgeführt sein [HESS16a, S. 434]; [HESS16b, S. 339].

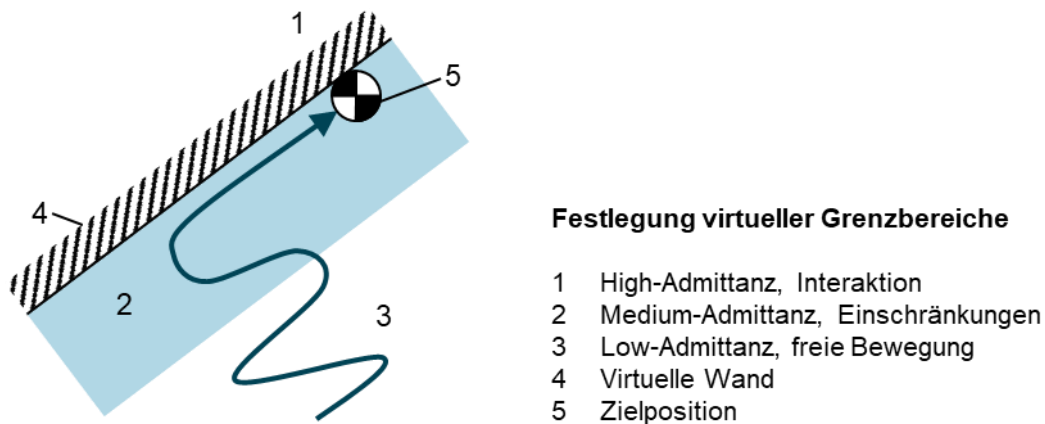


Bild 2.19: Virtuelle Grenzbereiche Admittanz-Prinzip (vgl. [HESS16a, S. 434]; [HESS16b, S. 339])

Virtual limit areas admittance control

Ein weiterer synonyme Begriff, gerade im deutschsprachigen Raum ist der **Roboterassistent** oder zum Teil auch Assistenzroboter genannt. Bei diesem Begriff tritt der unterstützende oder assistierende Gedanke in den Vordergrund, sodass er als Bewegungshelfer des Menschen definiert und genau in der Technisierungslücke zwischen Roboter und Manipulator eingeordnet wird [HESS16b, S. 338–339]. Im Vergleich zu einem Cobot, kann der Roboterassistent jedoch auch programmierte Bewegungsabläufe durchführen. Im Produktionsumfeld wird unter der Rubrik „assistierende Roboter“ besonders im deutschen Sprachraum das Thema der direkten **Mensch-Roboter-Kooperation** (MRK) zusammengefasst. Dabei wird aber hauptsächlich versucht, die typischen Bauformen der Knickarm-Industrieroboter so anzupassen, dass sie im selben Arbeitsbereich mit dem Menschen automatisiert betrieben werden können. Da Roboter normalerweise immer durch einen Schutzzaun vom Menschen abgetrennt werden müssen, gelten für Roboterassistenten strenge Sicherheitsstandards [FELD14, S. 330–331]. Aktuell sind die verschiedenen Kooperations- oder Kollaborationsarten in der Norm DIN EN 10218-1:2011 beschrieben. Nach [DIN EN ISO 10218-1, S. 21–22] lassen sich die folgenden grundlegenden Anforderungen an den kollaborierenden Betrieb auflisten:

- Sicherheitsbewerteter überwachter Halt des Roboters, wenn sich Menschen im Kollaborationsraum befinden, mit automatischem Wiederanlauf.
- Handführung des Roboters mit reduzierter, sicherheitsbewerteter und überwachter Geschwindigkeit.
- Überwachte Geschwindigkeit und Mindestabstand zwischen Mensch und Roboter.
- Begrenzung der dynamischen Leistung und der Kraft des Roboters durch geeignete Konstruktion und Auslegung.

Das ist je nach Funktionsumfang auch für IAD ein wesentlicher Bestandteil, der für die Einsetzbarkeit in einer Fabrik beachtet und gewährleistet werden muss.

Unter dem Begriff IAD können somit zusammenfassend verschiedenste Handhabungseinrichtungen mit entsprechend unterschiedlichen Anforderungen für den Einsatz und für die Sicherheit eingeordnet werden. Im Betrachtungsraum der Handhabung von großen, schweren Lasten, hauptsächlich in der Nutzfahrzeug-Montage bedarf es daher einer thematisch angepassten Definition. Im Rahmen dieser Arbeit werden unter IAD ein- oder mehrachsige, manuell bediente, computergesteuerte und servomotorisch angetriebene Handhabungsgeräte verstanden, die den Mitarbeiter in verschiedensten Bereichen der Produktion, wie bspw. im Lager oder an der Montagelinie befähigen, Lasten schnell, präzise und ergonomisch sicher zu heben, zu bewegen und zu positionieren. Die Kraft des Bedieners wird dabei elektrosensorisch erfasst und verstärkt [KAZE02, S. 219]; [IEEE03, S. 1].

In wenigen Worten werden darunter vornehmlich modernere Versionen manuell gesteuerter und servomotorisch angetriebener Manipulatoren mit einem erweiterten Funktionsumfang verstanden, die neben dem Schwerkraftausgleich noch eine horizontale Kraftverstärkung besitzen und mit zusätzlich unterstützenden programmierbaren Funktionen wie bspw. der Bahnführung ausgestattet sein können.

2.5.2 Funktionen intelligenter assistierender Handhabungsgeräte

Functions of intelligent assistive handling devices

IAD lassen sich nicht ausschließlich basierend auf ihrer Steuerung und Kinematik entsprechend den aus den vorigen Kapiteln eingeführten Kategorien einordnen. Als hybride Systeme verschmelzen die Grenzen von verschiedenen Handhabungseinrichtungen. So lassen sich bei computergesteuerten IAD zum einen gewisse Aufgaben programmgesteuert umsetzen und zum anderen steht eine direkte Handsteuerung mittels Bediengriff oder direkt an der Last im Zentrum der Entwicklung dieser Systeme. Daher werden zur Abgrenzung von IAD einige spezifische Basis-Funktionalitäten herangezogen. Eine Übersicht der charakteristischen IAD Funktionalitäten, die sie sowohl zu den Industrierobotern als auch zu den Manipulatoren und Hebezeugen abgrenzen, ist in **Bild 2.20** dargestellt.

Die **Bedienkraftverstärkung** besteht im Vergleich zu Balancer Manipulatoren bei den IAD somit nicht nur für das vertikale Heben, sondern auch für horizontale und je nach Kinematik sogar für rotatorische Bewegungen. Eine weitere dadurch ermöglichte Eigenschaft ist die **Kaschierung der Massenträgheit**. Vor allem bei Start und Stopp von horizontalen Bewegungen mit großer Last können hohe Kräfte aufgrund der Massenträgheit auftreten. Bei IAD können diese mittels Servoantriebe und Computersteuerung für den Bediener reduziert werden, sodass die aus der manuell aufgebrachten Bedienkraft resultierende Bewegung in alle Richtungen gleichmäßig ist. Im Vergleich hierzu werden bspw. bei Manipulatoren zwar die Reibkräfte in den Gelenken minimiert, die auftretenden Trägheitskräfte müssen jedoch manuell vom Bediener überwunden oder abgefangen werden.

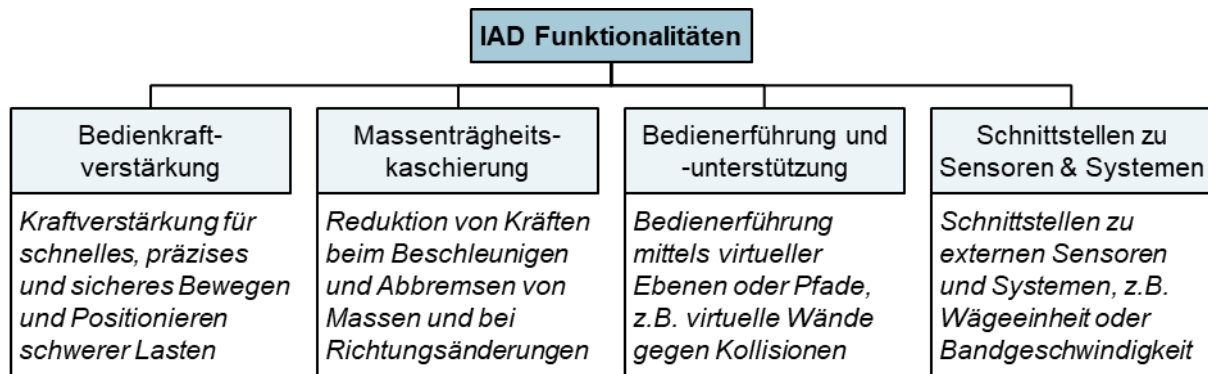


Bild 2.20: IAD Funktionalitäten (Eigene Darstellung nach [IEEE03, S. 1])

IAD Functionality

Darüber hinaus existiert noch die Funktion **Bedienerführung**. Aufgrund der Computersteuerung und der integrierten Sensoren und Antriebe können bspw. Orientierungshilfen wie virtuelle Wände eingespeichert werden, die dem Bediener als Führungshilfe oder der Kollisionsvermeidung mit statischen Objekten dienen können. Nicht zuletzt verfügen IAD noch über **Schnittstellen**, um externe Sensoren anzuschließen oder mit den IT-Systemen der Produktionssteuerung zu kommunizieren [IEEE03, S. 1].

Hinsichtlich der Steuerung und Bedienung gibt es bei IAD zwei grundlegende Vorgehensweisen. Einerseits existieren IAD mit festgelegtem Bediengriff, der die manuell aufgebrachten Kraftmomente des Bedieners z.B. mit einem verbauten Kraft-Momenten-Sensor aufnimmt und verarbeitet. Andererseits gibt es auch die Möglichkeit einer direkten Handführung an der Last. In diesem Fall kann der Bediener seine manuellen Steuerbefehle auch direkt an der Last aufbringen. Sensoren erkennen dann Bewegungskraft und -richtung, was von der Computersteuerung verarbeitet und an die Antriebe weitergeleitet wird.

2.5.3 Vorteile intelligenter assistierender Handhabungsgeräte

Advantages of intelligent assistive handling devices

Werden die programmierbaren Funktionen von IAD außen vorgelassen, bieten IAD aufgrund der zusätzlichen und neuen Funktionen in erster Linie gegenüber herkömmlichen manuell gesteuerten Handhabungsgeräten diverse Vorzüge. Ausgesuchte Vorteile von IAD sind in **Bild 2.21** dargestellt.

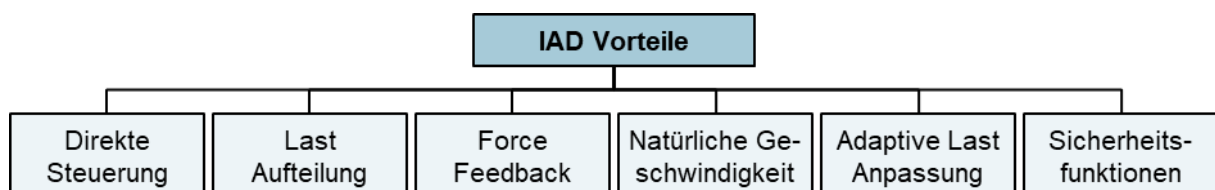


Bild 2.21: Technologische Vorteile von IAD (Eigene Darstellung nach [KAZE02, S. 222])

Technological advantages of IAD

Die technologischen Vorteile von IAD speziell gegenüber den herkömmlichen manuell gesteuerten Handhabungsgeräten wie Balancer-Manipulatoren oder Balancer-Hebezeuge sind die folgenden:

- **Direkte Steuerung:** IAD nutzen keine vermittelnden Steuereinheiten wie Taster, Knöpfe, Hebel, Drehgriffe o.ä. um die Bewegung der Last zu steuern. Nachteilig an diesen Steuereinheiten ist, dass der Bediener kein reales Gefühl für die Last hat und sich nur auf die Steuereinheit fokussiert. Bei IAD empfindet der Bediener immer ein physisches Gefühl für die bewegte Last, die seinen manuellen Bedienkräften auf eine natürliche Art und Weise folgt.
- **Last Aufteilung:** Prinzipiell teilen sich Bediener und IAD die benötigten Kräfte, um die Last zu bewegen auf. Abgesehen vom Schwerkraftausgleich werden diesbezüglich vor allem die Beschleunigungskräfte bei horizontalen Bewegungen geteilt. Das IAD übernimmt dabei einen höheren Anteil der Gesamtkraft und der Bediener nur einen geringen Anteil. Dadurch unterstützt und fühlt der Bediener nur einen Bruchteil der normal benötigten Kraft, was zu ergonomischen Vorteilen führt.
- **Force-Feedback:** Durch die direkte Steuerung und die Last Aufteilung hat der Bediener immer ein körperliches Empfinden für den „reduzierten Teil“ der bewegten Last. Diese Wahrnehmung agiert als Krafrückkopplung auf den Bediener und gibt ihm ein Gefühl für die Bewegung der kompletten Last und dient somit auch der Sicherheit.
- **Natürliche Geschwindigkeit:** IAD ermöglichen dem Bediener mit natürlichen und auch schnellen Bewegungsgeschwindigkeiten zu arbeiten, was z.B. bei Umsetzvorgängen zu kürzeren Prozesszeiten führt. Des Weiteren hindert eine variable und adaptive Geschwindigkeitsanpassung den Werker nicht bei seinen natürlichen Bewegungen, was zu einer höheren Akzeptanz führen kann.
- **Adaptive Last Anpassung:** IAD können unterschiedliche Lasten bewegen, ohne dass der Bediener Anpassungen vornehmen muss.
- **Sicherheitsfunktionen:** IAD lassen sich nicht nur hardwaretechnisch, sondern auch softwarebasiert mit Sicherheitsfunktionen ausrüsten. Dazu können bspw. ein Bewegungsstopp beim Verlassen des Bediengriffs („Freeze Funktion“) aber auch eine sanfte Reaktion bei plötzlichem Abfallen der Last gehören [KAZE02, S. 222].

Zusammengefasst rücken die Bedienerunterstützung und die intuitive Steuerung als markanteste Merkmale der IAD ins Zentrum der Entwicklung. Bedeutungsvoll ist dabei die Mensch-Maschine-Schnittstelle, an der der Bediener die geforderten Richtungen und Kräfte an das Handhabungsgerät überträgt. Wie schon beschrieben gibt es dabei zwei grundlegende Möglichkeiten:

- Steuerung an dediziertem Bediengriff mit integriertem Kraft-Momenten-Sensor.
- Steuerung mit der Hand direkt an der Last.

Eine Übersicht über den strukturellen Aufbau, wie der Bediener mit der IAD und der Last interagiert, ist in **Bild 2.22** dargestellt.

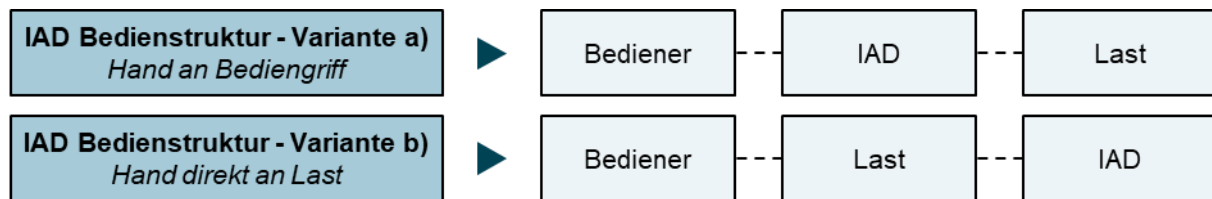


Bild 2.22: IAD Bedienstruktur Varianten (vgl. [BICC08, S. 1342–1343])

IAD control structure variants

In beiden Fällen gibt es eine direkte physische Verbindung der Bedienschnittstelle mit der Bewegung der Last. Das ermöglicht dem Bediener eine von ihm geschätzte propriozeptive Wahrnehmung. Variante a) ist bezüglich Aufbau und Steuerung meist unkomplizierter lösbar als Variante b). Generell ist die Manipulation direkt an der Last jedoch förderlicher, als nur an einem Bediengriff, der etwas entfernt von der Last platziert ist. Direkt an der Last kann der Bediener nämlich ein- oder beidhändig aus persönlich gewählter, idealer Position heraus die Bewegung steuern [IEEE03, S. 3].

2.5.4 Beispielhafte IAD aus Forschung und Industrie

Exemplaric IAD in Research and Industry

Unter der Rubrik „Intelligente Assistenzsysteme“ gibt es in der Literatur vielfältige Beispiele aus diversen Forschungsprojekten. Je nach Anwendungsgebiet und Zielsetzung werden z.B. auch Exoskelette zu den IAD gezählt. Gleiches gilt für das Thema „Cobot“, wo allerdings viele Entwicklungen in Richtung von Leichtbaurobotern mit einer vergleichsweise begrenzten Traglast führten. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch die industrielle Montage von schweren Lasten im Vordergrund steht, werden nachfolgend nur exemplarische Beispiele einiger IAD aus vergleichbaren oder themennahen Anwendungsgebieten aufgezeigt.


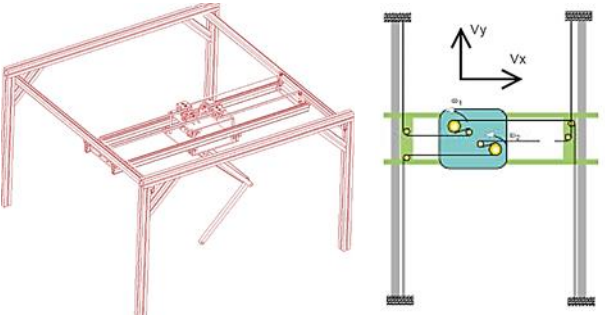
Die Ursprünge von IAD basieren auf Forschungen, die Ende der 1990er Jahre in den USA stattfanden. Dort arbeiteten Forscher der Northwestern University (COLGATE, PESHKIN), der University of California Berkeley (KAZEROONI) und General Motors (AKELLA) an Lösungen für Ergonomieprobleme in der Endmontage. Sie entwickelten die ersten Cobots und sogenannte Extender zur menschlichen Kraftverstärkung, die später unter dem Begriff IAD zusammengefasst wurden [PITT16].

Im europäischen Raum wurden ähnliche Themen erst gut eine Dekade später verstärkt aufgegriffen. Themenverwandte Forschungen wurden vor allem innerhalb des „European Integrated Project“ PiSA betrieben. In diesem Forschungsprojekt wurden u.a. intelligente Assistenzsysteme für den Werker in der Produktion entwickelt. Innerhalb dieses Projekts arbeitete insbesondere das Fraunhofer IPK (SURDILOVIC) an einer neuen Generation passiver Cobots und IAD [BERN07, S. 247–251].

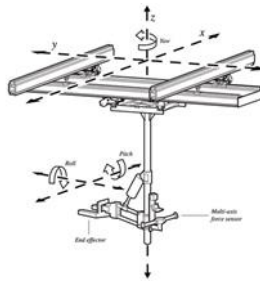
Neben einigen Demonstratoren und Testaufbauten resultierend aus Forschungsprojekten, haben bislang jedoch nur einige wenige IAD die Marktreife mit einem systemischen Aufbau erreicht. Am ehesten finden sich erwerbbar Produkte basierend auf einem intelligenten elektronischen Seilbalancer.

Die Übersicht der verschiedenen IAD aus diversen Forschungsprojekten und auch einige Beispiele aus der Industrie sind in **Tabelle 2.1** dargestellt. Diese Übersicht hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll einen Überblick zu den erfolgten Forschungsaktivitäten und deren Fokus geben.

Tabelle 2.1: Übersicht IAD Beispiele
Overview IAD examples

1		<p>Bsp. 1 zeigt einen der frühen passiven Cobots ohne Kraftunterstützung. Das System ist bodengeführt und wurde zur Türentnahme im TechCenter von General Motors (GM) in Warren, MI getestet. Das passive Cobot Modul führt die horizontalen Bewegungen und lenkt somit die Kräfte des Bedieners. Darauf befindet sich ein aufgabenspezifisches Werkzeugmodul zum Greifen und Heben der Tür.</p>
[WANN99, S. 89]; [AKEL99, S. 731–732]; [MORR16]		
2		<p>Bsp. 2 zeigt den frühen Prototyp eines „Railcobots“, der bei der Ford Motor Company Advanced Manufacturing Technology Division für die Handhabung von Truck Bumpers, getestet wurde. Der Cobot basiert auf einem Kran-schienensystem mit zwei computergesteuerten, anpassbaren CVT Riemengetrieben für horizontale Bewegung. Das System bietet auch eine geringe Kraftunterstützung, um vor allem die Reibung im Riemen-system zu überwinden. Die Bedienung erfolgt über einen festen Griff mit Kraftmessung.</p>
[WANN98, S. 6]; [WANN99, S. 94–95]; [AKEL99, S. 732–733]		

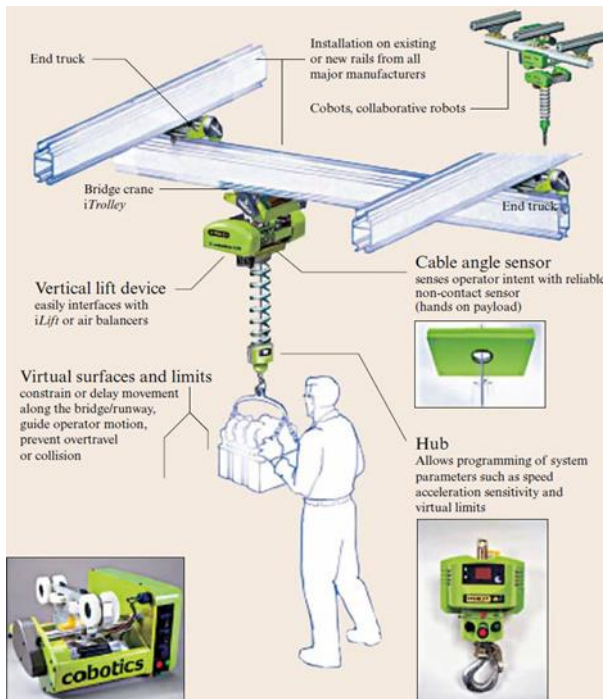
3



Bsp. 3 zeigt ein dreiaxsiges IAD mit angetriebenen translatorischen horizontalen Bewegungen (X, Y) und einer Rotation um die Z-Achse. Anhand des Prototyps mit der starren Kinematik wurden vor allem virtuelle Führungsebenen für den Bediener am Beispiel des Cockpiteinbaus sowie Schnittstellen bspw. zur Synchronisierung mit der Bandgeschwindigkeit aber auch teilautomatisierte Funktionen wie eine „Home Fahrt“ erforscht.

[COLG03, S. 2–3]

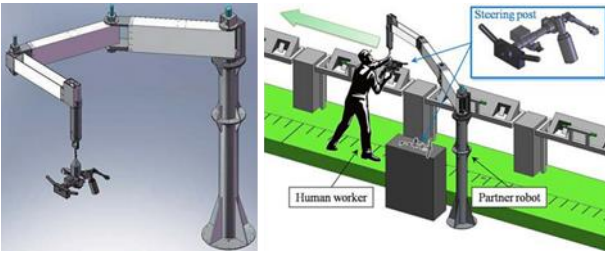
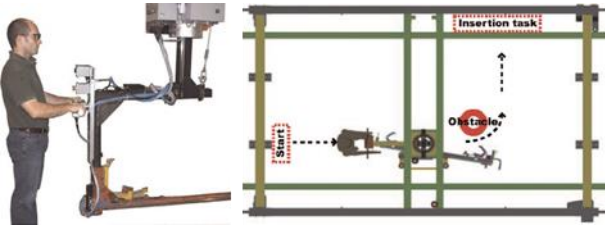
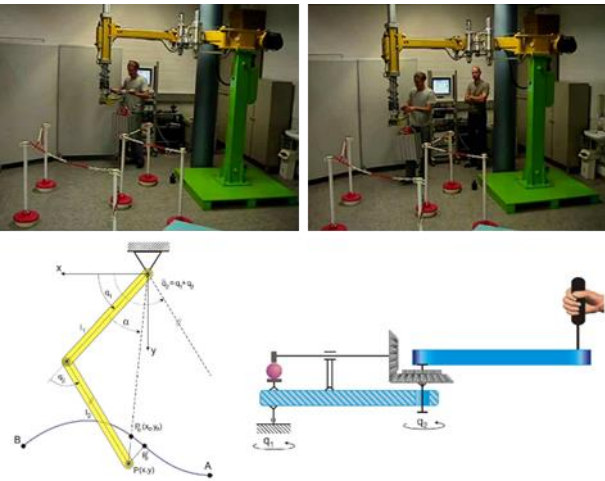
4



Bsp. 4 zeigt einen der ersten elektronischen Seilbalancer mit Servoantrieb. Im Vergleich zu normalen meist pneumatischen Seilbalancern wird die Hubgeschwindigkeit direkt am Griff über dem Endeffektor gesteuert. Horizontale Bewegungen werden über angetriebene Trolleys im Deckenschienensystem unterstützt. Die Last hängt am Seil und die Steuerung erfolgt über einen Sensor, der die Seilwinkelauslenkung misst. Die Steuerung der horizontalen Bewegungen ist somit direkt an der Last möglich. Aus dem

Forschungsprojekt hat sich die Firma cobotics ausgegründet, die das System als iTrolley angeboten hat.

[COLG03, S. 2517]; [BICC08, S. 1343]

5		<p>Bsp. 5 zeigt einen IAD Prototyp als „Partner-Robot“ in Form eines Gelenkarmauslegers (SCARA Bauweise) mit drei angetriebenen Gelenken für die Unterstützung horizontaler Bewegungen und einem passiven, mechanischen Schwerkraftausgleich in der Z-Achse. Getestet wurde der Einbau der Lenksäule im Cockpitträger. Der Roboter unterstützt das Heben und Halten der Last während des gesamten Montagevorgangs. Der Mitarbeiter konzentriert sich somit nur auf die heiklen Vorgänge, sodass seine Fähigkeiten optimal genutzt werden.</p>
[IEEE11a, S. 732]; [IEEE11b, S. 416–417]		
6		<p>Bsp. 6 zeigt einen IAD Prototypen der Laval University, der mit GM in Kanada getestet wurde. Das System basiert auf einem Kran-schienensystem. Mit ihm wurde am Beispiel des Cockpiteinbaus ein Algorithmus für die grundlegende Steuerung kooperativer Roboter getestet.</p>
[DUCH12, S. 149–156]		
7		<p>Bsp. 7 zeigt den Prototyp eines Cobots des Fraunhofer IPK. Das IAD hat zwei Freiheitsgrade für horizontale Bewegungen. Der Aufbau folgt der Bauform eines Gelenkarmauslegers. Mit der IAD wurde die virtuelle Bahnführung erforscht. Die Führung der Bewegungen wurde über ein CVT-System realisiert, womit auch eine geringe Kraftverstärkung möglich ist. Mit dem Demonstrator wurde unter anderem die virtuelle Führung der horizontalen Bewegungen erforscht.</p>
[SURD09, S. 4–5]; [SURD12, S. 10]		

8		<p>Bsp. 8 zeigt den Demonstrator eines IAD als Ergebnis aus dem europäischen Forschungsprojekt PISA. Das Fraunhofer IPK und die Firma EEPOS stellten den Prototyp auf der HMI 2013 aus. Er basiert auf einem Kranschienensystem mit Hubachse. Das System besitzt drei angetriebene translatorische Achsen (X, Y, Z) und die Steuerung erfolgt über einen festen Bediengriff, basierend auf einem Kraft-Momenten-Sensor.</p>
[GERM10, S. 877]; [FRAU13]		
9		<p>Bsp. 9 zeigt das System „Quick Lift Driven“ der schwedischen Firma BINAR. Es wurde auf der Motek 2013 vorgestellt und basiert auf einem elektronischen Seilbalancer für das Heben von Lasten. Die horizontalen Bewegungen werden auch unterstützt. Die Erkennung erfolgt ähnlich wie beim iTrolley über die Messung des Seilwinkelausschlags. Der Antrieb erfolgt über einen servomotorischen Zahnriemenantrieb.</p>
[BINA19a]		

2.6 Fazit zum Stand der Technik in Forschung und Industrie

Conclusion to State of the Art in Research and Industry

Zusammengefasst ist das Thema Handhabung ein wesentlicher Bestandteil der industriellen Produktion. Speziell in der Montage von immer variantenreicheren Produkten steigt die Bedeutung von Handhabungsprozessen zur Durchführung der wertschöpfenden Fügeprozesse immer weiter an. Zur Unterstützung existiert eine Vielzahl unterschiedlichster Kategorien von Handhabungs- und Bewegungseinrichtungen. Aufgrund der vielfältigen Anwendungen und Umgebungen wird im Wesentlichen zwischen programmgesteuerten und manuell gesteuerten Bewegungseinrichtungen unterschieden. Erstgenannte sind als klassische Industrieroboter bekannt, die meist in automatisierten Bereichen ohne Interaktion mit dem Menschen eingesetzt werden. Im Bereich der Montage innerhalb einer Großserienproduktion für großvolumige und schwere Produkte, wie bspw. Nutzfahrzeuge, werden jedoch vorwiegend zweitgenannte Einrichtungen genutzt.

Darunter fallen weitgehend Manipulatoren und Hebezeuge. Bei diesen Geräten ist häufig nur das Heben und Senken der Last durch Antriebe unterstützt. Sie lassen sich hauptsächlich durch verschiedene Arten der Steuerung unterscheiden. Eine zusätzliche Ausbaustufe für eine einfach zu bedienende Steuerung bieten verschiedene Balancer-Technologien, die einen automatischen Schwerkraftausgleich ermöglichen. Diese manuell bedienten Bewegungseinrichtungen werden ferner unter dem Begriff „Assist Devices“ zusammengefasst.

Mit zunehmendem Fokus auf Ergonomie und einfache Bedienung, sowie dem Bestreben, die sensomotorischen Fähigkeiten des Mitarbeiters gezielter auszunutzen, wurde in den letzten Jahren damit begonnen, sogenannte „Intelligent Assist Devices“ (IAD) zu erforschen. Ziel dieser Systeme ist es, die Vorteile von programmierbaren Robotern und manuell gesteuerten Manipulatoren und Hebezeugen zu kombinieren. IAD werden manuell bedient, bieten jedoch eine leichte und intuitive Bedienung und einige programmierbare Funktionen, um den Mitarbeiter beim Bewegen der Last zu führen und zu unterstützen. So werden neben dem Schwerkraftausgleich auch Beschleunigungs- und Abbremskräfte durch Antriebe unterstützt und die Bedienung erfolgt durch eine direkte Handsteuerung an einem Bediengriff oder sogar direkt an der Last. Es ist möglich, z.B. teilautomatisierte „Home-Fahrten“ durchzuführen oder virtuelle Wände einzuprogrammieren.

Die Beispiele aus Forschung und Industrie zeigen, dass die prinzipiellen Ansätze von IAD positive Auswirkungen auf Ergonomie, Werkerakzeptanz und Prozesszeiten bei Handhabungsaufgaben in der Montage haben können. Gleichzeitig gibt es bislang jedoch nur wenige marktreife Produkte, deren handhabbare Lasten zudem nur auf wenige hundert Kilogramm begrenzt sind. Beim Großteil der beispielhaft aufgezeigten IAD handelt es sich um spezielle Demonstratoren für ausgewählte Anwendungen. Die Übertragbarkeit, Skalierbarkeit und Modularisierbarkeit als Mittel des wirtschaftlichen Aufbaus und Einsatzes von IAD war in vielen Fällen nicht Kern der Forschung und Entwicklung.

3 Analyse und Anforderungen

Analysis and requirements

Im nachfolgende Kapitel werden die Analyse des Betrachtungsbereichs der Montage sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen für ein Handhabungskonzept beschrieben. Untersucht wurden im Wesentlichen die bestehenden Handhabungsgeräte und die damit verbundenen Handhabungsprozesse in der Endmontage von Nutzfahrzeugen. Die Handhabung schwerer Lasten in der Montage von Lkw-Produktionsumgebungen ist dabei das primäre und exemplarische Untersuchungsgebiet. Die Anforderungen und Ergebnisse lassen sich jedoch auf andere Nutzfahrzeugbereiche, Werke, Wettbewerber sowie weitere Produkte und ähnliche Themenstellungen übertragen.

Verschiedene Analysen und Bildaufnahmen entstanden im Rahmen der Tätigkeit des Autors bei der Daimler Truck AG in der Montage des Mercedes-Benz Werks in Wörth und dienen der beispielhaften Darstellung des Themengebiets.

3.1 Analysebereich Lkw-Montage

Analysis area Truck assembly

Stellvertretend für die Handhabung schwerer Lasten in der Montage soll im Rahmen dieser Arbeit die Nutzfahrzeugindustrie und aus dieser besonders das Lkw-Segment im Fokus stehen. Dieses Geschäft ist geprägt durch einen globalisierten Wettbewerb mit heterogenen Konkurrenzunternehmen, einer starken produktorientierten Regionalisierung und einer enormen Variantenvielfalt [SCHU08, S. 82–83]. Produkte, Prozesse und Betriebsmittel in der Lkw-Produktion sind dabei an unterschiedlichen Standorten, bei verschiedenen Marken und Herstellern wettbewerbsübergreifend vergleichbar. Weiterhin ist auch eine Vergleichbarkeit mit branchenverwandten Bereichen wie der Produktion und Montage von Landmaschinen oder Baumaschinen gegeben.

Eine gesamtheitlich betrachtete Lkw-Produktion setzt sich aus vier Gewerken bzw. Hauptprozessen zusammen. Die Abfolge ist im oberen Bereich von **Bild 3.1** dargestellt. Im **Rohbau** werden geformte Stahlblechsegmente zur Rohkarosserie eines Fahrerhauses zusammengebaut. Der gesamte Bereich ist in der heutigen Zeit stark automatisiert. Die einzelnen Blechsegmente werden hauptsächlich durch Punktschweißen gefügt. Die Handhabung der Rohbausegmente und Schweißzangen erfolgt meist durch Industrieroboter. Im Anschluss wird die Rohkarosse in die **Lackierung** gefördert. Dort durchläuft sie auf spezieller Fördertechnik zuerst eine kathodische Tauchlackierung. Im Anschluss daran wird mittels Lackierrobotern der Fahrerhausfüller und die Decklackierung aufgetragen. Danach erreicht das lackierte Fahrerhaus den Bereich **Innenausbau**. In diesem Bereich werden die Komponenten in und an der Kabine montiert. Zu den komplexeren und schwereren Komponenten

gehören bspw. die vormontierten Türen, das vormontierte Cockpit, Sitze und Innenverkleidung. Als einziger automatisierter Handhabungsprozess existiert in diesem Bereich die Montage der Windschutzscheibe. Sowohl der Klebeauftrag als auch die Handhabung und der Einklebevorgang werden mit einem Industrieroboter durchgeführt.

Parallel dazu angeordnet ist die sog. **Aufbaumontage**. Sie beginnt mit dem „Rahmenbau“. In diesem Bereich wird der Leiterraum mit Haltern und Leitungen zusammengesetzt. Im nächsten Bereich „Unterbau“, werden Komponenten an der Unterseite des Fahrzeuges, wie z.B. Achsen oder Druckluftkessel montiert. Auch in diesem Bereich liegt der Rahmen noch auf dem Rücken, sodass große und schwere Komponenten entweder seitlich oder von oben an den Rahmen montiert werden können. Nach der „Unterbaulackierung“ wird der Rahmen gewendet. Somit liegt er nun in richtiger Lage auf Fahrschemeln und wird von einem Kettenförderer stetig entlang der Montagelinie bewegt. Im Bereich „Aggregate“ wird zuerst bei der sog. Verlobung Motor und Getriebe mit einem Hallenkran mit spezieller Lastaufnahme in den Rahmen eingesetzt. Daraufhin folgt die Hochzeit, bei der das zuvor ausgebaute Fahrerhaus auf den Rahmen gesetzt und mit diesem verbunden wird. Fördertechnik und Handhabungsgerät sind bei diesem Prozess zu einem Betriebsmittel verschmolzen. Im weiteren Verlauf folgt der Bereich „Aufbau“. Hier werden weitere Komponenten wie Tank, Frontmodul und Räder montiert und das Fahrzeug in Betrieb genommen. Abschließend verlässt das Fahrzeug am Bandende das Montageband. Von da aus wird das Fahrzeug zu den Rollenprüfständen und anschließend weiter in den sog. End-of-Line Bereich (EoL) bewegt.

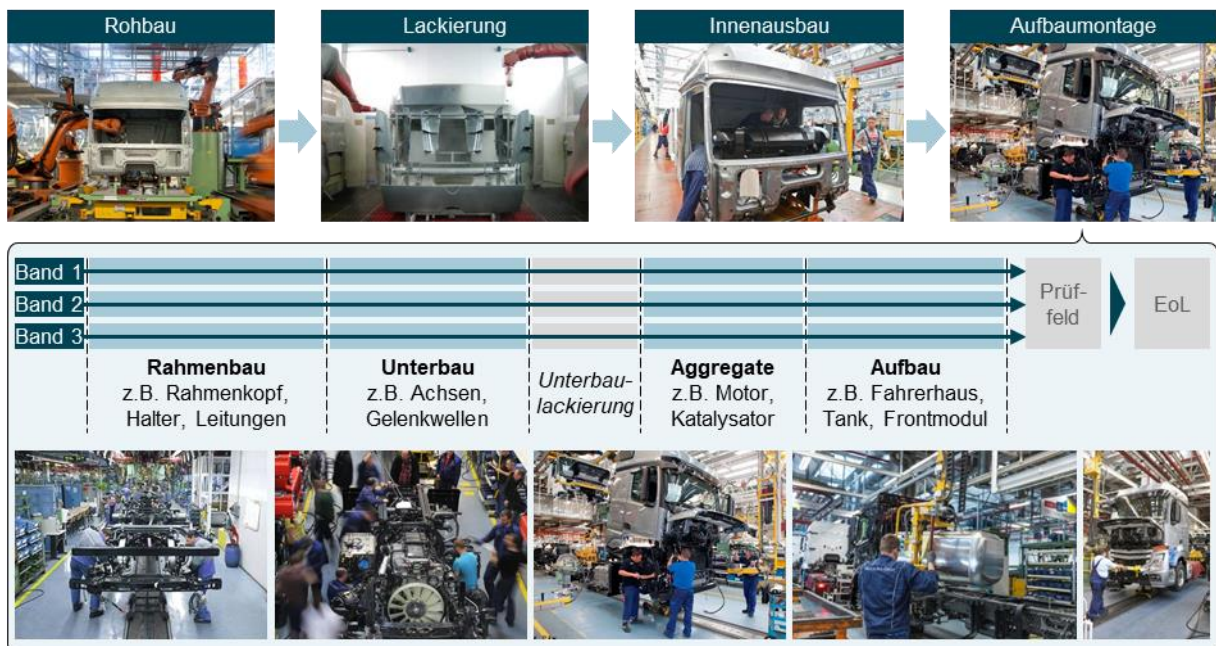


Bild 3.1: Analysebereich Lkw-Montage – Bsp. Mercedes-Benz Werk Wörth [MATH16a, S. 12/6]; Bildquellen: Daimler Truck

Analysis area Truck assembly – Ex. Mercedes-Benz plant Wörth

Zusammengefasst handelt es sich bei der beschriebenen Form der Lkw-Produktion um eine Großserienproduktion. Es werden eine große Anzahl Lkw des gleichen Modells gleichzeitig auf drei verschiedenen Montagebändern, bzw. unmittelbar nacheinander in einer kombinierten Fließmontage hergestellt. Die Bandgeschwindigkeit beträgt je nach Stückzahl und Produktspektrum 1,2 bis 1,8 m/min. Die einzelnen Lkw sind jedoch kundenindividuell zusammengestellt und werden nach dem Prinzip „Assemble to Order“ produziert. Die Mitarbeiter am Montageband sind dabei in Gruppen aufgeteilt, die bestimmten Montagestationen zugeordnet sind.

Wie bei vielen Nutzfahrzeugherstellern üblich, wird innerhalb der Gruppenarbeit zudem noch Job-Rotation als arbeitsorganisatorische Gestaltungsmaßnahme genutzt. Es ist eine wichtige organisatorische Maßnahme, um vor allem dem demographischen Wandel entgegenzutreten, damit die Mitarbeiter gesund länger als bisher arbeiten können und der Krankenstand gesenkt wird. Speziell Tätigkeiten in der Montage können durch die Arbeitsbedingungen in der Serienfertigung, die Taktgebundenheit am Band, Schichtarbeit und körperliche Anstrengungen bspw. bei der Handhabung schwerer Bauteile belastend sein. Die Job-Rotation bietet durch Beanspruchungswechsel vor allem eine Reduzierung der körperlichen Belastung und steigert gleichzeitig die Flexibilität und Lernfähigkeit der Mitarbeiter [SPOR11, S. 250–253]. Gleichzeitig ist dies auch eine Anforderung, Betriebsmittel möglichst einfach zu gestalten, damit Mitarbeiter schnell eingelernt werden können und die Bedienung durch mehrere Personen einer Gruppe erfolgen kann.

Im Bereich der Aufbaumontage wird in den meisten Lkw-Werken eine geradlinige Materialflussorientierung angewandt. Die zu montierenden Komponenten werden dabei von beiden Seiten in Form einer Fischgrätenanordnung an das Band herangeführt. Die Materialbereitstellung erfolgt somit nahe am Einbauort und immer an den gleichen gekennzeichneten Stellen.

Aufgrund der Varianz gibt es teilweise Taktzeitspreizungen innerhalb der Fließmontage. Bei manchen Lkw sind gewisse Montageprozesszeiten höher, sodass Montageprozesse teilweise noch in der nachfolgenden Station fertiggestellt werden. Die Mitarbeiter schwimmen sozusagen zwischen Stationen.

Weitere charakteristische Merkmale der Aufbaumontage sind folgende [MATH16a, S. 12/6]:

- Die Aufbaumontage ist geprägt durch eine Vielzahl manueller Montageprozesse.
- Es existieren viele große, schwere und sperrige Komponenten und Bauteile, bzw. Werkzeuge und Betriebsmittel.
- Für die Handhabung werden zum Großteil einfache, flexible, robuste und kostengünstige Geräte eingesetzt. Hauptsächlich handelt es sich dabei um elektrisch angetriebene Kettenzug-Hebezeuge.
- Für den Einsatz neuer Handhabungsgeräte muss neben den Faktoren Ergonomie, Arbeitssicherheit und Kosten auch die Akzeptanz beachtet werden.

Um einen allgemeingültigen Ansatz für die Handhabung schwerer Lasten in der Nutzfahrzeug-Montage zu gewährleisten, wurde im Rahmen dieser Arbeit auch die Produktion von Marktbegleitern und ähnlichen Nutzfahrzeugherstellern analysiert und gegenübergestellt. Dazu wurde vor allem die Möglichkeit genutzt, an öffentlichen Werksführungen teilzunehmen. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Lkw-Montage von „Hersteller A“ und die Traktoren-Montage von „Hersteller B“ vergleichend eingeordnet. Bei beiden Herstellern sind die Gewerke vergleichbar aufgeteilt. Bei der angewandten Produktionsart handelt es sich auch um Großserienmontage. Daneben ist sowohl die Produktstruktur als auch der Montagevorranggraph begonnen mit einem Rahmenbau und mit separater Montagelinie für die Fahrerhauskabine sehr ähnlich.

Die Aufbau- bzw. Chassis-Montage ist jedoch bei beiden Vergleichsherstellern aufgrund einer geringeren jährlichen Ausbringungszahl jeweils nur auf einer Montagelinie dargestellt. Bei „Hersteller A“ wird auch ein anderes Ablaufprinzip für die Montage angewendet. Im Vergleich findet dort eine Taktstraßenmontage statt. Als Fördertechnik für das Chassis werden fahrerlose Transportsysteme verwendet. Aufgrund des stehenden Montageobjekts in der Station besteht keine Notwendigkeit, die Handhabungseinrichtungen mit einer kontinuierlichen Fließgeschwindigkeit zu synchronisieren. Die notwendige abzudeckende Arbeitsfläche der Handhabungsgeräte ist dementsprechend kleiner. Das hat zur Folge, dass vermehrt stationäre Handhabungsgeräte mit Schwenk- oder Gelenkarmkinematik eingesetzt werden, die einen kleineren meist kreisförmigen Arbeitsraum besitzen. Im Vergleich werden daher bspw. Parallelogramm-Balancer-Manipulatoren oder Gelenkarm-Seilbalancer in der Aufbaumontage eingesetzt.

Bei „Hersteller B“ ist die Aufbaumontage als kombinierte Fließmontage organisiert. Allerdings wird dort das Chassis zum Teil quer gefördert, wie es auch in manchen Lkw-Montagewerken üblich ist. In dieser Anordnung ist die Montagelinie deutlich breiter als bei einer Längsförderung des Chassis. Die Montagemitarbeiter bewegen sich für Montagetätigkeiten permanent zwischen dem Rand der Montagelinie und dem Raum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Chassis. In diesem Fall sind die Handhabungsgeräte fast ausschließlich an Deckenschienen aufgehängt. In den meisten Fällen werden einfache Hebezeuge in Form von Kettenzügen verwendet.

Zusammenfassend sind Produkte, Prozesse und Betriebsmittel in der Nutzfahrzeugproduktion sehr ähnlich. Weitere Vergleiche bieten sich mit der Produktion von Bussen, Reisemobilen und Baustellenfahrzeugen an.

Aufgrund der Vergleichbarkeit mit anderen Bereichen der Nutzfahrzeugproduktion wird im weiteren Verlauf der Arbeit speziell der Bereich der Aufbau- bzw. Endmontage als exemplarisches Untersuchungs- und Anwendungsgebiet für die Handhabung schwerer Lasten angewendet.

Weitere Beispiele für die Großbauteilmontage sind im Waggonbau, im Schiffsbau, in der Flugzeugbauindustrie oder in der Montage von Windkraftanlagen zu finden. Geringere Stückzahlen, höhere Taktzeiten und noch größere Variantenvielfalt

verstärken in den meisten Fällen jedoch die Zweckmäßigkeit manueller Tätigkeiten und den Einsatz von einfachen aber flexiblen Hebezeugen.

3.2 Handhabungsgeräte in der Lkw-Montage

Handling devices in general assembly of trucks

Das nachfolgende Kapitel gibt eine Übersicht der typischen Handhabungsgeräte, die in der Nutzfahrzeug-Montage eingesetzt werden. Als Beispiel wurde das Mercedes-Benz Werk Wörth genutzt. Recherchen bei anderen Lkw- und Nutzfahrzeugherstellern haben jedoch ergeben, dass die Handhabungsgerätetypen sehr ähnlich und vergleichbar sind (vgl. Kap. 3.1). Zuerst werden die Geräte im Bereich Innenausbau aufgezeigt. Danach folgen die Handhabungseinrichtungen aus der Aufbaumontage, die im Rahmen dieser Arbeit als exemplarisches Anwendungsgebiet dient. Weiterhin werden auch in diversen Vormontagebereichen Bewegungseinrichtungen eingesetzt. Aufgrund der starken Ähnlichkeit werden die Geräte aus diesen Bereichen jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht gesondert betrachtet.

3.2.1 Handhabungsgeräte im Fahrerhausinnenausbau

Handling devices in Cab Trim Line

Obwohl im weiteren Verlauf der Arbeit der Bereich der Aufbaumontage im Fokus steht, wird an dieser Stelle dennoch auf die verwendeten Handhabungsgeräte im Bereich Innenausbau eingegangen. Der Grund dafür ist die enge Verknüpfung beider Bereiche und der ähnlich hohe Anteil an manuellen Handhabungs- und Montageprozessen. Der Innenausbau gliedert sich in zwei verschiedene Fördertechnikbereiche. Zu Beginn gibt es eine sog. Hochstrecke, in der die Kabine hängend gefördert wird. In diesem Bereich können Montagetätigkeiten an der Unterseite des Fahrerhauses durchgeführt werden. Im darauffolgenden restlichen Bereich steht das Fahrerhaus dann auf einer Plattform und es werden die übrigen Montagearbeiten an der Außenseite und im Innenraum durchgeführt. Für schwere und sperrige Komponenten werden spezielle Handhabungsgeräte eingesetzt. Einige Beispiele sind in **Bild 3.2** abgebildet.

Einige schwere und/oder sperrige Komponenten oder Module müssen für die Montage durch die Tür- oder Windschutzscheibenöffnung in das Fahrerhaus eingeschwenkt werden. Hierfür werden pneumatisch angetriebene Parallelogramm- oder Hubachs-Manipulatoren eingesetzt. Zu den Prozessen gehören z.B. das Zuführen und der Einbau der Ablage über der Windschutzscheibe, der Cockpiteinbau, der Einbau des Mittenmoduls oder die Sitzmontage. Die Ausführung der Kinematik der Manipulatoren erlaubt die notwendige außermittige Lastaufnahme, die ein Einfädeln in das Fahrerhaus ermöglicht. Die Balancersteuerung ermöglicht ein feinfühliges Bewegen der Last, um Kollisionen beim Einfädeln zu vermeiden. Alle Manipulatoren sind an Deckenschienen aufgehängt, um den Arbeitsraum zu vergrößern. Zudem gibt es teilweise Funktionen, um den Manipulator mit der Bandgeschwindigkeit zu synchronisieren.



Bild 3.2: Handhabungsgeräte im Bereich Fahrerhausinnenausbau, Bsp. Mercedes-Benz Werk Wörth; Bildquellen: Daimler Truck

Handling devices in Cab trim Line, ex. Mercedes-Benz Plant Wörth

In diesem Fall wird der gesamte Manipulator durch einen Antrieb in der Deckenschiene entlang des Bands mit Bandgeschwindigkeit bewegt, sodass sich der Mitarbeiter auf die Feinpositionierung konzentrieren kann.

Für die Demontage der Türen wird hingegen nur ein Gelenkarm mit Seilbalancer genutzt. In diesem Fall ist keine außermittige Lastaufnahme notwendig und der Arbeitsraum eines Gelenkarms ausreichend.

3.2.2 Handhabungsgeräte in der Aufbaumontage

Handling devices in Assembly Line

Im Bereich der Aufbaumontage gibt es bislang keinerlei automatisierte Handhabungsgeräte. Teilweise automatisiert sind lediglich bestimmte Elemente der Fördertechnik. Darunter fallen die Bandkette und zuführende Fördertechnik für Achsen und Fahrerhaus. Weiterhin können spezielle Krananlagen zum Übersetzen des Rahmens von einem Bandabschnitt auf den nächsten oder die Rahmenwendeanlage, die den Rahmen 180° um seine Längsachse dreht und ihn auf neue Fahrschemel aufsetzt, dazugezählt werden. Dabei erfolgt lediglich die Längsförderung automatisiert. Das Aufnehmen und Anheben sowie das Wenden und Absetzen wird manuell über eine Tastersteuerung bedient.

Ein Spezialfall ist hierbei der Deckenkran zum Einbau des Motor-Getriebe-Pakets. Es ist die schwerste, einzeln gehandhabte Last in der Aufbaumontage. Einige vorangegangene Projekte im Rahmen des Technologiemanagements untersuchten die Automatisierung dieses Prozesses. Im Rahmen der Projekte entstanden verschiedene Konzepte, die den automatisierten Einbau des gesamten vormontierten

Powerpacks bestehend aus Motor, Getriebe und Kühler ermöglichen. Die entwickelten Konzepte sind in **Bild 3.3** dargestellt.

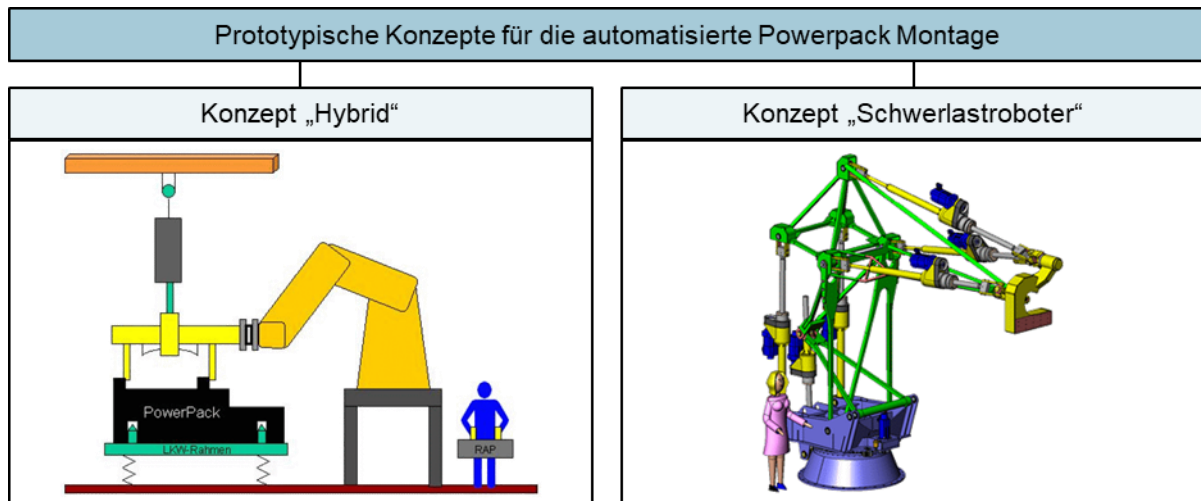


Bild 3.3: Konzepte automatisierte Powerpack Montage [WIRT08]; Bildquellen: Daimler Truck

Concepts automated Powerpack assembly

Beim ersten Konzept „Hybrid“ trägt der bestehende Hallenkran nach wie vor die Last. Ein zusätzlicher Industrieroboter manövriert die hängende Last am Lastaufnahmemittel und fädelt den Powerpack in den Rahmen ein. Eine elementare Komponente dieses Konzepts ist ein vertikal angeordneter Mechanismus zwischen Kran und Lastaufnahmemittel, der kleine Bewegungen ausgleichen kann. Die Bewegung des Roboters folgt einer festgelegten und vorprogrammierten Bahn, die Steuerung erfolgt jedoch per Zweihandbedienung von einem Mitarbeiter.

Das zweite Konzept basiert auf einem von der Abteilung für Verfahrensentwicklung der Daimler AG entwickelten Schwerlastroboter für speziell diesen Montageprozess. Da die Leistungsgrenzen herkömmlicher Roboterkinematiken erreicht sind, wurde ein Großroboter basierend auf einer stabkinematischen Grundkonstruktion entwickelt. Der Schwerlastroboter hat somit vergleichsweise geringe Eigenmassen und kann die gesamte Last ohne Unterstützung eines Krans bewegen (vgl. [WIRT08]; [WANN13, S. 65]).

Beide Konzepte kamen jedoch nicht über das prototypische Versuchsstadium hinaus. Für eine Implementierung hätte in beiden Fällen die bestehende Station aus dem Fließprozess in eine abgesicherte und umzäunte Taktstation umgewandelt werden müssen. Das hätte sowohl aus Prozesssicht aber auch aus gebäudetechnischer Sicht zu großen Herausforderungen in einem Brown-Field Szenario geführt. Hauptgrund war jedoch die nicht erzielbare Wirtschaftlichkeit. Aufgrund mehrerer Faktoren scheiterte eine positive Wirtschaftlichkeitsrechnung. Ein wichtiger Grund ist, dass die Mitarbeiter im bestehenden Prozess neben der Handhabung des Motors noch viele weitere Tätigkeiten durchführen, die nicht automatisiert werden konnten. Daher war die eingesparte Prozesszeit durch die Automatisierung in Relation zur Gesamtprozesszeit

relativ gering und nicht ausreichend. Des Weiteren zeigt sich, dass oftmals versucht wird ein System speziell für einen Anwendungsfall zu konzipieren und zu optimieren. Entwicklungs- und Aufbaukosten lassen sich dadurch kaum auf weitere Anwendungen übertragen. Gleiches gilt für die Instandhaltung.

Der Prozess des Motoreinbaus sowie die mit Fördertechnik verbundenen Handhabungsprozesse in der Aufbaumontage werden daher von der Untersuchung und der Konzepterstellung ausgeschlossen. Der Fokus besteht auf Handhabungsvorgängen zur Montage von bereitgestellten Komponenten am Band.

Die übrigen Handhabungsgeräte, die zur Unterstützung der Montageaufgaben genutzt werden sind manuell gesteuerte Bewegungseinrichtungen. Hauptsächlich werden elektrisch angetriebene Hebezeuge oder pneumatische Manipulatoren eingesetzt.

Pneumatische Kraftmanipulatoren werden bspw. für die Tankmontage, Stoßfängermontage und die Rädermontage eingesetzt. Beispiele aus der Aufbaumontage des Werks Wörth sind in **Bild 3.4** dargestellt. Es handelt sich um pneumatische Hubachsen, die an einem Deckenschienensystem aufgehängt sind. Verstärkt werden hierbei Leichtlaufschienen eingesetzt, um die manuell aufzubringenden Kräfte für die horizontalen Bewegungen zu minimieren. Angetrieben ist jedoch lediglich die vertikale Hubbewegung. Hierbei wird von den oben beschriebenen Balancersteuerungen der Typ C verwendet (siehe Kap. 2.4, S. 26). Zur Steuerung der Hub- und Senkbewegung sind Drehgriffe angebracht.

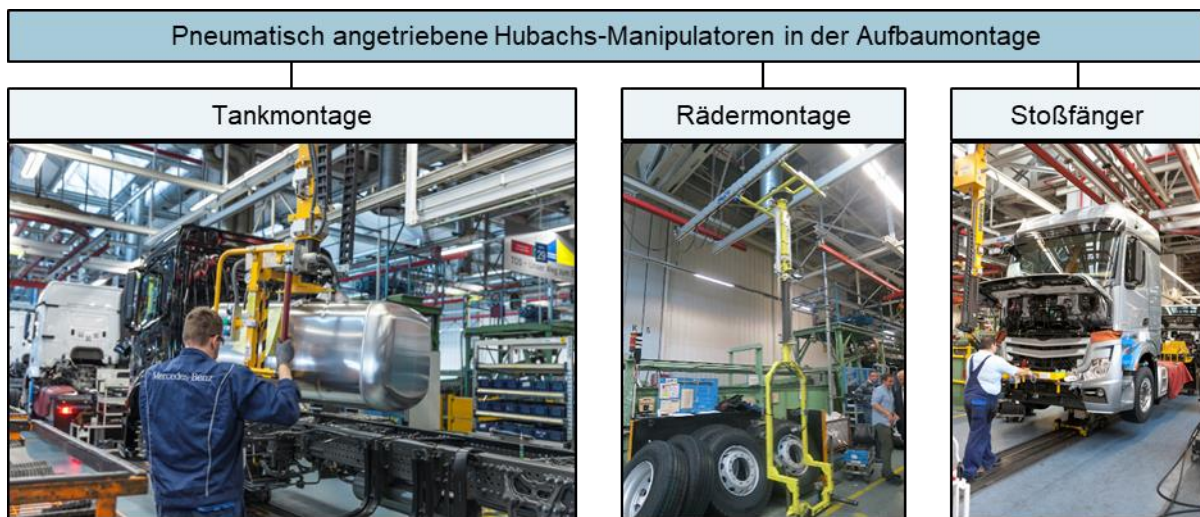


Bild 3.4: Pneumatische Manipulatoren in der Aufbaumontage, Bsp. Mercedes-Benz Werk Wörth; Bildquellen: Daimler Truck

Pneumatic manipulators in assembly line, ex. Mercedes-Benz Plant Wörth

Weitere Handhabungsgeräte für schwere Lasten basieren auf elektrischen Kettenzügen als Hebezeug. Diese sind in den meisten Fällen an Deckenschienen und teilweise an Schwenk- oder Knickarm-Auslegern angebracht. Einige exemplarische Beispiele sind in **Bild 3.5** dargestellt. Die kompakte Bauweise ermöglichen verschiedene Aufhängungsvarianten. Von Schwenk- oder Gelenkarmauslegern,

einfachen Deckenschienen bis hin zu Deckenfahrwerken mit Teleskopauszug gibt es je nach Umgebungsbedingungen viele unterschiedliche Beispiele zur Aufhängung eines Kettenzugs, die zugleich Ergonomie und Arbeitsfläche beeinflussen können. Die Hub- und Senkbewegung wird mittels Tastersteuerung an einer Steuerbirne geregelt. In den meisten Fällen gibt es zwei Geschwindigkeiten, die durch zweistufig ausgeführte Bedienknöpfe gewählt werden können.

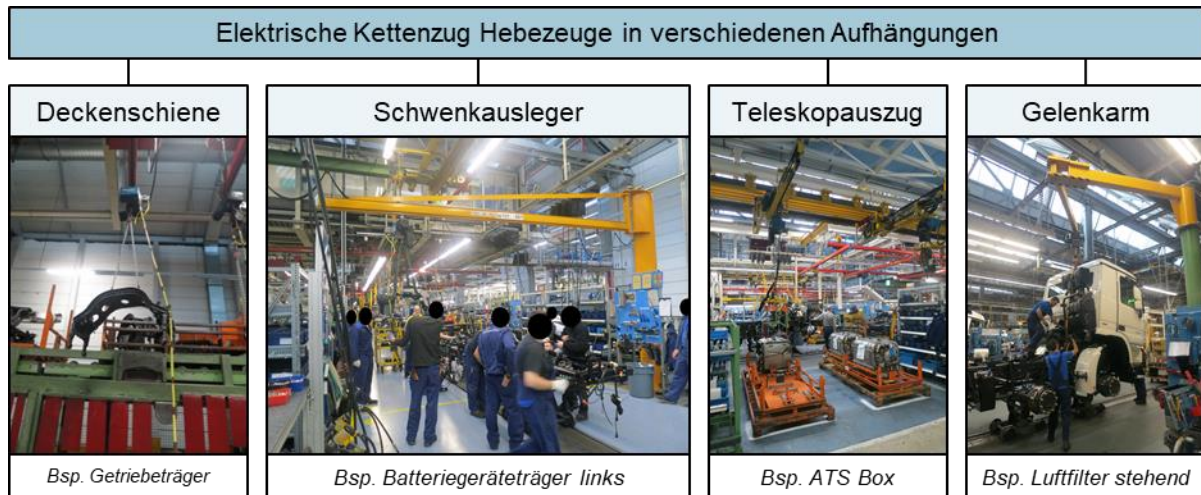


Bild 3.5: Elektrische Kettenzug Hebezeuge in der Aufbaumontage, Bsp. Mercedes-Benz Werk Wörth; Bildquellen: Daimler Truck

Electric Chain Hoist lifting devices in assembly line, ex. Mercedes-Benz Plant Wörth

Neben den beschriebenen Manipulatoren und Hebezeugen gibt es noch einige wenige bodengeführte Handhabungsgeräte. Es handelt sich dabei jedoch um Hub- oder Transportwagen, die somit nur eingeschränkte Freiheitsgrade besitzen und per Definition nicht zu den Bewegungsgeräten gehören. Des Weiteren werden Werkzeuge wie bspw. EC-Schrauber an Federzügen über dem Band aufgehängt. Diese kostengünstige und einfache mechanische Seilbalancerlösung kann aufgrund der gleichbleibenden Last eingesetzt werden.

3.3 Analyse der kinematischen Struktur von Handhabungsgeräten

Analysis of kinematic structure of handling devices

Der kinematische Aufbau von Handhabungsgeräten ist ausschlaggebend für deren Bewegungsmöglichkeiten und somit für die Form des Arbeitsraums. Daneben prägt die Kinematik auch stark die Anwendungsmöglichkeiten und die Bauform eines Handhabungsgerätes, was wiederum konstruktive Rückwirkungen auf die mögliche Traglast hat. Im Nachfolgenden werden daher die verschiedenen existierenden kinematischen Strukturen von Handhabungsgeräten basierend auf der Systematik von SCHOPEN [SCHO87, S. 1–125] untersucht und bewertet.

3.3.1 Kinematischer Aufbau und Regionalstrukturen

Kinematic structure and regional structures

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2.1 (siehe **Bild 2.7** f.) wird beim Handhaben eines Objektes dessen Position und Orientierung festgelegt. Das Handhabungsobjekt ist dazu mit dem Handhabungsgerät verbunden, das die Bewegungen durchführt. Grundsätzlich wird ein Handhabungsgerät als offene oder geschlossene kinematische Kette betrachtet, die aus mehreren Bewegungsachsen aufgebaut ist. Geräte mit geschlossener kinematischer Kette lassen sich bis auf besondere Fälle für einen theoretischen Vergleich in Form einer offenen kinematischen Kette darstellen [SCHO87, S. 7].

Als Bewegungsachsen werden in Handhabungsgeräten in der Praxis ausschließlich Drehgelenke (rotatorische Achsen) oder Schubgelenke (translatorische Achsen) eingesetzt. Die kombinatorische Verbindung und Aneinanderreihung der Glieder mit den Bewegungsachsen ergibt die kinematische Struktur [SCHO87, S. 11]. **Bild 3.6** zeigt zwei verschiedene Manipulator-Bauformen und den schematischen Aufbau als offene und teilweise geschlossene kinematische Kette bestehend aus Dreh- und Schubgelenken. Der Schwenkarm mit Hubachse stellt eine serielle Kinematik dar, wohingegen der Parallelogramm-Manipulator eine hybride Kinematik zeigt. Hierbei ist ein Teil der Kette als geschlossene Parallelkinematik ausgeführt.

SCHOPEN nimmt eine Aufteilung der kinematischen Struktur eines Handhabungsgeräts in zwei Teilstrukturen vor: die Regional- und die Lokalstruktur. Dieser Festlegung folgend besteht die Regionalstruktur aus Dreh- und/oder Schubgelenken und bestimmt primär die Positionierung, also die translatorischen Freiheitsgrade des Handhabungsobjektes. Die Lokalstruktur hingegen dient der Orientierung bzw. der Festlegung der rotatorischen Freiheitsgrade des zu handhabenden Körpers. Aufgrund des ausschlaggebenden Anteils der Regionalstruktur an der Bewegung des Körpers im Raum werden ihre Achsen als Hauptachsen und die der Lokalstruktur als Nebenachsen bezeichnet [SCHO87, S. 13–15].

Eine Regionalstruktur basierend auf einer offenen kinematischen Kette benötigt mindestens drei Bewegungsachsen, um alle translatorischen Freiheitsgrade des Körpers und somit dessen Positionierungsgrad zu bestimmen. Anhand der Kombinatorik aus Dreh- und Schubgelenken ergeben sich somit $2^3 = 8$ mögliche Grundstrukturen [SCHO87, S. 15–17]. Theoretisch können die Bewegungsachsen von Handhabungsgeräten beliebig zueinander angeordnet sein. In der Praxis sind sie jedoch entweder parallel zueinander oder senkrecht aufeinander angeordnet. Der sog. Kreuzungswinkel beträgt somit 0° oder 90° . Zur Untersuchung kann für diese Handhabungsgeräte eine Ausgangsstellung bestimmt werden, in der alle drei Bewegungsachsen parallel zu einem raumfesten Bezugskordinatensystem ausgerichtet sind [SCHO87, S. 13].

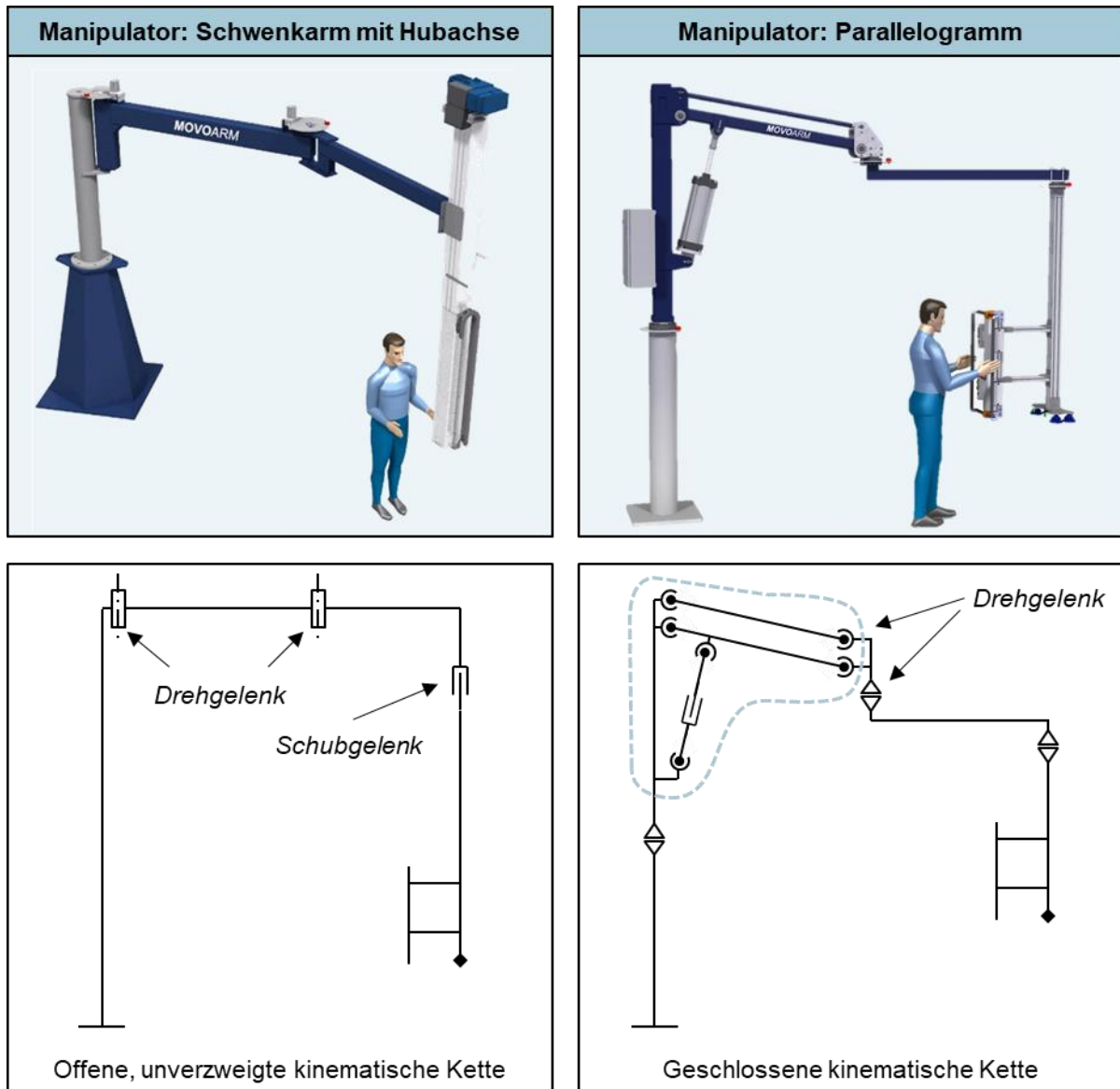


Bild 3.6: Offene und geschlossene kinematische Ketten (Eigene Darstellung; Bildquelle: [IHS19])

Open and closed kinematic chains

Darauf aufbauend existiert noch ein weiteres Merkmal, der sog. Kreuzungsabstand. Er bezeichnet die kürzeste Entfernung zwischen zwei Gliedern. Unterschieden wird ein Kreuzungsabstand „gleich null“ (0), bei dem sich die Achsen schneiden oder „endlich“ (1), bei dem sich die Achsen nicht schneiden [SCHO87, S. 26–27]. Auf Basis dieser Annahmen werden als Bezeichnungsform für eine dreiaxige Regionalstruktur die Kennbuchstaben der Bewegungsachsen gefolgt von den Kennziffern der Kreuzungsabstände der Gelenkachsen verwendet (siehe **Bild 3.7**).

Bezeichnungen	Symbole	Beispiele
Drehachsen	A; B; C	ACB, CBB
Schubachsen	X; Y; Z	ZYX
Kreuzungsabstände	0;1	ACX 001

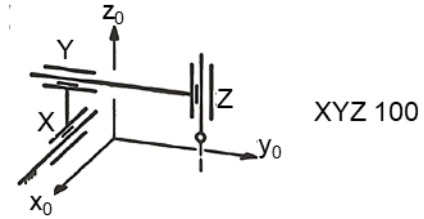


Bild 3.7: Bezeichnungsform kinematische Regionalstrukturen; vgl. [SCHO87, S. 27–29]

Denomination of kinematic regional structures

Anhand dieser Bezeichnungsform und der damit verbundenen Kombinatorik gibt es eine theoretische Maximalzahl an möglichen kinematischen Regionalstrukturen. Von den o.g. acht Grundstrukturen kann jeweils jede der drei Gelenkachsen in eine der drei Achsen des Inertialsystems ausgerichtet sein. Das entspricht $3^3 = 27$ Möglichkeiten. Insgesamt ergeben sich daraus $8 * 27 = 216$ verschiedene theoretisch mögliche Bezeichnungen. Allerdings sind nicht alle der 216 Bezeichnungen unterschiedlich. Durch Anwendung der nachfolgenden Bezeichnungsregeln, lässt sich diese Zahl reduzieren.

- Erste Achse immer in die z_0 -Achse legen.
- Zweite Achse nach Möglichkeit in die z_0 -Achse, sonst in die y_0 -Achse legen.
- Dritte Achse nach Möglichkeit in die z_0 -Achse, sonst in die y_0 -Achse, sonst in die x_0 -Achse legen.

Es bleiben somit 40 Grundstellungen bestehen. Davon können weitere vier gleichwertige kinematische Strukturen mit unterschiedlicher Bezeichnung abgezogen werden, sodass 36 übrigbleiben. Um aus den 36 dreiachsigen Regionalstrukturen die kinematisch sinnvollen herauszustellen, werden weiterhin folgende vier Aussonderungsmerkmale angewendet.

- Aussonderung von kinematischen Strukturen mit zwei oder drei zueinander parallelen Linearachsen.
- Aussonderung von kinematischen Strukturen mit drei parallelen Drehachsen.
- Aussonderung von kinematischen Strukturen mit zwei parallelen Drehachsen und einer hierzu senkrecht angeordneten Linearachse.
- Bei kinematischen Strukturen mit zwei Schubgelenken müssen diese senkrecht zueinanderstehen. Gleichzeitig muss die dritte Bewegungsachse entweder als Drehgelenk parallel zu einer der beiden Linearachsen angeordnet sein oder als Schubgelenk senkrecht zu beiden Linearachsen liegen.
- Durch Anwendung dieser Regeln werden Kombinationen mit ebenen Bewegungen bzw. redundanten Bewegungsmöglichkeiten ausgesondert. Damit verbleiben 20 dreiachsige Regionalstrukturen in ihrer Grundstellung, die als sinnvolle

Kinematiken für Handhabungsgeräte gelten [SCHO87, S. 35–40]. Die kinematischen Schemata dieser Auswahl werden im nächsten Kapitel dargestellt.

Die tabellarisch dargestellten Variationen dreiachsiger Regionalstrukturen nach SCHOPEN können im Anhang in **Tabelle 8.1** verglichen werden.

3.3.2 Analyse der Regionalstrukturen von Manipulatoren

Analysis of regional structures of manipulators

In diesem Kapitel werden die Regionalstrukturen verschiedener Handhabungsgeräte mit den oben beschriebenen sinnvollen Kinematiken verglichen. Ziel ist es, eine geeignete Regionalstruktur für ein wandlungsfähiges, skalierbares Baukastenkonzept für Handhabungsgeräte zu identifizieren.

Für den Vergleich wurden die in Kapitel 3.1 beschriebenen eingesetzten Handhabungsgeräte in der Montage sowie Handhabungsgeräte aus einer umfassenden Marktrecherche analysiert. Der Fokus lag dabei auf handgeführten Geräten mit einer Kinematik ohne biegeschlaffe Elemente für mittlere bis schwere Lasten (Hauptsächlich industrielle Handhabungs-Manipulatoren, keine Kräne oder spezielle Robotertypen). Zum Abgleich wurde von den programmierbaren Handhabungsgeräten die am häufigsten verwendete Form des klassischen 6-Achs-Knickarm-Roboter in die Analyse mit einbezogen.

Unter Anwendung der o.g. Bezeichnungsform und der zusätzlichen Regeln, wurden die Hauptachsen und die kinematische Struktur der Handhabungsgeräte analysiert. Die Regionalstruktur stellt dabei die ersten drei Gelenkgliederpaare dar, beginnend mit dem ersten Gelenk, das die Verbindung des Handhabungsgeräts mit der Umgebung darstellt. Die Nebenachsen wurden in dieser Analyse nicht näher betrachtet. In **Bild 3.8** sind im oberen Bereich die in Kapitel 3.3.1 beschriebenen, von SCHOPEN identifizierten 20 sinnvollen kinematischen Regionalstrukturen abgebildet. Im unteren Bereich finden sich die bei der Recherche gefundenen Handhabungsgerätetypen mit einer äquivalenten Regionalstruktur. Es ist erkennbar, dass nur einige der sinnvollen Regionalstrukturen auch in der Praxis in Form von am Markt verfügbaren Handhabungsgeräten zu finden sind. Die Analyse schließt jedoch wie oben beschrieben nicht alle Handhabungsgerätetypen ein und hat somit auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die identifizierten Übereinstimmungen sind in vier Gruppen gegliedert und im nachfolgenden erläutert.

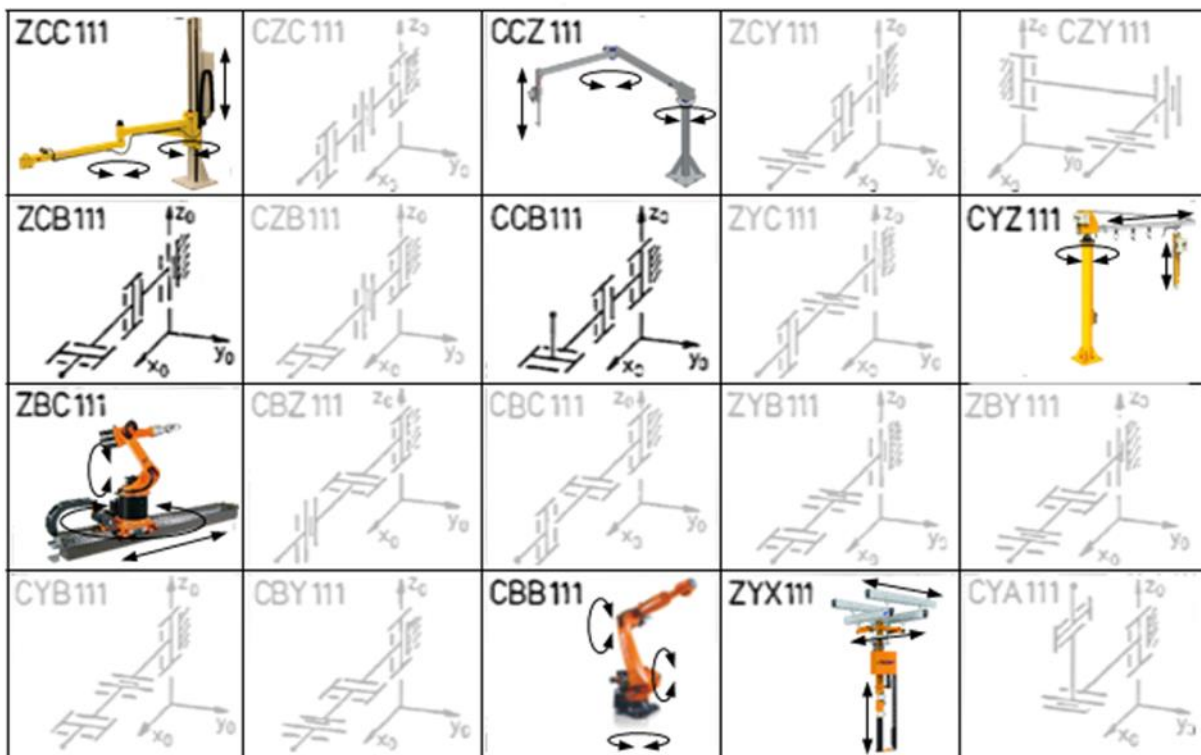
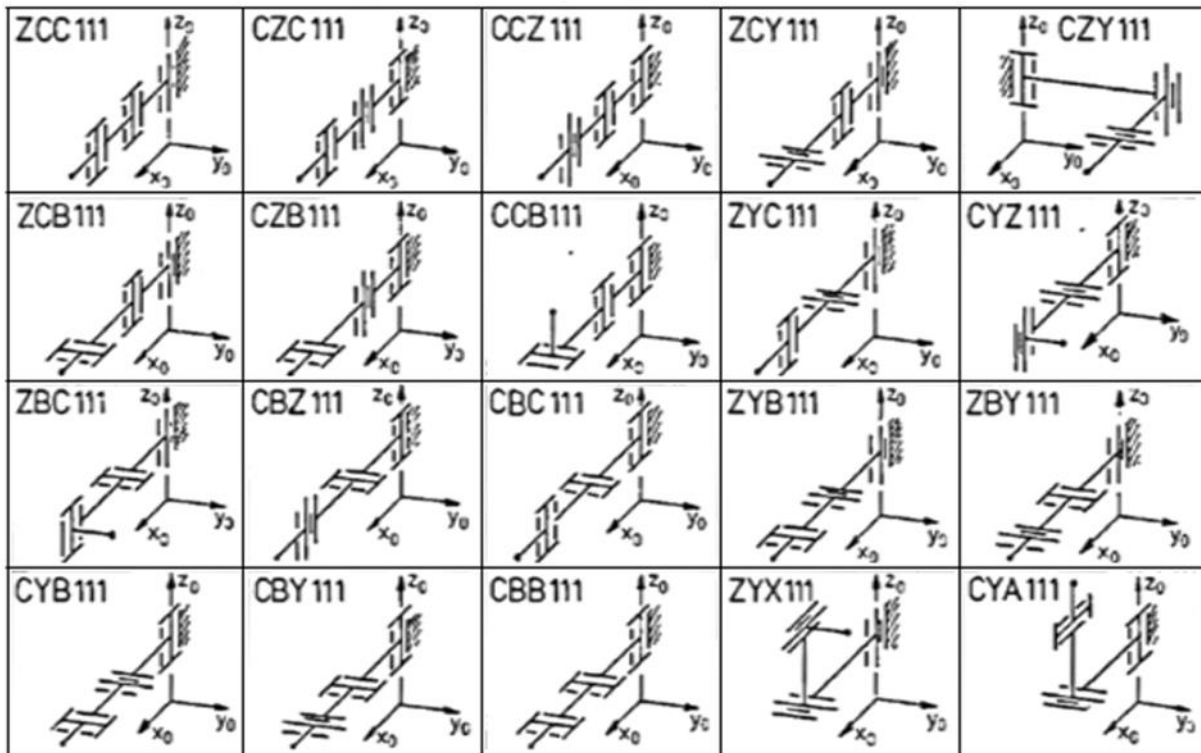


Bild 3.8: Praxisvergleich der Regionalstrukturen von Handhabungsgeräten (Eigene Darstellung, Bildquellen: [SCHO87, S. 78]; Unidex; Jäger Handling; Kuka; Strödter)

In-practice comparison of regional structures of handling devices

Gelenkarm Ausleger Manipulatoren

Unter den kinematisch sinnvollen Regionalstrukturen lassen sich einige spezielle Versionen der sog. Gelenkarm-Manipulatoren eingliedern. Es handelt sich dabei um Gelenkarmausleger mit einer Vertikalachse. Die gezeigten Beispiele sind am Markt verfügbar, jedoch eher selten in der Nutzfahrzeug-Montage anzutreffen. Die zugehörigen Bezeichnungen lauten „ZCC 111“ und „CCZ 111“. Diese Kinematiken bieten einen zylinderförmigen Arbeitsraum, der es ermöglicht auch sehr nahe an der ersten Achse zu operieren.

Speziell die „CCZ 111“ Variante ähnelt den in der Montage häufig anzutreffenden Kickarmauslegern mit Seilbalancer. Im Unterschied zum Manipulator ist dabei jedoch das dritte Gelenk nicht als Schubachse, sondern als Seil, das sich trichterförmig schwenken kann, ausgeführt. Da es sich somit um ein biegeschlaffes Element handelt, befinden sich diese Geräte nicht im Vergleich.

Schwenkarm Ausleger

In der Montage aber auch in der Marktrecherche gibt es eine Vielzahl an Schwenkarmauslegern mit Kettenzügen oder Seilbalancern. Einige wenige Spezialversionen haben anstatt des angeflanschten Hebezeugs eine Hubachse als drittes Gelenk angeordnet. Werden die Kreuzungsabstände als gering aber endlich angesehen, handelt es sich um die kinematisch sinnvolle „CYZ 111“ Kinematik. Sie besitzt einen zylinderförmigen Arbeitsraum. Im Vergleich zu den Kranauslegern mit Hebezeug können Kräfte und Momente übertragen werden. In der Praxis ist die Kombination mit Hubachse eher selten anzutreffen. Generell ist bei Schwenkauslegern meist nur die Hubachse angetrieben. Die erforderliche Kraft für die Drehung um die erste Achse ist abhängig von der Position des Katzrahmens. Gerade bei Bewegungen in der Nähe der Drehachse kann das zu ergonomischen Nachteilen führen.

Klassischer 6-Achs-Knickarm-Roboter

Aufgrund der hohen Dichte an klassischen 6-Achs-Knickarm-Robotern in automatisierten Bereichen der Montage sollen diese auch in diesem Vergleich analysiert werden. Gerade für die Handhabung schwerer Lasten existieren zwar einige wenige Modelle von Schwerlastrobotern wie bspw. die FANUC M-2000 Serie, die Lasten bis zu 2,3 t handhaben kann. Es wird an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass diese Handhabungsgeräte für eine hohe Präzision und Wiederholgenauigkeit entwickelt wurden, aber meist nur für Automatisierungsaufgaben ohne Interaktion mit dem Menschen. Zudem ist ihre Reichweite im Vergleich zu ihrer Größe begrenzt.

Ein klassischer 6-Achs-Knickarm-Roboter besitzt eine „CBB 111“ Regionalstruktur, die einen torusförmigen Arbeitsraum bewirkt. In manchen Fällen wird der Roboter auch auf einer Transferachse (sog. 7. Achse) aufgebaut, auf der er linear verfahren werden

kann. Wird die Transferachse zur Regionalstruktur hinzugezählt, so handelt es sich um die „ZBC 111“ Kinematik, deren Arbeitsraum sich zu der Torusform unterscheidet.

Kinematiken an Deckenschienen

An Montagelinien werden viele Handhabungsgeräte an Deckenschienen bzw. Deckenfahrwerken aufgehängt. Sie ermöglichen eine Bewegung des Handhabungsgerätes in der x,y-Ebene und ermöglichen somit die Abdeckung großer Bereiche an einer Montagestation oder an einem Arbeitsplatz. Wird das Deckenfahrwerk in Form zweier in 90° zueinander orientierten Schubachsen zur Regionalstruktur hinzugezählt, bleiben drei kinematisch sinnvolle Strukturen übrig: „ZYC 111“, „ZYB 111“ und „ZYG 111“. Für die ersten beiden dieser Strukturen konnten bei der Marktrecherche keine Realbeispiele gefunden werden. In der Praxis ist jedoch erkennbar, dass in den meisten Fällen (z.B. bei Parallelogramm-Manipulatoren in Überkopfaufhängung) an Deckenfahrwerken zuerst eine vertikale Drehachse angeordnet ist. Das entspricht unabhängig von den Kreuzungsabständen der Bezeichnungen „ZYA ...“, die nicht zu den kinematisch sinnvollen Strukturen gehört. Der Grund dafür ist, dass das Drehgelenk nicht parallel zu einer der Schubachsen angeordnet ist. Die Ausführung „ZYA ...“ ist in der Praxis jedoch oft sinnvoll, da mit diesem Drehgelenk die Lokalstruktur mit der Last aufgehängt werden kann und Kräfte und Momente über geeignete Lager konstruktiv gut aufgenommen werden können.

Eine häufig eingesetzte Variante stellt die Hubachse an Deckenschienen dar. Oftmals basiert diese Lösung auf existierenden Kranbaukastensystemen (KBK) und ist somit modular und skalierbar. Es handelt sich dabei um die „ZYG 111“ Regionalstruktur. Als einzige kinematisch sinnvolle Regionalstruktur bietet sie einen quaderförmigen Arbeitsraum, dessen Länge, Breite und Höhe durch die Maße der einzelnen Glieder bzw. durch die Länge der jeweiligen Schubachsen angepasst werden kann.

Da die meisten kinematisch sinnvollen Regionalstrukturen nur aus Drehachsen oder aus einer Kombination aus Dreh- und Schubachsen bestehen, erfolgt bei der Positionierung des Handhabungsobjektes mittels der Regionalstruktur auch eine Orientierungsänderung. Einzig wenn die Gliederung der Regionalstruktur und somit alle Hauptachsen als Schubachsen ausgeführt sind, existiert diese Abhängigkeit nicht. Bei den kinematisch sinnvollen Strukturen ist das ausschließlich bei der „ZYG 111“ Gliederung gegeben. In diesem Fall müssen dann alle Nebenachsen der Lokalstruktur als Drehachsen ausgeführt sein [SCHO87, S. 13–15].

Ideale Regionalstruktur für schwere Lasten in der Montage

Der Vergleich zeigt, dass die verschiedenen in der Praxis angewendeten Gliederungsstrukturen für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt werden.

Die Knickarm-Varianten werden in Form von 6-Achs-Robotern für verschiedene Handhabungsaufgaben, aber hauptsächlich für das genaue Bewegen von

Werkzeugen (z.B. Schweißzangen, Lackierpistolen) eingesetzt. Dabei sind alle Achsen angetrieben und gesteuert.

Die Gelenkarm-Manipulatoren werden oftmals für Prozesse eingesetzt, bei denen das Handhabungsobjekt von unten angehoben oder durch eine Öffnung manövriert werden muss, wie z.B. beim Innenausbau eines Fahrerhauses. Meist ist nur die vertikale Hubachse angetrieben. Sie sind kompakt, können an einer Säule, an der Wand oder auf einer Säulenplattform aufgestellt werden und bieten gute ergonomische Eigenschaften für das Bewegen in horizontaler Richtung.

Die Hubachse an Deckenschienen bietet in der Praxis den variabelsten und größten Arbeitsraum. Für Aufgaben, bei denen das Handhabungsobjekt von oben zugänglich ist, bietet diese Struktur eine ideale Regionalstruktur. Ein weiteres positives Merkmal ist die Verfügbarkeit der Strukturen in Form von skalierbaren, baukastenartig aufgebauten KBK-Systemen, die auch für Lasten bis mehrere Tonnen ausgelegt sind.

Im Zuge dieser Arbeit wird daher für die weitere Vorgehensweise eine kinematische Struktur in Form einer Hubachse an Deckenschienen gewählt.

3.4 Prozessanalyse und Ableitungen von Anforderungen

Process analysis and of requirements

Zur Klärung der Aufgabenstellung wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Prozessanalyse in der Montage durchgeführt. Ziel war es, Handhabungsprozesse mit schweren Lasten zu identifizieren, ähnliche Handhabungs- und Montageprozesse zu clustern und daraus Handlungsfelder und Anforderungen für ein Konzept abzuleiten. Weiterhin wurde noch ein beispielhafter Montageprozess ausgewählt, der möglichst viele Anforderungen vereint und als exemplarischer Prozess für die Umsetzung eines Demonstrators dient.

3.4.1 Prozessanalyse

Process analysis

Die Prozessanalyse untersucht Handhabungsprozesse von schweren Lasten in der Montage. Das Hauptaugenmerk liegt auf Prozessen, die die Handhabung von großen und schweren Lasten beinhalten. Zur Definition dieser Größe können die EU-Richtlinien und die darauf aufbauenden landesspezifischen Verordnungen zum Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz angewendet werden. Die Lastenhandhabungsverordnung (LastenhandhabV) setzt dabei die EU-Richtlinie 90/269/EWG bezüglich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der manuellen Handhabung von Lasten um. Arbeitgeber sind daher verpflichtet, die manuelle Handhabung von Lasten durch organisatorische Maßnahmen oder geeignete Arbeitsmittel und mechanische Ausrüstungen zu vermeiden. Falls die Vermeidung nicht möglich ist, muss der Arbeitgeber eine Gefährdungsbeurteilung

durchführen und die Risiken durch geeignete Maßnahmen minimieren [BMAS96, S. 1]; [EURO90, S. 10].

Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) bietet für physische Belastungen am Arbeitsplatz diverse Formblätter basierend auf der Leitmerkmalmethode (LMM) an. Für die Handhabung von schweren Lasten wird die Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen (LMM-HHT) empfohlen [STEI20, S. 7]. Mit dieser Methode werden die Belastungsmerkmale Lastgewicht, Körperhaltung, Zeitdauer/Häufigkeit und Ausführungsbedingungen erfasst. Darauf aufbauend wird die Wahrscheinlichkeit möglicher gesundheitlicher Gefahren bewertet. Daraus kann der Anwender den notwendigen Handlungsbedarf ableiten [BAUA19, S. 1–4].

Zur Vereinfachung und um konkrete Zahlen zu nutzen, kann die in **Bild 3.9** abgebildete sogenannte „Hettinger-Tabelle“ zur Orientierung herangezogen werden.

	Lebensalter	Frau	Mann
Empfohlene Grenzhublast bei gelegentlichem Heben und Tragen	15 bis 18 Jahre	15 kg	35 kg
	19 bis 45 Jahre	15 kg	55 kg
	über 45 Jahre	15 kg	45 kg
Empfohlene Grenzhublast bei häufigem Heben und Tragen	15 bis 18 Jahre	10 kg	20 kg
	19 bis 45 Jahre	10 kg	30 kg
	über 45 Jahre	10 kg	25 kg

Bild 3.9: Hettinger-Tabelle (Eigene Darstellung nach [HETT81, S. 39])

Hettinger-Table

In der Praxis stellen Arbeitgeber je nach Häufigkeit des Handhabungsprozesses ab einer Last von 10 oder 15 kg technische Hilfsmittel wie Hebezeuge zur Verfügung.

Speziell bei der Handhabung größerer Gewichte wird in der Großserienproduktion im industriellen Umfeld eine Gefährdungsbeurteilung durch einen geschulten Ergonomiebeauftragten basierend auf der Leitmerkmalmethode durchgeführt. Das Ergebnis dient den technischen Planern als Empfehlung, um der Produktion ein geeignetes Handhabungsgerät zur Verfügung zu stellen.

Auf Grundlage der o.g. Gegebenheiten wurden in der Prozessanalyse alle Handhabungsprozesse mit Objekten >15kg betrachtet. Es wird an dieser Stelle vermerkt, dass sich die gesundheitlichen Gefahren bei der Handhabung von Lasten bis 55 kg durch den Einsatz einfacher Hebezeuge relativ einfach und kostengünstig minimieren lassen. Bei größeren Lasten, die mit verschiedenen Handhabungsgeräten gehandhabt werden, können basierend auf der Leitmerkmalmethode wiederum weitere Risiken aufgrund auftretender Körperkräfte beim Ziehen und Schieben sowie aufgrund der Körperhaltung entstehen. In diesen Fällen müssen weitere Varianten der Leitmerkmalmethode wie bspw. für manuelles Ziehen und Schieben von Lasten (LMM-ZS) oder zur Ausübung von Ganzkörperkräften (LMM-GK) herangezogen werden. Handhabungsprozesse dieser Kategorie sind deutlich komplexer. Da sie dadurch als

ideales Beispiel für die Entwicklung eines neuartigen Handhabungskonzeptes dienen, lag der Fokus auch auf Lasten >55 kg oder Handhabungsprozessen mit multiplen körperlichen Belastungszuständen.

Im Rahmen der Prozessanalyse wurde in einem zweistufigen Analyseprozess gearbeitet, der in **Bild 3.10** dargestellt ist.

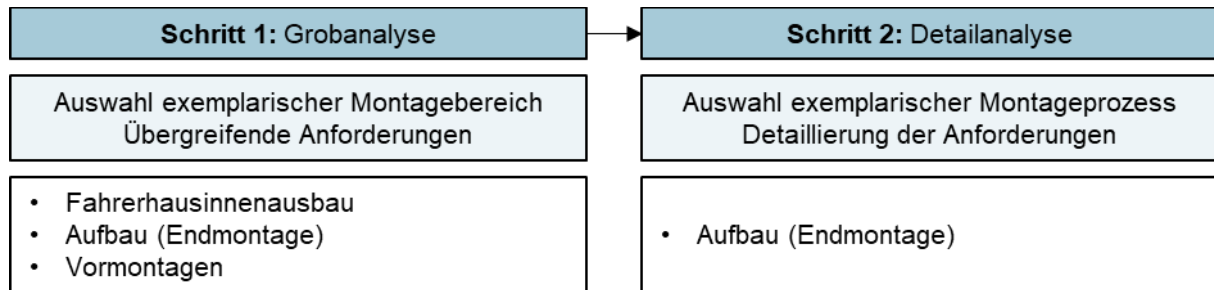


Bild 3.10: Vorgehensweise Prozessanalyse

Method process analysis

Im **ersten Schritt** wurde eine kurze Grobanalyse in den Montagebereichen Vormontage, Fahrerhausinnenausbau und Aufbaumontage durchgeführt. Experten aus Produktion und Planung selektierten vorab vorhandene Handhabungsprozesse für schwere Lasten. Zudem standen neben dem Thema Ergonomie und den Handhabungsgeräten noch diverse Umgebungsbedingungen wie Produktvarianz, Taktzeit und angewendetes Montageprinzip im Fokus. Ziel des ersten Schrittes war es, übergreifende Handlungsfelder und Anforderungen sowie einen Montagebereich für die Detailanalyse auszuwählen. Der ausgewählte Montagebereich spiegelt somit die meisten Anforderungen an ein universelles, modulares und flexibles Handhabungskonzept wider.

Aus der Grobanalyse resultierend, wurden diverse **Vormontagebereiche** von der Suche nach einem exemplarischen Montageprozess ausgeschlossen. Grund dafür sind die vergleichsweise geringeren Größen und Massen der zu handhabenden Komponenten. Zudem wird in Vormontagebereichen oftmals das Prinzip der Reihenmontage mit einem stationären Montageobjekt angewendet. Im Vergleich zur Fließmontage hätten diese Umgebungsbedingungen somit geringere Anforderungen an ein zukünftiges Handhabungskonzept zur Folge.

Der Bereich **Fahrerhausinnenausbau** wurde ebenso von der Detailanalyse ausgenommen. In der Grobanalyse wurde bereits festgestellt, dass für die Handhabung großer und schwerer Lasten in diesem Bereich in den meisten Fällen eine außermittige Lastaufnahme notwendig ist. Für die genaue und kollisionsfreie Handhabung speziell beim Einfädeln in den Kabineninnenraum werden verschiedene Manipulator Typen mit starrer Kinematik und spezialisierten Lastaufnahmemitteln eingesetzt (Vgl. Kap. 3.2.1). Zudem ist die Taktzeit ungefähr dreimal kürzer als die der Aufbaubänder. Im Vergleich führt das zu einer höheren Nutzung und Auslastung der Handhabungsgeräte. Das wiederum macht die Beschaffung und den Einsatz spezieller

Handhabungsgeräte im Bereich Fahrerhausinnenausbau aufgrund der kürzeren Abschreibungszeit deutlich wirtschaftlicher. Aufgrund der begrenzten Anzahl spezieller Handhabungsgeräte, und den einfacheren Voraussetzungen für die Wirtschaftlichkeit wurde auch dieser Bereich von der Suche nach einem exemplarischen Montageprozess ausgeschlossen.

Im Fokus der Detailanalyse stand dementsprechend der Bereich der **Aufbaumontage**.

Im **zweiten Schritt** wurde eine Detailanalyse des ausgewählten Montagebereiches durchgeführt, um die zuvor abstrahierten Anforderungen zu detaillieren und einen exemplarischen Montageprozess zu identifizieren. Hierfür wurden die Handhabungsvorgänge von 40 Montagestationen eines Aufbaubandes betrachtet. Je Station wurde eine zuvor konzipierte Checkliste ausgefüllt, um ähnliche Montageprozesse zu gruppieren. Darauf aufbauend wurde anschließend von einer geeigneten Auswahl von Montageprozessen die Bewegungen des Handhabungsobjekts analysiert. Die analysierten Montageprozesse sind in **Bild 3.11** dargestellt.

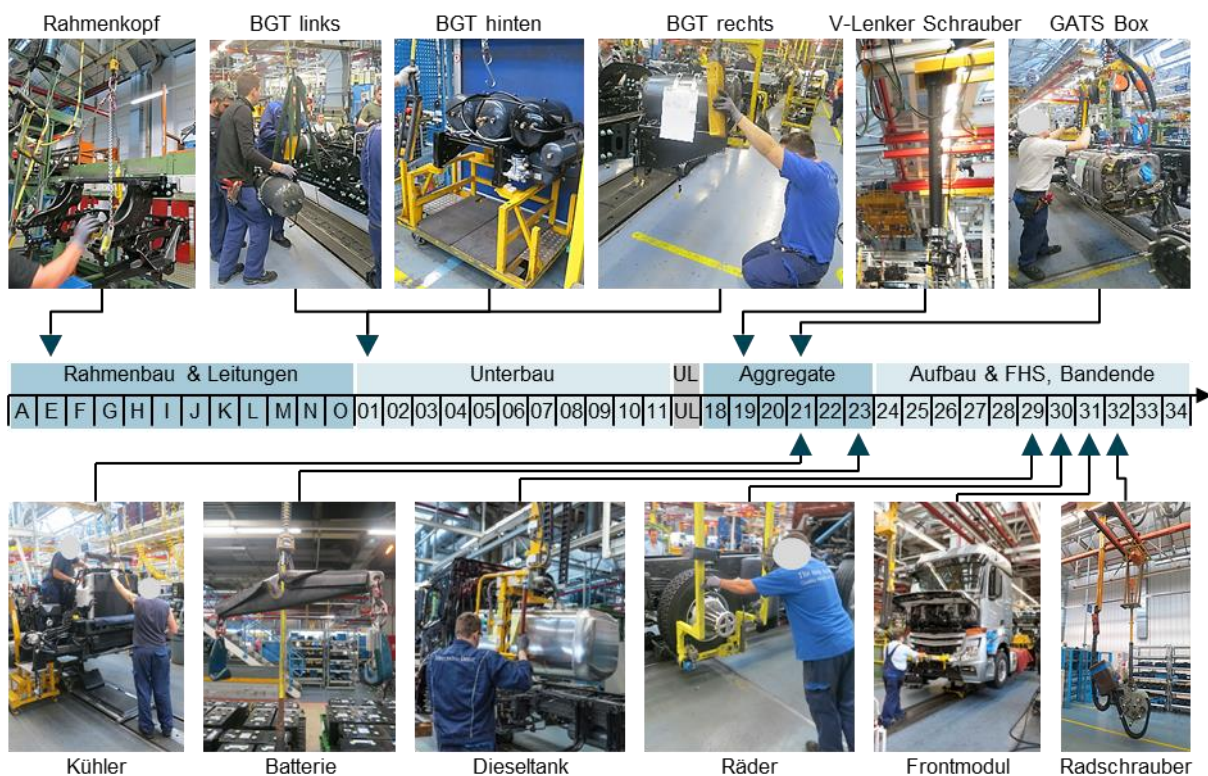


Bild 3.11: Handhabungsprozesse für Bewegungsanalyse; Bildquellen: Daimler Truck

Handling processes for movement analysis

Damit der Vergleich ein möglichst breit gefächertes Situationsbild abdeckt, wurde bei der Selektion der Montageprozesse auf folgende Prämissen geachtet:

- Verschiedene Bandbereiche im Bereich Endmontage/Aufbau: Rahmenbau, Unterbau, Aggregate, Aufbau.
- Verschiedene Handhabungsobjekte: Fahrzeugkomponenten und/oder Betriebsmittel wie bspw. Schrauber jeweils mit Drehmomentabstützung an die Peripherie oder gegenseitig durch Multispindelausführung.
- Verschiedene Handhabungsgerätetypen: Elektrische Kettenzüge, Pneumatische Hubachs-Manipulatoren, Federzug Balancer Hubachsen, spezielle Krananlagen.
- Unterschiedliche Lastaufnahmeeinrichtungen: Anschlagketten und Kettengehänge, Rundschlingen, Krangabeln, Traversen mit Anschlagketten, Scherengreifer und -klammern, Profilzangen, Vakuumsauger, Greifer und Klemmen, spezielle formschlüssige Lastaufnahmemittel, spezielle aktive Lastaufnahmemittel.

Tabelle 3.1 zeigt die existierenden Bewegungsfreiheitsgrade der untersuchten Handhabungsprozesse in der Endmontagelinie. Gegenübergestellt sind die erforderlichen Bewegungsfreiheitsgrade, um das Handhabungsobjekt von Position und Orientierung am Bereitstellungsort zu denen am Montageort zu überführen. Die Werte der translatorischen Freiheitsgrade stellen gleichzeitig die Dimension des Arbeitsraums dar.

Tabelle 3.1: Bewegungsanalyse Handhabungsobjekte in der Endmontage

Movement analysis handling objects in final assembly

Montagebereich	Station Nr.	Handhabungsobjekt	Objekttyp	Freiheitsgrade Bewegung	Rotation			Translation		
					Rx	Ry	Rz	x	y	z
Rahmenbau	RB-E	Rahmenkopf	Komp.	existent erforderlich	min. min.	min. min.	360° 90°	0 m 0 m	3 m 3 m	3 m 3 m
Unterbau	UB-01	Bremsgeräte-träger (hinten)	Komp.	existent erforderlich	min. min.	min. min.	360° 90°	10 m 1 m	5 m 3 m	3 m 2 m
Unterbau	UB-01	Bremsgeräte-träger (links)	Komp.	existent erforderlich	min. min.	min. min.	360° 0°	10 m 5 m	5 m 4 m	3 m 2 m
Unterbau	UB-01	Bremsgeräte-träger (rechts)	Komp.	existent erforderlich	min. min.	min. min.	360° 180°	10 m 5 m	2 m 2 m	3 m 2 m
Aggregate	AB-19	V-Lenker Schrauber	Bemi	existent erforderlich	min. min.	min. 5°-10°	360° 0°	6 m 3 m	3 m 3 m	2 m 1 m
Aggregate	AB-21	GATS-Box	Komp. & Bemi	existent erforderlich	0°-15° min.	0°-15° 0°-8°	360° 360°	10 m 5 m	3 m 3 m	2 m 2 m
Aggregate	AB-21	Kühler	Komp.	existent erforderlich	±20° ±20°	±20° ±20°	360° 360°	10 m 5 m	7 m 4 m	2 m 2 m
Aufbau	AB-23	Batterie	Komp.	existent erforderlich	±20° 0°-8°	±20° 0°-8°	360° 180°	10 m 5 m	5 m 3 m	2 m 1 m
Aufbau	AB-29	Dieseltank	Komp.	existent erforderlich	0°-8° 0°-8°	0°-8° 0°-8°	360° 360°	8 m 5 m	7 m 7 m	2 m 2 m
Aufbau	AB-30	Räder	Komp.	existent erforderlich	0° 0°	360° ±15°	360° 360°	6 m 6 m	5 m 4 m	2 m 1 m
Aufbau	AB-31	Frontmodul	Komp.	existent erforderlich	0° 0°	0° 0°	360° 360°	10 m 5 m	7 m 4 m	2 m 2 m
Aufbau	AB-32	Rädschrauber	Bemi	existent erforderlich	min. min.	±45° ±45°	±45° ±10°	7 m 5 m	3 m 3 m	2 m 2 m

Zusammenfassend lassen sich aus der Analyse folgende Erkenntnisse abstrahieren:

- **Unterschied zwischen existierenden und erforderlichen Freiheitsgraden:**

Die existierenden Freiheitsgrade sind meist größer als die erforderlichen. Das bedeutet einen größeren Spielraum und führt zu mehr Flexibilität. Speziell bei den rotatorischen Freiheitsgraden ist der Grund in vielen Fällen jedoch die einfache konstruktive Ausführung der Lastaufnahmeeinrichtung. So haben Kettengehänge etc. aufgrund der biegeschlaffen Elemente eine sehr hohe Bewegungsvermögen.

- **Rotationsfreiheitsgrade R_x und R_y :**

Bei Rotationen um die Längs- oder Querachse (R_x oder R_y) wird oftmals nur minimales Spiel benötigt, um kleine Toleranzen auszugleichen. Da Komponenten an oder auf dem Rahmen montiert werden, ist $R_{x\text{erforderlich}}$ oftmals mit 0° - 8° angegeben. Das beruht auf der minimalen bzw. maximalen Neigung des Rahmens auf den Fahrschemeln des Montagebands. Bei den untersuchten Handhabungsgeräten sind diese Bewegungen zwar möglich, allerdings gehen sie oft mit einem erhöhten Kraftaufwand und ergonomischen Herausforderungen einher. Als Beispiel dient hierzu die Lastaufnahme mit Kettengehängen. Hierbei ist der Schwerpunkt der Last unterhalb des Aufhängungspunktes des Gehänges oder der Traverse. Hebelwirkungen können aufgrund der biegeschlaffen Kettensegmente nicht genutzt werden. Orientierungsänderungen erfordern somit einen hohen manuellen Kraftaufwand.

- **Rotationsfreiheitsgrad R_z :**

Die Rotation des Handhabungsobjektes um die Vertikalachse ist idealerweise 360° bzw. durchgängig. Nur bei einigen Ausnahmen wie der Handhabung von Werkzeugen wie dem Radschrauber kann dieser Bewegungsfreiheitsgrad aufgrund der geringen Flexibilitätsanforderung eingeschränkter sein.

- **Translatorische Freiheitsgrade x , y , z :**

Der translatorische Arbeitsraum hat typischerweise ein quaderförmiges Aussehen. Die Länge des Arbeitsraums (x) beträgt typischerweise zwischen 5 und 10m, was ungefähr der Hälfte oder der vollen Länge einer Montagestation entspricht. Die unterschiedlichen Breiten des Arbeitsraums (y) lassen auf die punktuelle oder flächenförmige Bereitstellung des Handhabungsobjekts zurückschließen. In den meisten Fällen wird ein Handhabungsgerät nur von einer Seite aus bis zur Mitte des Montagebands ausgeführt. Häufig ist eine teleskopierbare Kinematik erforderlich, um nur bei Bedarf im Arbeitsraum an oder über dem Lkw-Rahmen zu operieren. Ansonsten muss weiterer Fördertechnik (z.B. Deckenkrane) Vorrang gewährt werden.

Aus den oben genannten analysierten Montageprozessen wurde einer als beispielhafter Montageprozess ausgewählt. Der Prozess und seine Randbedingungen sind in Kapitel 3.4.2 detailliert beschrieben. Seine spezifischen Anforderungen, Daten

und Rahmenbedingungen dienen im weiteren Verlauf der Arbeit beispielhaft als Grundlage für den Aufbau eines Demonstrators und zur Durchführung von Vergleichen.

3.4.2 Exemplarischer Montageprozess ATS-Box

Exemplaric assembly process ATS-Box

Basierend auf der Analyse der Montageprozesse im Bereich Aufbau wurde der Montageprozess der ATS-Box als exemplarischer Montageprozess zur Validierung des Konzepts identifiziert und ausgewählt. Die sogenannte ATS-Box ist die Abgasnachbehandlungseinheit für Lkw-Motoren, die die Abgasstufe Euro VI bzw. äquivalente Abgasnormen in anderen Ländern und Märkten erfüllen. ATS steht dabei für „After Treatment System“.

Der ATS-Box Montageprozess spiegelt eine Vielzahl unterschiedlicher Rahmenbedingungen und Anforderungen wider und eignet sich daher ideal für den Aufbau eines Demonstrators und zur Validierung eines neuen Konzepts. ATS-Boxen sind zudem auch bei Wettbewerbern in ähnlicher Ausführung Stand der Technik und vor allem hinsichtlich der Handhabung und Montage vergleichbar.

Auswahlgründe

Die Auswahl des ATS-Box Montageprozesses ist durch nachfolgende Punkte begründet:

- Der Handhabungsprozess beinhaltet die Handhabung einer Komponente und eines Werkzeugs. Das bisherige Handhabungsgerät bewegt neben der ATS-Box auch das für den Montageprozess benötigte Schraubwerkzeug (Doppelspindel EC-Schrauber).
- Die ATS-Box ist eine schwere und voluminöse Last. Die Masse der ATS-Box beträgt ca. 200 kg. Darüber hinaus muss zeitgleich noch ein Schraubwerkzeug gehandhabt werden.
- Die ATS-Box als Komponente in verschiedenen Subvarianten ist in fast jedem Fahrzeug verbaut.
- Der Montageprozess erfolgt in der Fließmontage. Die ATS-Box muss am mit konstanter Geschwindigkeit geförderten Rahmen montiert werden.
- Das bislang eingesetzte Handhabungsgerät ist eine Spezialkonstruktion/-anfertigung. Ein geeignetes Handhabungsgerät für diesen Anwendungsfall war bei der Beschaffung nicht am Markt verfügbar.
- Das Lastaufnahmemittel ist typisch für die Lkw-Produktion (robuste Traverse mit Kettengehänge, Aufnahmehaken). Damit wird die notwendige Flexibilität bei der Lastaufnahme ermöglicht. Zudem ist es sehr günstig.

- Die Last muss vom Bereitstellungsbereich in den Montagebereich bewegt werden. Über dem Montagebereich existiert zusätzliche Fördertechnik, die bei Bedarf Vorrang hat. Daraus folgend darf das Handhabungsgerät mit der Last nur in bestimmten Zeitsequenzen in den Montagebereich bewegt werden.
- Die notwendigen Körperkräfte innerhalb des Prozesses sind nicht optimal. Zug- und Druckkräfte zur Positionierung des Objektes im Raum sind hoch. Grund sind kurze Wege in einem eng eingegrenzten Bereich sowie die Anforderung eine exakte Position vor allem beim Aufsetzen des Schraubwerkzeugs zu
- Die Körperhaltung ist verbesserungsfähig. Grund dafür sind die Anordnung der Bedienelemente oder die mangelnde Sicht des Bedieners auf den Montageort.
- Verbesserungsfähige Qualität und Robustheit des Handhabungs- und Montageprozesses. Das eingesetzte Handhabungsgerät bietet keine Unterstützung zur leichten Rotation der Box um die y-Achse. Diese Bewegungen sind notwendig, um die Box in die Halter am Rahmen einzuhängen. Teilweise kommt es daher zu Problemen, die durch Unterstützer gelöst werden müssen.

Produkt/Prozess/Betriebsmittel der ATS-Box Montage

Im Nachfolgenden werden die bestehenden Umgebungsbedingungen des ausgewählten exemplarischen Montageprozesses beschrieben. Dabei wird auf die drei Ansatzpunkte Produkt, Prozess und Betriebsmittel eingegangen.

Das **Produkt** ATS-Box wird zum Zeitpunkt der Analyse in 76 unterschiedlichen Varianten verbaut. Ein Großteil der variantenbildenden Merkmale ist jedoch auf Unterschiede im Inneren der Box zurückzuführen. Sie haben nur wenig Auswirkungen auf die äußere Gestalt und das Gesamtgewicht. Bezogen auf das Thema Handhabung lässt sich daher eine Reduktion auf zwei Varianten vornehmen, die in **Bild 3.12** dargestellt sind.

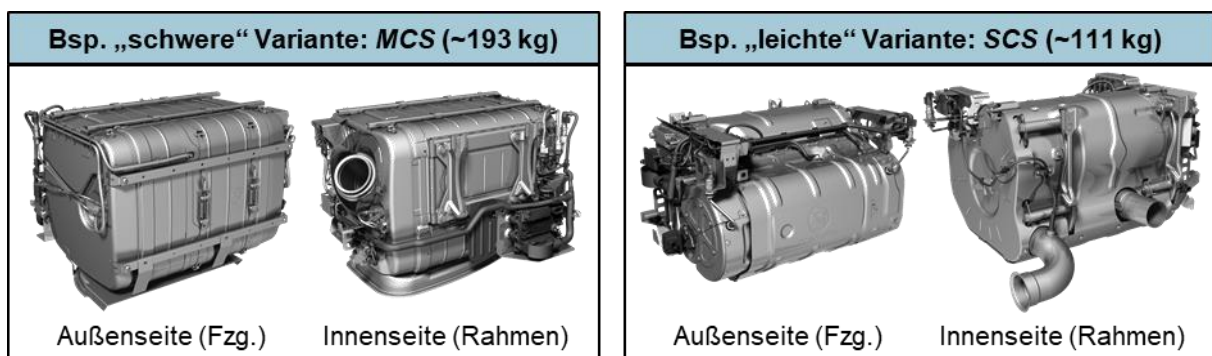


Bild 3.12: ATS-Box Varianten (Eigene Darstellung; Bildquellen: Daimler Truck)

ATS-Box variants

Die beiden Varianten unterscheiden sich in der äußeren Gestalt und der Masse. Die Variante MCS (Medium Cross Section) wird bei schweren Motorvarianten verbaut. Sie wiegt laut technischer Zeichnung 193 kg. Die Variante SCS (Small Cross Section) wird

bei der leichteren Motorenfamilie verbaut. Ihr Gewicht beträgt 111kg. Innerhalb der Subvarianten bestehen kleinere Abweichungen von der angegebenen Masse. Weiterhin besitzen beide Box Varianten jeweils vier Aufnahmeösen an der Oberseite, die zur Handhabung dienen.

In **Bild 3.13** sind die für die Montage relevanten Produktmerkmale der beiden ATS-Box Varianten abgebildet.

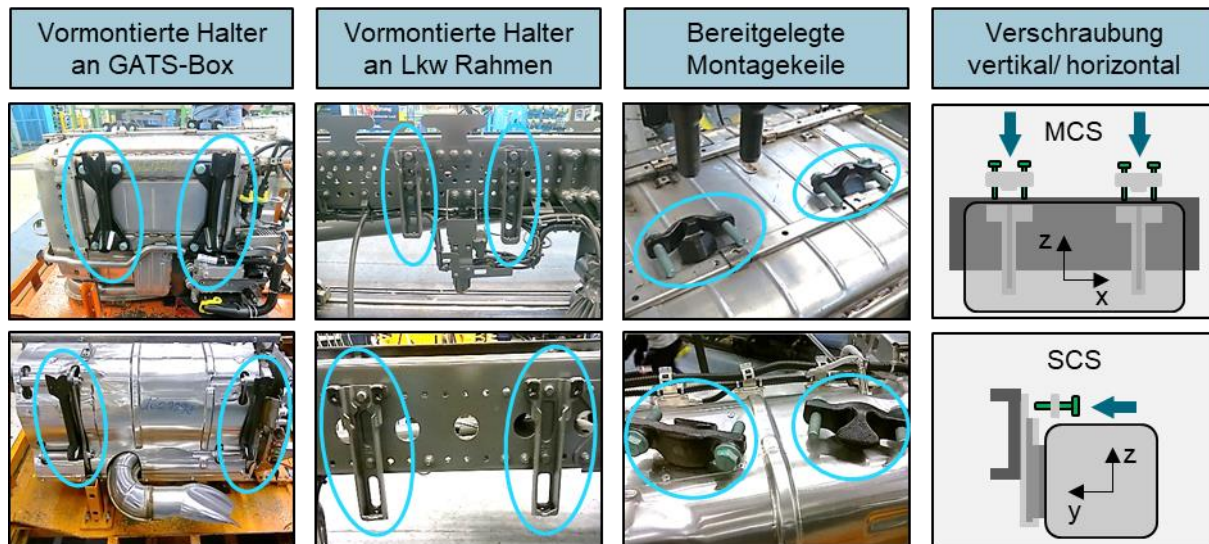


Bild 3.13:Montagerelevante Produktmerkmale MCS- und SCS-ATS-Box; Bildquellen:
Daimler Truck

Assembly relevant product features MCS- and SCS-ATS-Box

Die ATS-Boxen werden mit jeweils zwei vormontierten Haltern am Montageband angeliefert. Am Lkw-Rahmen befinden sich an der Montagestation ebenfalls schon zwei vormontierte Halter, die als Aufnahme für die ATS-Box dienen. Die Position der ATS-Box befindet sich immer an der rechten Rahmenaußenseite des Lkw. Die Box wird von oben in die Halterpaare eingehängt und zentriert sich aufgrund der Schwalbenschwanzführung. Im Anschluss erfolgt eine Sicherung mittels Montagekeilen, die mit jeweils zwei Schrauben montiert werden. Ein grober Unterschied hierbei ist, dass bei SCS-Boxen eine horizontale Verschraubung von der Seite und bei MCS-Boxen eine vertikale Verschraubung von oben erfolgt. Die Verschraubungen besitzen die folgenden Parameter:

- **SCS:** 2x2 Sechskantschrauben M24 x 60, Abstand 110mm, 225Nm +90°, (-z) ↓
- **MCS:** 2x2 Sechskantschrauben M21 x 50, Abstand 100mm, 225Nm +90°, (y) ←

Der **Prozess** ATS-Box Montage erfolgt im Bandbereich „Aggregate“ (vgl. **Bild 3.11**) und wird an den drei parallel angeordneten Montagebändern auf die gleiche Art und Weise mit einem speziellen Handhabungsgerät durchgeführt. **Bild 3.14** zeigt das schematische Layout der Montagestation, in der die ATS-Box montiert wird.

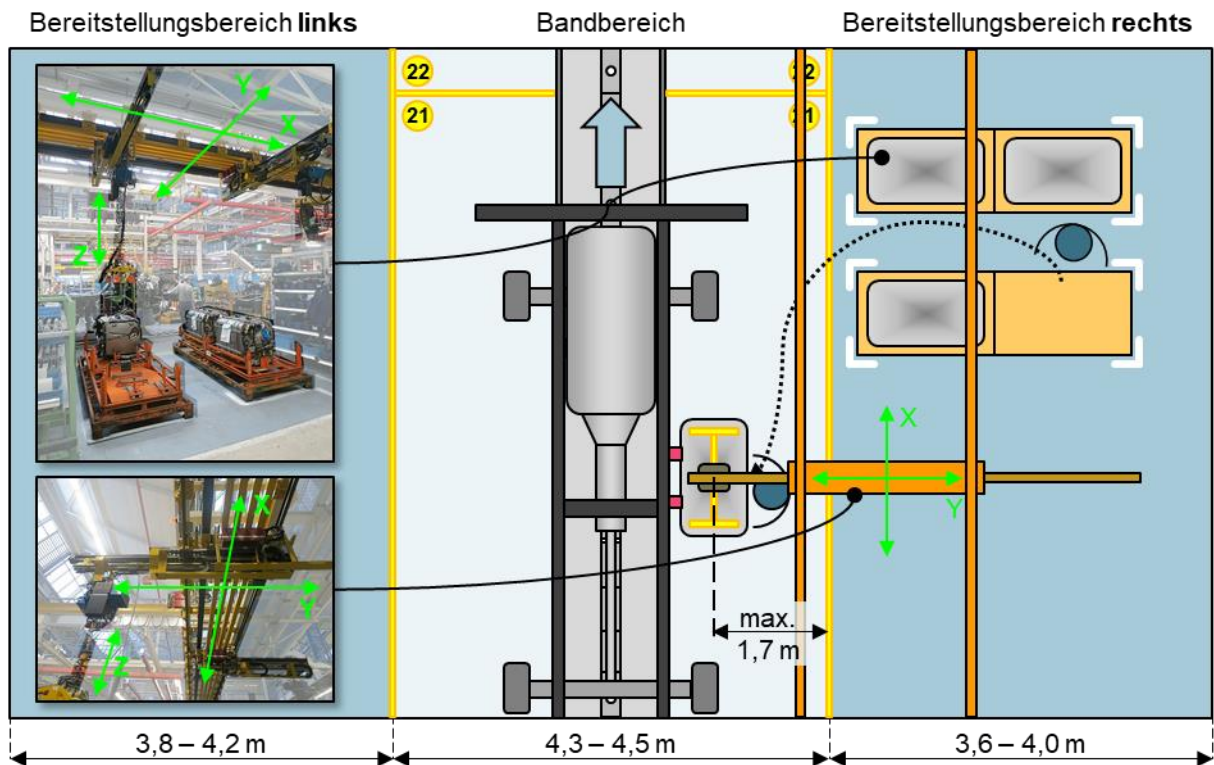


Bild 3.14: Layout ATS-Box Montageprozess; Eigene Darstellung; Bildquellen: Daimler Truck
Layout ATS-Box assembly process

Die ATS-Boxen werden jeweils im rechten Bereitstellungsbereich auf Sonderladungsträgern (SLT) bereitgestellt. Die Anlieferung erfolgt nach dem Prinzip „Just in Sequence“ (JiS) im „Zwei Behälter Prinzip“. Dabei trägt jeder SLT zwei ATS-Boxen. Der prinzipielle Aufbau des SLT und die für die Handhabung der Boxen entscheidenden Maße sind in **Bild 3.15** dargestellt. Die Bereitstellung und das Design des SLT ist nicht Bestandteil dieser Arbeit und die Verwendung bestehender SLT geht als Festforderung in die Entwicklung mit ein.

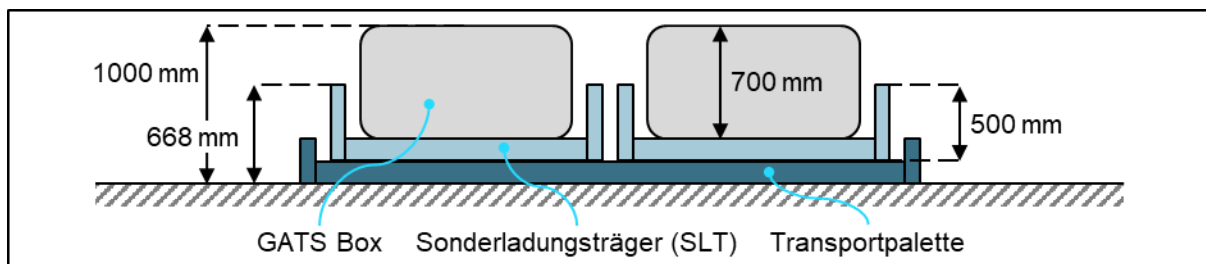


Bild 3.15: Ladungsträger zur Bereitstellung der ATS-Box
Load carrier for provisioning of ATS-Box

Der komplette Montageprozess gliedert sich aus verschiedenen Teilprozessschritten, die nacheinander oder parallel erfolgen. **Bild 3.16** zeigt Fotoaufnahmen der Ist-Situation von wesentlichen Teilprozessschritten der ATS-Box Montage.

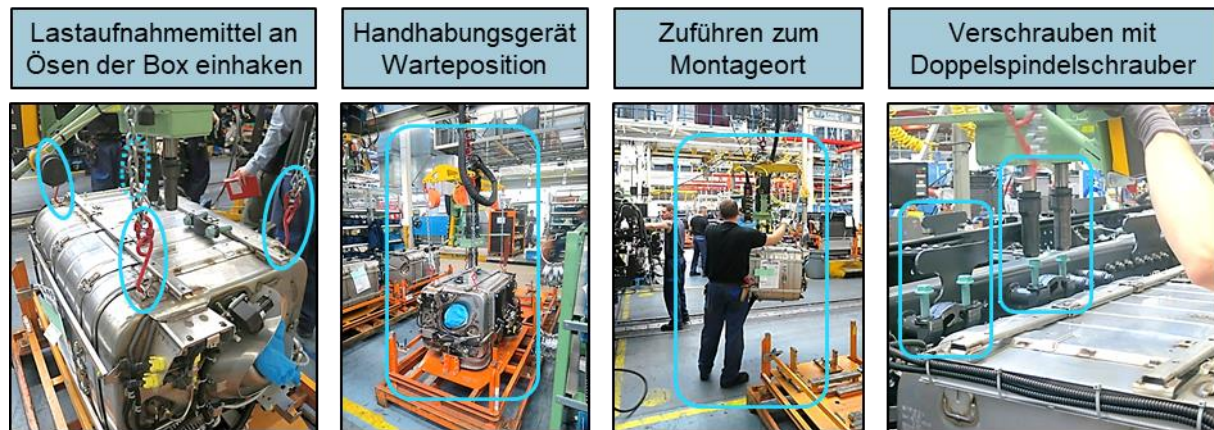


Bild 3.16: Teilprozessschritte ATS-Box Montage; Bildquellen: Daimler Truck

Sub-process steps ATS-Box assembly

Der Prozess beginnt mit vorbereitenden Tätigkeiten, wie dem Lesen und Abgleichen des Montageauftrags durch den Mitarbeiter. Danach wird die Transportsicherung des SLTs entriegelt und zwei Montagekeile sowie vier Sechskantschrauben auf der Box bereitgelegt. Im Anschluss positioniert der Mitarbeiter das Handhabungsgerät über der entsprechenden Box im SLT und hängt die vier Haken des Lastaufnahmemittels in die vier dafür vorgesehenen Ösen an der Oberseite der ATS-Box ein. Zum gegebenen Zeitpunkt hebt der Werker die Box mit Hilfe des Handhabungsgeräts aus dem SLT und bewegt sie an den Lkw-Rahmen. Dort erfolgt eine Feinpositionierung, um die Box von oben in die Halter einzuhängen. Sobald die Halter die Box tragen sind die Ketten des Lastaufnahmemittels entspannt und werden aus den Ösen ausgehakt. Im Anschluss positioniert der Werker händisch zwei Montagekeile an der Oberseite der Halter und fädelt die insgesamt vier Schrauben von Hand ein. Danach wird der im Lastaufnahmemittel integrierte EC-Doppelspindelschrauber exakt über einem Schraubenpaar positioniert und mit sich drehenden Spindeln auf sie abgesenkt. Der Schraubprozess dauert eine halbe Minute. Während dieser Zeit muss der Werker das Handhabungsgerät mit der Bandgeschwindigkeit synchronisieren und nachfahren, da der Lkw-Rahmen konstant weitergefördert wird. Nach Ende des Schraubvorgangs wird der Schrauber nach oben abgezogen und das Handhabungsgerät wieder in den Bereitstellungsbereich auf eine Parkposition bewegt. Abschließend dokumentiert der Mitarbeiter den Prozess.

Eine detaillierte Übersicht der einzelnen Teilprozessschritte ist in Form eines Montagevorranggraphen in **Bild 3.17** dargestellt. Das Diagramm enthält die Reihenfolge und Prozesszeiten der einzelnen Teilschritte. Parallel angeordnete Teilprozesse können theoretisch gleichzeitig erfolgen. Da allerdings nur ein Mitarbeiter für den Prozess verantwortlich ist, muss er diese nacheinander abarbeiten, kann allerdings hierfür eine beliebige Reihenfolge wählen. Weiterhin sind anhand des Schaubilds die erforderlichen Teilprozessschritte, bei denen das Handhabungsgerät aktiv eingesetzt wird, erkennbar.

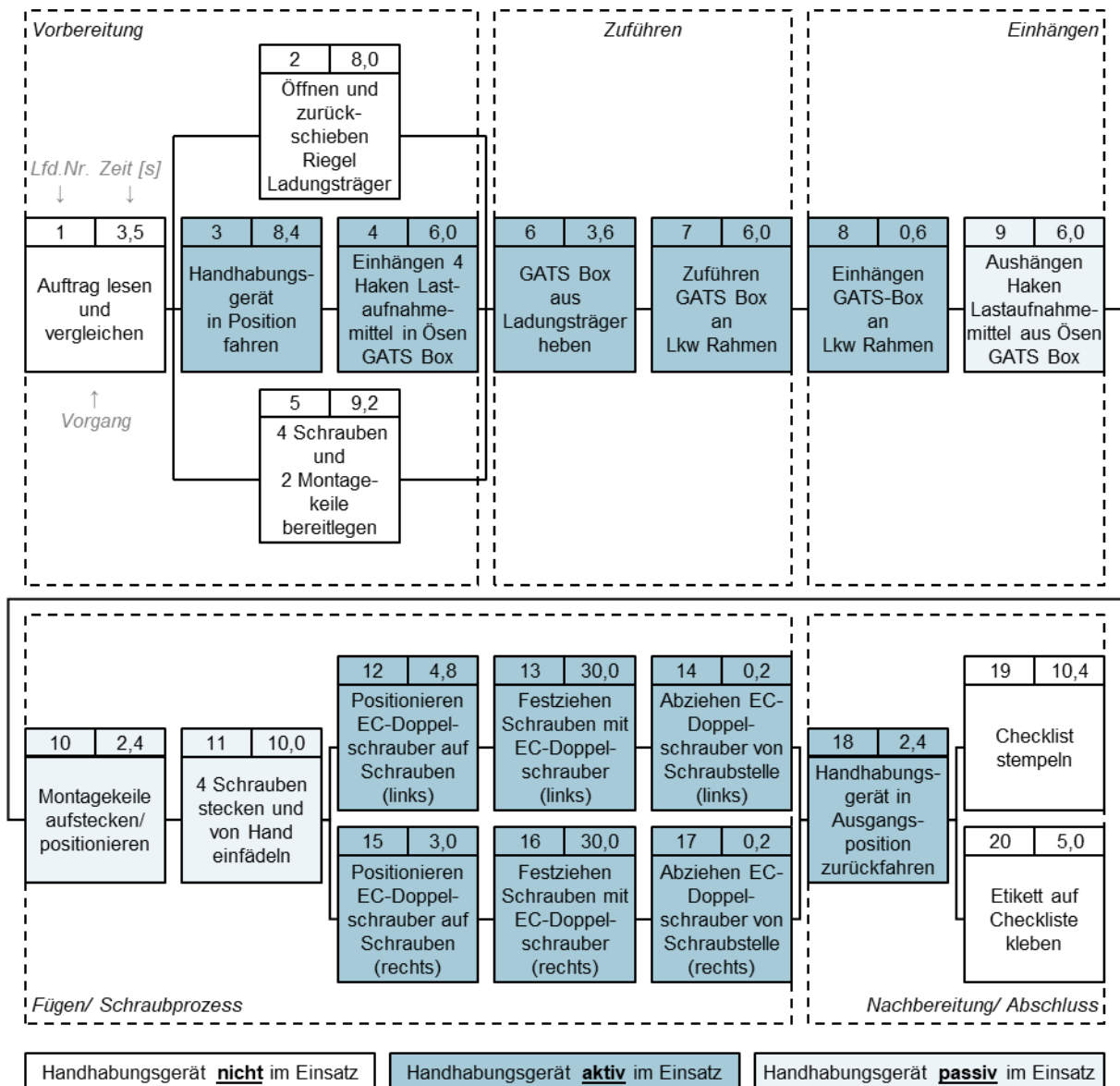


Bild 3.17: Montagevorranggraph und Prozessschaubild ATS-Box Montage

Assembly priority plan and process flow diagram ATS-Box assembly

Die Summe aller Teilprozessschritte hat eine Zeitdauer von 149,7 Sek (2m30s). Die davon aktiv mit dem Handhabungsgerät durchgeführten Teilprozessschritte haben aufsummiert eine Zeitdauer von 95,2 Sek (1m35s). Das entspricht 64 % der Gesamtprozesszeit. Bei einigen wenigen Teilprozessschritten hat das Handhabungsgerät zwar keinen aktiven Prozessbeitrag, muss jedoch wie oben beschrieben passiv mitgeführt werden. Werden die Prozesszeiten, bei denen das Handhabungsgerät sowohl aktiv als auch passiv im Einsatz ist, addiert, beträgt die Zeitdauer 113,6 Sek (1m54s). Das entspricht demnach 76 % der Gesamtprozesszeit. Da für die Montage der ATS-Box ein Bandbereich von 7,7 m Länge bei einer maximalen Bandgeschwindigkeit von 1,8 m/min zur Verfügung steht, stehen für den Prozess bei Komplikationen theoretisch maximal 256,7 Sek (4m17s) zur Verfügung. In solch einem Fall entstünden jedoch wiederum problematische Auswirkungen auf andere Prozesse. Die jeweiligen zeitlichen Prozessbestandteile für Handhabung unter

Einsatz des Handhabungsgeräts haben somit einen deutlichen Anteil am Gesamtprozess, was das Diagramm in **Bild 3.18** verdeutlicht. Im weiteren Verlauf der Arbeit gilt es diesen Betrag zu optimieren.

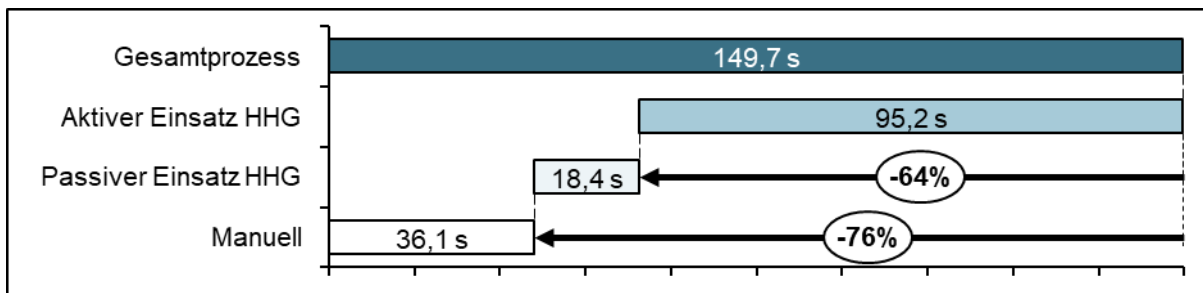


Bild 3.18: Prozesszeit für Handhabung während ATS-Box Montage

Process time for handling during ATS-Box assembly

Der letzte Ansatzpunkt ist das **Betriebsmittel**. Im Falle der ATS-Box Montage handelt es sich um ein Handhabungsgerät, das sowohl die Montagekomponente als auch ein EC-Schraubwerkzeug handhabt. An jedem Band existieren jeweils zwei dieser Handhabungsgeräte. Eines für die MCS- und eines für die SCS-Box Variante. Sie unterscheiden sich durch das im Lastaufnahmemittel integrierte Schraubwerkzeug. **Bild 3.19** zeigt Fotoaufnahmen des Handhabungsgeräts und der Umgebung in verschiedenen Situationen und Perspektiven.



Bild 3.19: Handhabungsgerät ATS-Box Montage; Bildquellen: Daimler Truck

Handling device ATS-Box assembly

Der Raum oberhalb des Bandbereichs ist oftmals nur eingeschränkt zugänglich. An der Station der ATS-Box Montage fährt z.B. der Motorenkran regelmäßig über dem Bandbereich vor und zurück. Aus diesem Grund wurde eine Kranschienensystem eingesetzt, das bei Bedarf mit einer maximalen Auskragung von 1,7 m in den Bandbereich teleskopiert werden kann (vgl. **Bild 3.14**). Aufgrund der hohen Eigen- und

Traglast werden Schwerlast-Deckenschienen aus Stahl genutzt. Mit dieser konstruktiven Maßnahme wird bei voller Auskrantung eine nur geringe Durchbiegung erzielt. Nachteilig an dieser Konstruktion ist allerdings die Schwergängigkeit der Verfahrbewegungen. Aus diesem Grund sind die Bewegungen des Kranschienensystems in x-Richtung sowie die Auskrantung des Schwerlast-Teleskops in y-Richtung mit elektrischen Antrieben versehen. Die Verfahrbewegung in y-Richtung ist jedoch manuell ohne Unterstützung. Ein integrierter elektrischer Kettenzug hebt und senkt die Last. Es sind zwei Hubgeschwindigkeiten wählbar: langsam (1,5 m/min) und schnell (6 m/min).

Die Steuerung befindet sich im Lastaufnahmemittel, das in **Bild 3.20** abgebildet ist.

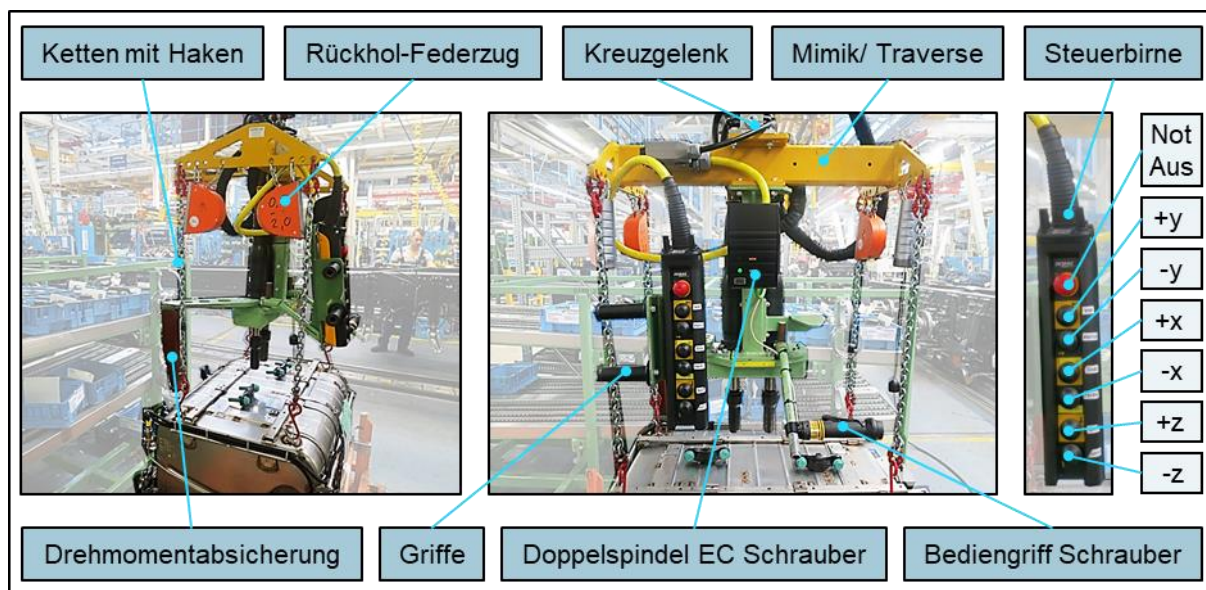


Bild 3.20: Lastaufnahmemittel ATS-Box Montage; Bildquellen: Daimler Truck

Load handling attachment ATS-Box assembly

Das Lastaufnahmemittel besteht aus einer Mimik, an der vier Ketten mit Haken für die Aufnahme der Box angebracht sind. An der Oberseite der Mimik befindet sich zentrisch angeordnet ein Kreuzgelenk, an dem das Lastaufnahmemittel am Kettenzug hängt. Unterhalb davon ist jeweils der Doppelspindel EC-Schrauber angebracht. Die Drehmomente der beiden Spindeln stützen sich während des Schraubvorgangs gegenseitig ab. Für den Fall, dass eine Spindel versehentlich abrutschen sollte, ist noch eine Drehmomentabsicherung verbaut, die das Moment notfalls am Lkw-Rahmen abstützt. Die Kombination aus Lastaufnahmemittel und Schraubwerkzeug ermöglicht die Handhabung der Komponente und des Werkzeugs in einem Arbeitsvorgang, was somit in der Einsparung von Prozesszeit resultiert (vgl. **Bild 3.17**). Die Steuerung des Handhabungsgeräts erfolgt über eine im Lastaufnahmemittel fixierte Steuerbirne. Die translatorischen Bewegungen lassen sich über insgesamt sechs Taster steuern. Der Schrauber hat einen zusätzlichen Aktivierungsschalter. Weiterhin gibt es Handgriffe, um kleine Bewegungen und Orientierungsänderungen (hauptsächlich um die z-Achse) manuell umzusetzen.

Im Rahmen der Analyse wurden weiterhin auch **Wechselwirkungen** zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie angrenzende Randbedingungen analysiert. Wie in **Bild 3.21** dargestellt, gibt es mehrere Randbedingungen, die sich auf die Handhabung und Montage der ATS-Box auswirken. Zum einen müssen bei der Handhabung die unterschiedliche Höhe und Neigung des jeweiligen Lkw-Rahmens auf dem Montageband sowie die jeweils eingestellte Bandgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Zum anderen können mögliche Fügeoleranzen bei der zuvor durchgeführten Montage der Halter an ATS-Box und Lkw-Rahmen den Handhabungs- und Montageprozess erschweren oder aufgrund von Verkanten beim Einhängen zu Komplikationen führen. Diese sind konstruktiv bedingt und können nur begrenzt durch die Handhabung ausgeglichen werden.

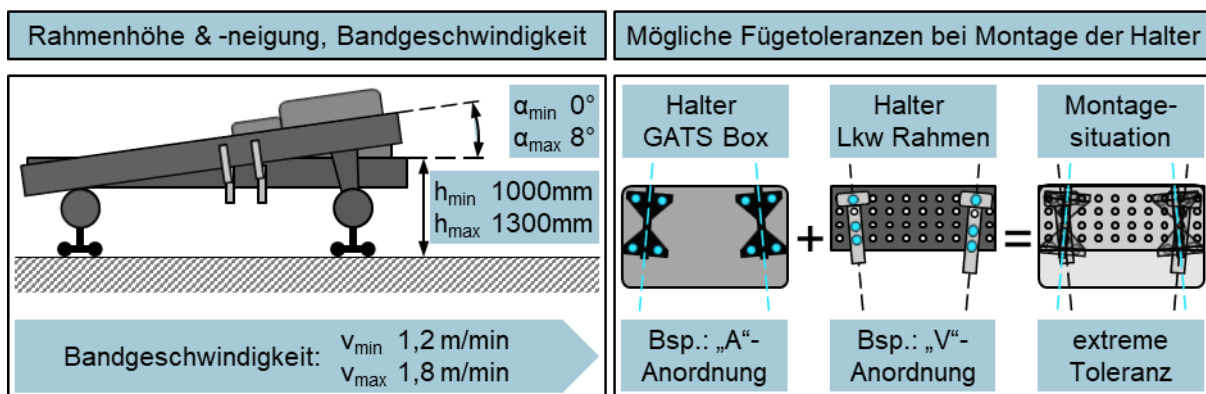


Bild 3.21: Randbedingungen und Herausforderungen ATS-Box Montage

Boundary conditions and challenges ATS-Box assembly

Auf Basis der identifizierten Randbedingungen und den Rückmeldungen aus Interviews mit Meistern und Werkern, können folgende konkrete Herausforderungen und Verbesserungswünsche abgeleitet werden:

- Verbesserung der Sicht auf Fügeort/Montageort: Die Bediener wünschen sich beim Einhängen und Verschrauben, speziell bei hohen Rahmen, mehr Freiheiten bei der Wahl ihrer Position und Körperhaltung, um einen idealen Blick auf den Fügeort zu haben.
- Bessere Unterstützung bei der Änderung der Orientierung der Last: Das ist speziell bei Rotation der Box oder des Schraubers um y-Achse zur Anpassung an die Rahmenneigung notwendig. Beim bestehenden Betriebsmittel ist das nur aufgrund des Kreuzgelenks und der Flexibilität der Ketten im Lastaufnahmemittel möglich. Ergonomisch sind diese Bewegungen jedoch weder geführt oder aktiv unterstützt.
- Bessere Unterstützung bei der Feinpositionierung: Beim Einhängen der Box in die Halter am Rahmen sowie beim Aufsetzen des jeweiligen Schraubers muss am bewegten Objekt relativ fein und millimetergenau positioniert werden. Speziell die Feinpositionierung des SCS-Schraubers, der horizontal und quer zur Fließrichtung aufgesetzt wird, ist kritisch und bedarf viel Übung und Geschick.

- Einfachere Synchronisation des Handhabungsgeräts mit konstanter und relativ langsamer Bandgeschwindigkeit: Eine einfache und genaue Steuerung der Beschleunigung und Geschwindigkeit von Bewegungen des Handhabungsgeräts wird gefordert. Eine äußerst schwierige Beispielsituation ist die Mitführung des Schraubers während des Schraubvorgangs.
- Verbesserte Mensch-Maschine-Schnittstelle und Bedienung: Die Steuerbirne ist unhandlich und nicht intuitiv zu bedienen. Die Funktionen mancher Bedienknöpfe sind zudem an SCS- und MCS-Handhabungsgerät teilweise vertauscht. Hinzu kommt, dass der Mitarbeiter nur schwierig mehrere Knöpfe gleichzeitig bedienen kann. Das ist jedoch bei gleichzeitig stattfindenden Achsbewegungen (z.B. in x- und z-Richtung beim Aufsetzen des Schraubers) notwendig.
- Flexiblere Geschwindigkeiten: Es besteht der Wunsch nach einer intuitiveren, schnelleren und flexibleren Anpassung der Bewegungsgeschwindigkeiten des Handhabungsgeräts in den angetriebenen Hauptbewegungsachsen x, y, z. Das würde sowohl bei der Montage helfen, aber auch um bei möglichen Komplikationen schnell reagieren zu können.

Es ist erkennbar, dass vor allem die Verbesserungswünsche der Mitarbeiter konkret das Betriebsmittel betreffen.

Um den Wünschen der Mitarbeiter gerecht zu werden und die Ergonomie und Bedienung zu verbessern, wurden an einem Montageband bereits zwei verschiedene nicht angetriebene Teleskoplösungen mit leichtlaufenden Kranbaukastensystemen in einem Vergleichsaufbau untersucht. Trotz einer intuitiveren Bedienbarkeit ist der notwendige Kraftaufwand im Grenzbereich der ergonomischen Risikoanalyse. Die gleichzeitige Handhabung von Komponente und Werkzeug ist nicht möglich, da sonst die Traglast zu hoch ist. Diese Erkenntnis verdeutlicht die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Betriebsmittelkonzepts zur Handhabung schwerer Lasten in der Montage. Zusammenfassend würde das Produkt- sowie Prozessseitig zu noch mehr Flexibilität führen, was unter anderem auch weitere Änderungen oder eine Übertragbarkeit ermöglichen kann.

3.4.3 Hauptanforderungen an Konzept

Main requirements for concept

Basierend auf dem Ergebnis der Prozessanalyse wurden die Kernanforderungen an das Konzept für ein neuartiges Unterstützungssystem zur Handhabung schwerer Lasten abgeleitet und konkretisiert. Die Anforderungen und Ziele sind in **Bild 3.22** dargestellt. Es handelt sich dabei vornehmlich um technisch zu lösende Anforderungen, die untereinander Überschneidungen aufweisen können. Beispielsweise kann eine intuitive Bedienung gleichzeitig zu einer höheren Werkerakzeptanz führen. Alle Anforderungen lassen sich gleichzeitig auch als Thesen des Konzepts ansehen. Die Erfüllung der Anforderungen bewirkt eine Vorteilhaftigkeit

des Konzepts, was wiederum anhand eines umzusetzenden Demonstrators bewiesen werden soll.

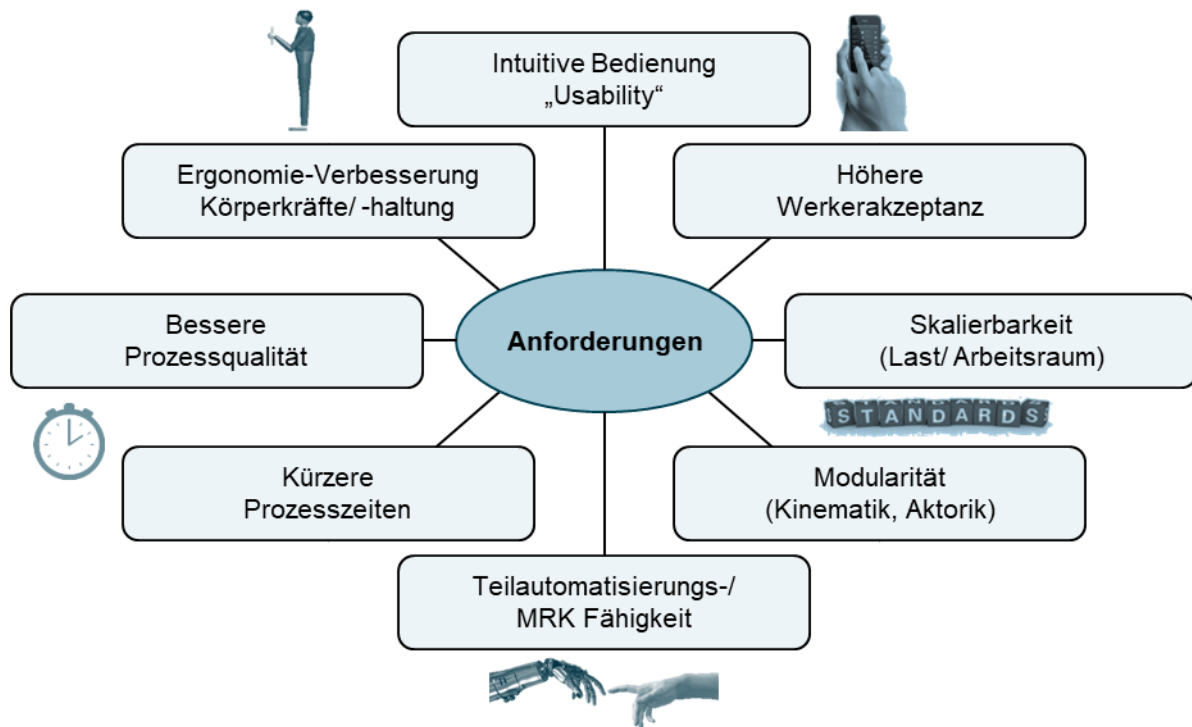


Bild 3.22: Anforderungen an das Handhabungskonzept (vgl. [MATH16b, S. 590–591])

Requirements to the handling concept

Die einzelnen Anforderungen sind in **Tabelle 3.2** erläutert. Dabei sind auch die jeweiligen Messgrößen und Faktoren beschrieben, die anhand eines Demonstrators im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht und geprüft werden sollen. Die einzelnen Anforderungen werden als gleichwertig betrachtet und

Tabelle 3.2: Konzeptanforderungen und Erläuterungen (vgl. [MATH16a, S. 12/10]; [MATH16b, S. 590–591]; [MATH16c, S. 15/6])

Concept requirements and explanations

Anforderung	Erläuterung
Intuitive Bedienung „Usability“	Kern der Bedienung ist die Änderung von Position und Orientierung eines Handhabungsobjekts. Das Konzept soll ein selbsterklärendes Bedienkonzept beinhalten und eine intuitive Mensch-Maschine-Schnittstelle, mit dem Ziel die Steuerung möglichst mit nur einfachster Anleitung innerhalb kürzester Zeit intuitiv erlernbar zu gestalten.
Höhere Werkerakzeptanz	Das Konzept soll eine höhere Akzeptanz des Unterstützungsgeräts als bei bisherigen Systemen aufweisen. Der Werker soll das System als Unterstützung wahrnehmen und es gerne und richtig benutzen. Dazu tragen bspw. natürliche

	Bewegungsgeschwindigkeiten, eine flexibel wählbare Position und Körperhaltung während der Bedienung sowie eine direkte Sicht auf den Montageort oder auf den Fügeort bei.
Skalierbarkeit (Last/Arbeitsraum)	Das Konzept soll hinsichtlich des Arbeitsraums und der zu handhabenden Last in sinnvollen Schritten skalierbar sein. Speziell die kinematische Struktur soll daher basierend auf einem skalierbaren Kinematikbaukasten basieren.
Modularität (Kinematik, Aktorik)	Das Konzept soll modular gestaltet sein, sodass verschiedene Anwendungen umgesetzt werden können. Des Weiteren ist der modulare Aufbau ein Grundstein für die Wandlungsfähigkeit des Konzepts. Standardisierte Schnittstellen ermöglichen den Einsatz von marktüblichen Komponenten aus Aktorik, Sensorik und Steuerung.
Teilautomatisierungs-/MRK-Fähigkeit	Das Konzept soll Eigenschaften zur Automatisierung von Teilprozessschritten aufweisen. Dabei sollen moderne, möglichst integrierte Sicherheitssensoren und -mechanismen verwendet werden, um einen Schutzzaunlosen Betrieb in einem mit dem Mitarbeiter geteilten Arbeitsraum zu ermöglichen. Automatisierbar sind primär nicht wertschöpfende Teilprozessschritte wie eine „Home-Fahrt“ oder die Bewegung zu einer Warteposition.
Kürzere Prozesszeiten	Das aus dem Konzept resultierende Handhabungs- und Unterstützungssystem soll in der Anwendung kürzere Prozesszeiten als mit vergleichbaren herkömmlichen Hebezeugen vorweisen. Die Bewegungsgeschwindigkeiten sollen sich dabei an den natürlichen Bewegungen des Menschen orientieren. Eine Reduzierung der Trägheit bei positiver oder negativer Beschleunigung von Lasten kann dazu beitragen.
Bessere Prozessqualität	Die Prozessqualität fußt vorwiegend auf der Bewegungsgenauigkeit während des Handhabungsvorganges. Durch hohe Präzision sollen Fügebewegungen einfach und zielgerichtet ohne Mehrfachversuche oder zusätzliche Unterstützung durchgeführt werden können. Dazu können bspw. verringertes Pendeln oder Aufschwingen der Last beitragen.
Ergonomieverbesserung (Körperkräfte/-haltung)	Die Ergonomie wird anhand der eingenommenen Körperhaltung und der aufgewendeten Körperkräfte des Bedieners bewertet. Das Ergebnis einer standardisierten Ergonomie-Bewertung soll besser sein, als bei vergleichbaren bisherigen Handhabungseinrichtungen und idealerweise den Ampelstatus „grün“ erhalten. Da die meisten Handhabungsvorgänge keine stationären sondern dynamische Bewegungen darstellen, sind speziell die Kräfte beim

	Beschleunigen und Abbremsen der Last oder bei kleinen Richtungsänderungen zu beachten.
--	--

Neben den technisch zu lösenden Anforderungen wird übergeordnet noch die Wirtschaftlichkeit des neuartigen Konzepts gefordert. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezieht sich auf die einmaligen wirtschaftlichen Aufwendungen bzw. Kosten und die laufenden wirtschaftlichen Vorteile aufgrund des Einsatzes des Systems. Einmalige Kosten lassen sich hauptsächlich auf Hardwareseite optimieren. Hierzu kann bspw. auf verfügbare kostengünstige Baukastensysteme für die Kinematik und standardisierte Module für Aktorik und Sensorik zurückgegriffen werden. Laufenden Kosten lassen sich durch die Funktionalität des Systems und positive Effekte auf Prozess und Qualität beeinflussen. Kürzere und stabilere Prozesszeiten ermöglichen es bspw. den Mitarbeiter zu entlasten, sodass er andere wertschöpfende Tätigkeiten durchführen kann. Weiterhin kann eine verbesserte Ergonomie zu einem geringeren Krankenstand beitragen.

4 Konzept

Concept

Im nachfolgenden Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept für ein intelligentes Unterstützungssystem zur Handhabung schwerer Lasten in der Montage erläutert. Zu Beginn wird die modulare Architektur des konstruktiven Aufbaus des Handhabungsgeräts als Kern des Konzepts beschrieben. In den nachfolgenden Unterkapiteln erfolgt jeweils die Beschreibung des gewählten Ansatzes und der Ausgestaltung der einzelnen Module.

4.1 Modularer Aufbau des Konzepts

Modular setup of concept

Zentraler Bestandteil des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepts eines neuartigen intelligenten Unterstützungssystems zur Handhabung schwerer Lasten ist der modulare Aufbau. Die Modularität ermöglicht die Auswahl von existierenden und verfügbaren Komponenten an geeigneter Stelle, die Entwicklung nicht vorhandener abgegrenzter Teilkomponenten sowie die gezielte Ausgestaltung der prozessspezifischen Elemente. Durch den modularen Aufbau wird das Ziel verfolgt, ein anpassbares und somit universell einsetzbares und vergleichsweise kostengünstiges System zu entwickeln.

Das Konzept beinhaltet somit einen konstruktiven Aufbau, der sich in verschiedene Module gliedert. Die einzelnen Module stellen physisch relativ unabhängige Einheiten dar, die allerdings nur aneinandergereiht und zusammengesetzt die Gesamtfunktion des Handhabungsgeräts ausbilden. Es handelt sich somit um eine physisch-modulare Architektur. Der gewählte Grad der Modularität ist somit durch eine physische Separierbarkeit des Gesamtsystems charakterisiert. Das bedeutet einerseits, dass einzelne Module zwar unabhängig und trennbar sind, jedoch allein keine Funktion des Gesamtsystems erfüllen können. Möglich ist das nur im Zusammenwirken mehrerer essentieller Module. Andererseits können dadurch bestimmte Module mit geringem Modifikationssaufwand durch ähnliche Komponenten ausgetauscht werden. Weiterhin können einzelne Module an die jeweiligen spezifischen Randbedingungen und Anforderungen der Funktion angepasst werden. Bei der Handhabung ist das beispielsweise speziell an der Schnittstelle zur gehandhabten Last der Fall. Form, Masse und Bewegungen der Last sind jeweils prozessspezifisch. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit einzelne Module herauszunehmen bzw. zu entfernen, falls deren Funktion nicht benötigt wird. Im Rahmen dieser Arbeit kann letztendlich durch den Ansatz einer modularen Architektur des intelligenten Unterstützungssystems der Entwicklungsprozess auf einige wenige Module fokussiert werden, wohingegen bei anderen Modulen auf geeignete Produkte, die den Stand der Technik darstellen zurückgegriffen werden kann [FELD13, S. 258–261]; [GÖPF98, S. 108]; vgl. [RAPP99, S. 54–56]. Im Rahmen dieser Arbeit wird dadurch vor allem die Gesamtkomplexität auf

einen realisierbaren Umfang reduziert. Gleichzeitig wird die Entwicklungsleistung der Arbeit auf die Auswahl geeigneter Komponenten, der Konfiguration von neuentwickelten Modulen und der Validierung des Aufbaus gerichtet.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept zum Aufbau eines intelligenten Unterstützungssystems zur Handhabung schwerer Lasten in der Montage beinhaltet drei Hauptmodule, die aneinandergereiht die Gesamtfunktion eines Handhabungsgeräts darstellen. Das Konzept ist schematisch in **Bild 4.1** dargestellt.

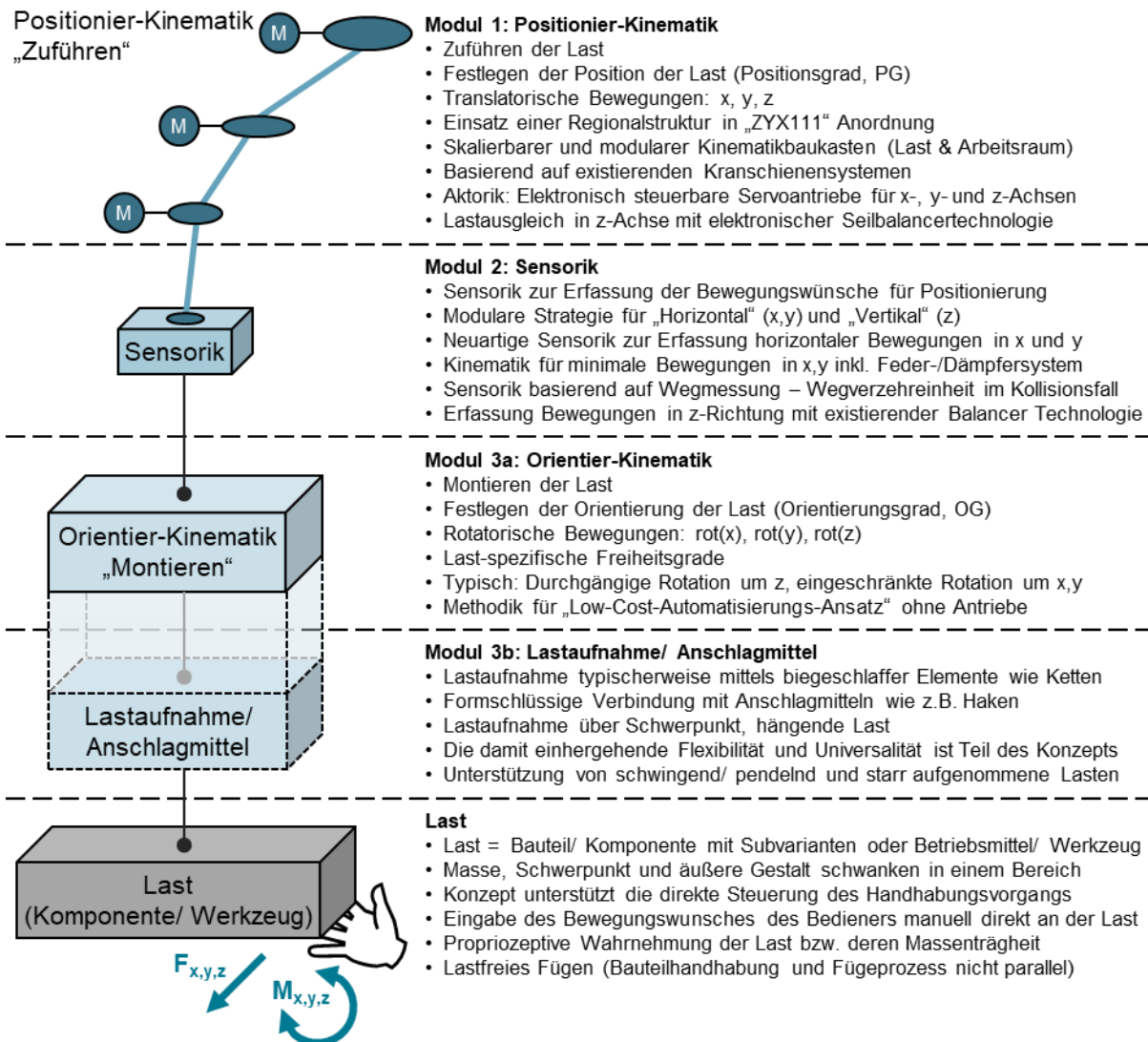


Bild 4.1: Modulare Architektur des Konzepts (vgl. [MATH16a, S. 12/11]; [MATH16b, S. 590–591]; [MATH16c, S. 15/7])

Modular architecture of concept

Das erste Modul ist die **Positionierkinematik**. Sie basiert auf einem manuellen Kranbaukastensystem, das mit adaptierten servomotorischen Antriebseinheiten ergänzt wird. Das Modul Positionierkinematik stellt somit die translatorischen Bewegungsachsen des Handhabungsgeräts dar.

Daran angebunden ist das zweite Modul, die **Sensorik**. Es erkennt die translatorischen Bewegungswünsche des Bedieners, die von den aktiven Bewegungsachsen der Positionierkinematik unterstützend umgesetzt werden. Der Bediener soll die translatorischen Bewegungen steuern, indem er geringe Kräfte und Momente manuell auf Module, Elemente oder die Last, die unter dem Sensorikmodul angebracht sind, aufbringt. Das Sensorikmodul wird im Rahmen dieser Arbeit aus zwei separaten Technologien aufgebaut. Eine neu entwickelte Sensorbox für horizontale Bewegungen in x- und y-Achse und eine elektronische Balancertechnologie für vertikale Bewegungen in der z-Achse, die den aktuellsten Stand der Technik darstellt.

Unter dem Sensorikmodul befindet sich das dritte Modul, die **Orientier-Kinematik**. Sie wird bei Bedarf bzw. bei der wiederkehrenden Handhabung von Bauteilen durch das **Lastaufnahmemodul** bzw. durch **Anschlagmittel** ergänzt und kombiniert. Wird nur ein Werkzeug gehandhabt, ist es direkt mit der Orientier-Kinematik verbunden. In diesem Fall wird idealerweise eine Kinematik verwendet, die die notwendigen Rotationsbewegungen abbildet. Die Orientier-Kinematik stellt somit die kinematische Lokalstruktur des Handhabungsgeräts dar (vgl. Kap. 3.3.1). Das Konzept beinhaltet eine passive Ausführung der rotatorischen Bewegungsachsen. Aufgrund der spezifischen Anforderungen an die zu handhabenden Lasten ist das Modul konzeptionell stets als individuelle Lösung umgesetzt. Im Rahmen der Arbeit wird das Konzept daher durch Anwendung einer geeigneten Methodik zur Generierung von Low-Cost-Automation Ansätzen basierend auf Mechanikprinzipien vervollständigt. Der Einsatz solcher Lösungen dient der einfachen und kostengünstigen ergonomischen Unterstützung des Bedieners bei der Durchführung der Rotationsbewegungen der Last.

Bei der Handhabung von Bauteilen fließt als wichtiges Merkmal die Verwendung von biegeschlaffen Elementen zur Lastaufnahme in die Konzeptentwicklung ein. Wird hingegen nur ein Werkzeug gehandhabt, ist dieses Modul nicht zwingend notwendig und kann als optional angesehen werden.

Zur Bewegung der **Last** beinhaltet das Konzept letztendlich noch das übergreifende neuartige Bedienkonzept, zur direkten Steuerung an der Last. Die ergonomische Unterstützung des Bedieners, natürliche Bewegungsgeschwindigkeiten sowie ein sicheres Gefühl für die bewegte Masse im Sinne der propriozeptiven Wahrnehmung bilden in Form einer geeigneten elektronisch geregelten Steuerung das vernetzende und umgreifende Element des Konzepts (vgl. Kap. 2.5.3, Vorteile intelligenter assistierender Handhabungsgeräte, S.33). Die elektronische Steuerung ermöglicht zudem die Automatisierbarkeit von Bewegungsabläufen des Handhabungsgeräts.

Die einzelnen Module werden in den nachfolgenden Kapiteln genauer beschrieben.

4.2 Modul Positionier-Kinematik

Module positioning-kinematic

Die sog. Positionier-Kinematik ist das erste Modul des Konzepts und stellt die Schnittstelle mit der Umgebung dar. Die Positionier-Kinematik beinhaltet die translatorischen Bewegungsachsen des Handhabungsgeräts und legt somit den Positionierungsgrad des Handhabungsobjektes fest (s. Kap. 2.1, Handhabung). Es handelt sich dabei um die kinematische Regionalstruktur des Handhabungsgeräts. Ihre Bewegungsanteile dienen im Wesentlichen dem Zuführen der Last vom Bereitstellungsort zum Montageort. Gleichzeitig legt sie die Form und Größe des Arbeitsraums fest. Auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 3.3.2 (Ideale Regionalstruktur für schwere Lasten in der Montage) wird hierfür eine ZYX 111 Kinematik mit drei rechtwinklig zueinander angeordneten Schubachsen eingesetzt. Die Positionierkinematik wird in der Fabrik an Deckenkonstruktionen oder Sekundärstahlbauten angebracht.

Wie in **Bild 4.2** dargestellt, basiert die Positionier-Kinematik im Rahmen dieser Arbeit auf einem Kranbaukastensystem (KBK-System). Ein KBK-System enthält Deckenschienen in verschiedenen Lastklassen sowie diverse Verbindungs- und Aufhängungselemente. Darüber hinaus sind die Schienen kombinierbar und in der Länge variabel. Das ermöglicht eine Skalierung des Arbeitsraums und der Traglast.

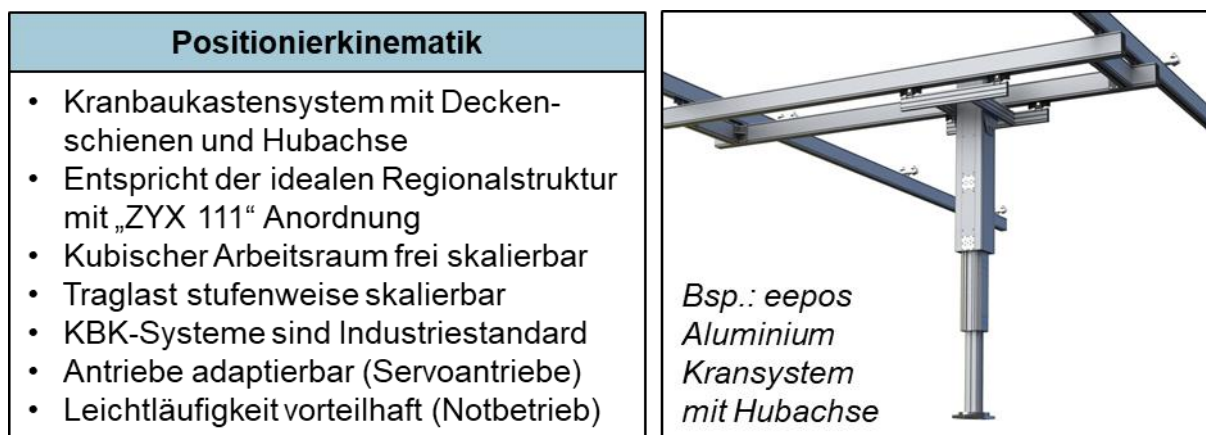


Bild 4.2: Positionierkinematik basierend auf Kranbaukasten System mit Hubachse

Positioning kinematic based on crane construction kit system with lifting axis

Für den Aufbau des Demonstrators im Rahmen dieser Arbeit wurde das Kranbaukastensystem der Firma EEPOS ausgewählt. Dieses System basiert auf Aluminium Strangguss Profilen mit Leichtlauf Fahrwägen für Traglasten bis 2.000kg. Zudem beinhaltet das Baukastensystem bereits eine vertikale Hubachse, die sich variabel mit Kettenzügen, Seilzügen, Pneumatikzylindern, Spindeln oder anderen Antrieben ausrüsten lässt. Die EEPOS-move Hubachse wird in einem Katzrahmen an einer Doppelkranbrücke aufgenommen. Sie ist in zwei- und dreigliedriger Teleskopausführung in verschiedenen Lastklassen bis 500kg Traglast am unteren Ende der Hubachse verfügbar. Außermittige Lasten können bis zu einem

Biegemoment von 2500 Nm aufgenommen werden. Torsionsmomente um die z-Achse sind bis zu 1400 Nm zulässig [MÜCH20]. Damit zeigt das Aluminium Kransystem von EEPOS exemplarisch die Verwendbarkeit von am Markt verfügbaren Baukastensystemen für schwere Lasten und wird in dieser Arbeit exemplarisch für die skalierbare Positionierkinematik eingesetzt. An dieser Stelle wird jedoch darauf hingewiesen, dass weitere ähnliche KBK-Systeme anderer Hersteller am Markt verfügbar und anwendbar sind. Diese Systeme haben sich bereits seit Jahrzehnten in der Industrie bewährt und sind in vielen Branchen im Einsatz.

Der Antrieb, der aus drei Schubachsen bestehenden Kinematik, ist in zwei Bereiche aufgeteilt. Zum einen werden an das Deckenschienensystem Servoantriebe mit speziellen Fahrwagen für die Bewegung in x- und y-Richtung adaptiert. Zum anderen wird für die Bewegung in z-Richtung ein neuartiger elektronischer Seilbalancer in die Hubachse integriert. Beide Submodule weisen eine eigenständige Steuerung auf und sind somit unabhängig voneinander. Der Seilbalancer wird im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

4.3 Modul Sensorik

Module sensoric

4.3.1 Sensorbox Horizontalbewegungen

Sensorbox horizontal movements

Um die Last in den horizontal angeordneten Translationsachsen in x- und y-Richtung zu bewegen, wird der Bediener von Servoantrieben in der Positionier-Kinematik unterstützt (vgl. Kap. 4.2, Modul Positionier-Kinematik). Richtung, Beschleunigung und Geschwindigkeit der Bewegung werden mit einem neuartigen Sensorikmodul erfasst. Das Sensorikmodul für die Erfassung der Horizontalbewegungen wird im Rahmen dieser Arbeit als „Sensorbox“ bezeichnet. Die Entwicklung, Einbindung und Parametrierung der Sensorbox als mechatronisches Subsystem in das Gesamtsystem ist ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit.

Entsprechend dem in Kapitel 4.1 beschriebenen modularen Konzept ist die Sensorbox am Ende der Regionalstruktur angeordnet. Sie ist somit das Bindeglied zwischen Regional- und Lokalstruktur. Bezogen auf das ausgewählte Kranschienensystem befindet sich das Sensorikmodul für Horizontalbewegungen somit an der Unterseite der Hubachse. Im Zuge des in dieser Arbeit entwickelten Konzepts, ist das Modul Sensorbox für zwei wesentliche Aufgaben verantwortlich. Einerseits werden mit Hilfe von Wegmesssensoren die gewünschten Bewegungsrichtungen und -beschleunigungen des Bediener erfasst. Andererseits sollen in diesem Modul mögliche Kollisionen der bewegten Last erkannt und der bis zum Stillstand der Last benötigte Verzögerungsweg kompensiert werden. Aus diesem Grund bedarf es zum einen einer Sensorik und zum anderen einer Kinematik, die den Weg zwischen

Kollision und Stillstand ausgleicht und im übertragenen Sinn als eine Art Knautschzone dient.

Die Recherche zum Stand der Technik in Forschung und Industrie (vgl. Kap. 2) ergab, dass eine Vielzahl von IAD Bedienimpulse mit einer Kraft-Momenten Sensorik an einem dedizierten Bediengriff erfassen. Widerstände und Trägheitskräfte der bewegten Last müssen mittels einer komplexen Force-Feedback Steuerung über den dedizierten Griff an den Bediener zurückgespielt werden. Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist jedoch die Steuerung direkt an der Last. Aus diesem Grund wird ein alternativer Ansatz ausgewählt und entwickelt. Das für diese Arbeit gewählte und zu validierende Prinzip basiert auf einer Kinematik für minimale Bewegungen in x- und y-Richtung, die mit einem Feder-Dämpfer-System ausgestattet ist. Die Bewegungen in der Kinematik werden dabei mit Wegmesssensoren elektronisch erfasst und verarbeitet.

Die prinzipielle Funktionsweise der Sensorbox ist in **Bild 4.3** dargestellt. Die Sensorbox besteht aus zwei rechtwinklig zueinander angeordneten Schwimmpplatten. Eine lässt sich in x-Richtung, die andere in y-Richtung bewegen. Jede Schwimmpplatte ist mit Präzisionsaxialführungen gelagert und mit einem mechanischen Feder-Dämpfer-System versehen. Somit wird die Schwimmpplatte bei Nichtbelastung in eine zentrale Position bzw. in die **Nullstellung** bewegt.

Will der Bediener die Last in eine bestimmte **Richtung** bewegen, so bringt er eine manuelle Kraft auf die Last unterhalb der Sensorbox auf. Die Kraft führt zu minimalen Wegauslenkungen in den Schwimmpplatten. Integrierte Wegmesssensoren erkennen die Wegauslenkungen. Die entsprechende Wegauslenkung in x und y entspricht der Richtung des Bewegungswunsches des Bedieners. Zudem ist der Betrag der Wegauslenkung proportional zur manuell aufgebrauchten Kraft des Bedieners, woraus sich die gewünschte Beschleunigung und Geschwindigkeit ableiten lässt. Die elektronischen Signale der Wegmesssensoren werden an eine Steuerung weitergeleitet. Die Steuerung verarbeitet sie als Eingangssignale in einem Regelkreis und gibt entsprechende Signale als Stellgrößen an die Servoantriebe in den Fahrachsen weiter.

Anhand dieses Prinzips muss der Bediener mit seiner manuell aufgebrauchten Kraft nur kurzzeitig die Massenträgheit der Last und die Reibung in den Führungen der Schwimmpplatten sowie im Feder-Dämpfer-System überwinden, bis er von den Servoantrieben unterstützt wird. Genau dieser Effekt ermöglicht dem Bediener ein realistisches, direktes und sicheres Gefühl für die Last und ihrer Bewegung bei gleichzeitiger Antriebsunterstützung.

Die Abstimmung des Systems bzw. der Regelung ist mit einer Servolenkung im Fahrzeug vergleichbar. Eine Servolenkung verstärkt die vom Fahrer aufgewandte Kraft für die Lenkbewegung. Gleichzeitig sollen jedoch auch Rückmeldungen von der Straße und der Fahrsituation möglichst direkt und dem Fahrzeug entsprechend als Gefühl am Lenkrad zurückgemeldet werden.

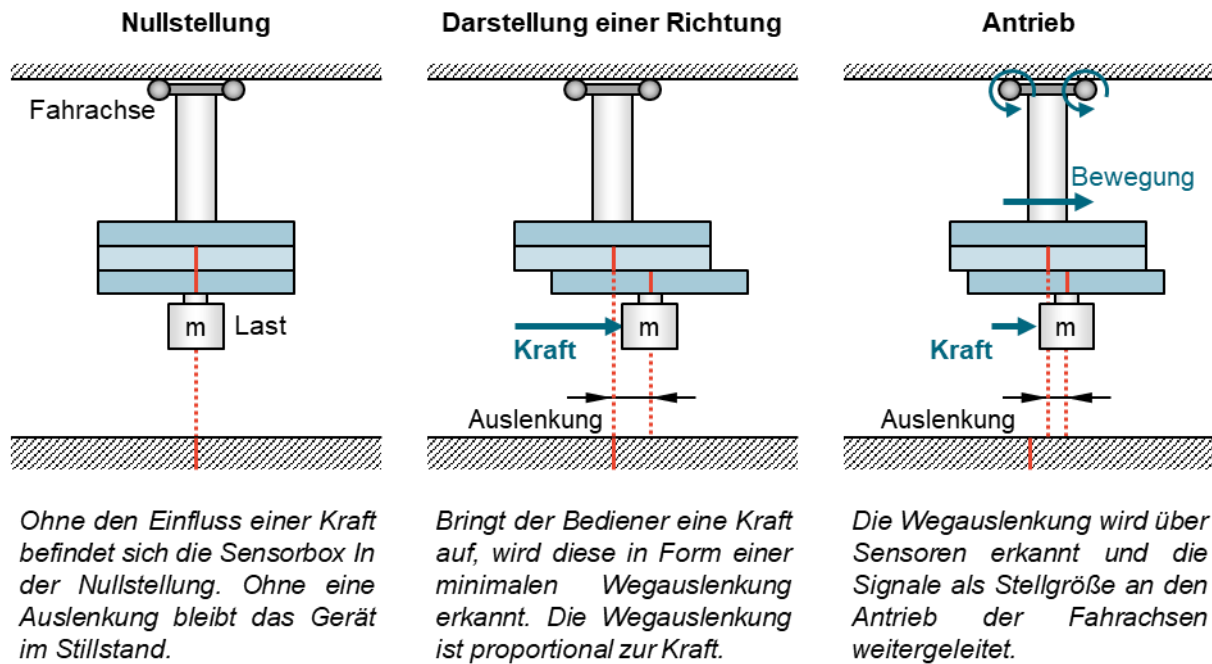


Bild 4.3: Prinzipielle Funktionsweise Sensorbox Horizontalbewegungen (vgl. [MATH16a, S. 12/14]; [MATH16b, S. 591–593]; [MATH16c, S. 15/8])

Principle function Sensorbox horizontal movements

Für die Entwicklung der Sensorbox wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Projektkooperation mit der Firma EEPOS eingegangen. Der mechanische Aufbau der Prototyp-Sensorbox wurde von der Firma EEPOS durchgeführt und basiert auf deren Patent für ein Kransystem mit elektromotorischem Antrieb [DICK14, S. 1–12]; vgl. [DICK15a, S. 1–10]; [DICK15b, S. 1–14]; [DICK15c, S. 1–15].

Der Gesamtaufbau des Systems sowie die Auswahl, Abstimmung und die Auslegung der Steuerung und Regelung wurde im Rahmen dieser Arbeit unter Verwendung einer auf dem Patent basierenden Sensorbox durchgeführt. **Bild 4.4** zeigt das Konstruktionsmodell der Sensorbox, die in dem Demonstrator, der im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde, implementiert ist. Während des Aufbaus des Demonstrators sind Weiterentwicklungen und Anpassungen, wie zusätzliche Dämpferelemente, eingeflossen. Die Abbildung zeigt somit die finale Ausführung der Demonstrator Sensorbox. Die obere Schwimmsplatte, das Gehäuse und periphere Komponenten sind zur besseren Visualisierung in der Ansicht ausgeblendet.

Die Servoantriebe des Kranschienensystems der Regionalstruktur werden über die Signale der Sensorbox und eine Regelung gesteuert. Die Einstellung des Reglers mit dem Ziel der natürlich wirkenden Handhabung sowie die Implementierung von Zusatz- bzw. Sicherheitsfunktionen wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

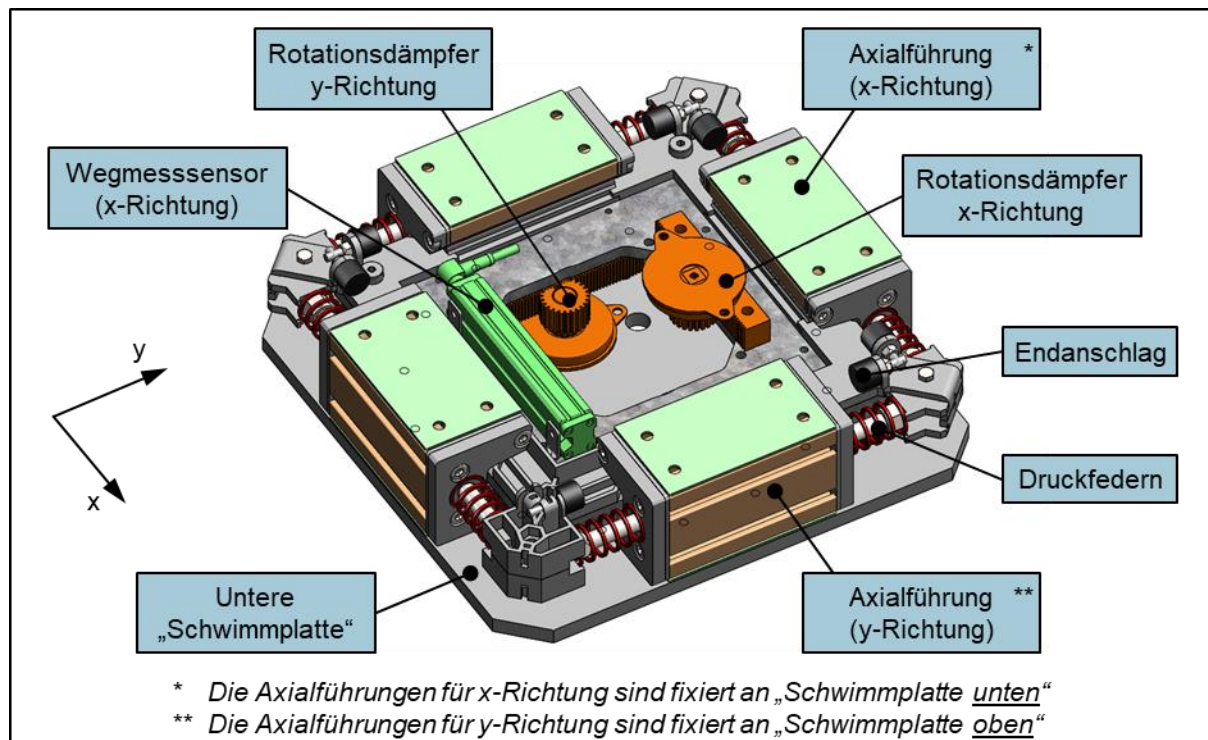


Bild 4.4: Aufbau EEPOS Prototyp Sensorbox mit Feder-Dämpfer-System (Eigene Darstellung; Bildquelle: EEPOS)

Setup EEPOS Prototype Sensorbox with spring-damping system

4.3.2 Elektronischer Vertikalbalancer

Electronic vertical balancer

Das vertikale Heben und Senken der Last in z-Richtung wird im Rahmen des Konzepts unter Einsatz einer Balancertechnologie realisiert. Der Balancer ist dabei in der Hubachse der passiven Kinematik der Regionalstruktur integriert.

Um das System möglichst flexibel und universell zu gestalten und um die direkte Handhabung und Bedienung an der Last zu ermöglichen, wird entsprechend den in Kapitel 2.4 (vgl. **Bild 2.17**, S. 26) beschriebenen Balancer Steuerungen ein Balancer mit der Steuerung vom Typ D ausgewählt. Die Steuerung vom Typ D beinhaltet eine automatische Lasterkennung sowie eine Speicherfunktion, sodass die Last nach der Erkennung nicht nur über den dedizierten Bediengriff gehoben und gesenkt werden kann, sondern auch mit der Hand direkt an der Last.

Der Antrieb wird entsprechend den Definitionen und dem Verständnis für IAD in Kapitel 2.5 (Definition IAD, vgl. **Bild 4.1**) servomotorisch umgesetzt.

Damit für den modularen Aufbau des Systems möglichst viele existierende Komponenten verwendet werden können, wird ein am Markt verfügbares Balancer System ausgewählt.

Eine im Zuge dieser Arbeit durchgeführte Marktrecherche ergab, dass die am Markt verfügbaren servomotorisch angetriebenen und elektronisch geregelten Balancer-

Hubwerke zur Kraftübertragung überwiegend ein Seil nutzen. Ein elektronischer Seilbalancer lässt sich einfach in eine Hubachse integrieren und ermöglicht eine millimetergenaue Hubbewegung. Elektronisch gesteuerte und servomotorisch angetriebene Seilbalancer gibt es von verschiedenen Anbietern wie bspw. ZASCHE HANDLING, MOVOMECH, IHS HANDLING, INDEVA, BINAR oder GORBEL. Die technischen Leistungsmerkmale, wie maximale Traglast oder minimale und maximale Hubgeschwindigkeit sind vergleichbar und unterscheiden sich nur unwesentlich. Bedeutender ist zumeist die Ausführung der Balancer Steuerung in Kombination mit dem Design des Bedienelements (z.B. Tastersteuerung, Schiebegriff oder Kraftsensor Bediengriff). Da bei allen elektronischen Seilbalancern die Hubbewegung der Last standardmäßig über das Bedienelement gesteuert wird, ist das Hauptkriterien für die Auswahl eines geeigneten Seilbalancers für das modulare IAD die Funktion der automatischen Lasterkennung bzw. die Lastspeicherfunktion in Verbindung mit den modularen Integrationsmöglichkeiten des Bedienelements.

Grundlegend arbeitet die Lastspeicherfunktion eines Seilbalancers nach dem folgenden Schema:

1. Der Bediener steuert manuell über den Bediengriff das Anheben der Last bis diese in der Schwebelage ist.
2. Sobald die Last in der Schwebelage und frei von äußeren Krafteinwirkungen ist, erfolgt ein Wiegevorgang. Der Wiegevorgang wird je nach System manuell oder automatisch aktiviert. Das Gewicht der Last wird in der Steuerung gespeichert.
3. Das eingespeicherte Gewicht definiert den Schwebelagezustand der Last. Der Bediener kann nun direkt an der Last manipulieren. Wird die Last vom Bediener angehoben, erkennt der Balancer ein leichteres Gewicht und unterstützt den Hebevorgang, bis die Last wieder in der Schwebelage ist. Umgekehrt erfolgt der Senkuvorgang.

Hervorzuheben ist hierbei, dass bei einigen Seilbalancern mit Lastspeicherfunktion beim Absetzen der Last sowie bei Fügevorgängen ein unerwünschter sog. „Flummy-Effekt“ entstehen kann. Dabei wird die Last, sobald sie abgesetzt wird, sofort wieder angehoben. Versucht der Bediener die Last wieder „herunterzudrücken“, folgt eine Auf- und Abwärtsbewegung, die der eines Hüpfballs ähnelt und in der Praxis als „Flummy-Effekt“ bezeichnet wird. Grund dafür ist die Lastspeicherfunktion, die beim Absetzen ein geringeres Gewicht erkennt und somit die Last entsprechend der Steuerung wieder anhebt.

Wie bereits oben erwähnt, ergab die Marktrecherche, dass die meisten technischen Merkmale wie Traglast, vertikale Verfahrgeschwindigkeit sowie Größe und Gewicht der Antriebseinheit bei vielen Anbietern und Herstellern sehr ähnlich ausfallen. Aus diesem Grund wurde bei der Auswahl eines geeigneten Seilbalancers für das neuartige IAD Konzept primär auf die Ausprägung der Lastspeicherfunktion und auf die modularen Integrationsmöglichkeiten der Bedieneinheit geachtet.

Im Rahmen der Arbeit kamen zwei Systeme in die engere Auswahl und wurden praktisch getestet und verglichen.

Das erste System ist das BINAR Quick-Lift-System. Es wurde im Rahmen der Arbeit als Teil des BINAR Quick-Lift-Driven-Systems getestet (vgl. Kap. 2.5.4, **Tabelle 2.1**: Übersicht IAD Beispiele, Bsp. 9). Das System besitzt eine sog. „Autobalance-Funktion“. Nach dem manuell über den Bediengriff gesteuerten Anheben der Last erfolgt bei aktivierter Autobalance-Funktion ein automatischer Gewichtsausgleich ca. eine halbe Sekunde nach Nichtbetätigen bzw. Loslassen des Bediengriffs. Die schwebende Last wird in diesem Zeitraum gewogen und gespeichert. Die Autobalance Funktion ist somit ohne Drücken einer Taste einsetzbar. Im Anschluss kann der Bediener direkt an der Last handhaben und diese heben und senken. Im Autobalance Modus ist auch das Absetzen der Last möglich. Die Ablageerkennung des BINAR-Systems erfolgt durch die Messung der negativen Beschleunigung und kann nicht deaktiviert werden. Ein im Rahmen der Arbeit durchgeführter Praxistest ergab, dass sich die Autobalance-Funktion nur für das Ablegen eines Bauteils auf einer möglichst ebenen Oberfläche eignet. Bei Montage- oder Fügeaufgaben (z.B. das horizontale Aufstecken eines Bauteils auf einen Zapfen mit geringen Toleranzen) sackt das Bauteil teilweise ab und das Gerät stoppt. Eine weitere Hub- oder Senkbewegung muss wieder über den Bediengriff gesteuert werden. Dies hat sich im Test für Montage- bzw. Fügeaufgaben als nur bedingt einsetzbar erwiesen. In diesen Prozesssituationen sollte die Bedienung direkt am Bediengriff erfolgen. Wie in **Bild 4.5** dargestellt, kann der Bediengriff durch Einsatz einer separaten Steuereinheit mit integrierter Wiegezone extern ausgelagert werden.

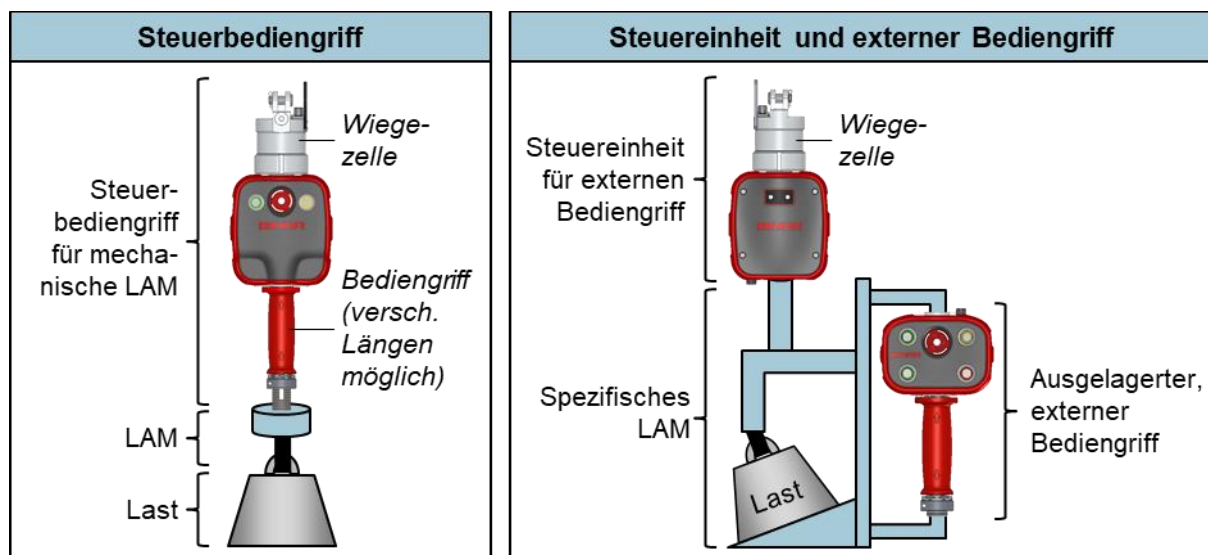


Bild 4.5: Integrationsmöglichkeiten Kraftsensor Bediengriff BINAR Quicklift (Eigene Darstellung nach [BINA19b]; [BINA20a]; [BINA20b]; Bildquelle: BINAR)

Integration possibilities force sensor operating handle BINAR Quicklift

Die Steuerung der Hub- und Senkbewegung erfolgt immer über den rohrförmigen und vertikal angeordneten Bediengriff. Der Griff basiert auf einer Kraftsensorik und wird in

verschiedenen Längen angeboten. Zusätzliche Tasten ermöglichen das Ein-/Aus- und Umschalten diverser Funktionen.

Das zweite System in der Auswahl für das Konzept ist der GORBEL G-Force iQ Seilbalancer. Auch dieses System besitzt eine Lastspeicherfunktion. Sie wird nach dem manuell über den Bediengriff gesteuerten Anheben der Last durch Betätigen einer speziellen Taste vom Bediener aktiviert. Der Wiegeprozess hat eine Dauer von knapp einer halben Sekunde, währenddessen Schwingungen und Messungenauigkeiten kompensiert werden. Im Anschluss startet der sog. „Float-Modus“ in dem der Bediener das Handhabungsobjekt durch direkte Steuerung an der Last heben und senken kann. Auch die Lastspeicherfunktion des G-Force iQ Seilbalancers besitzt eine Lastabsetzerkennung, die den o.g. „Flummy-Effekt“ verhindert. Im Vergleich mit dem BINAR-System arbeitet die G-Force Lastabsetzfunktion jedoch geringfügig robuster und schaltet nicht so häufig ab. Damit lässt sie sich eher für Fügevorgänge mit schweren Lasten einsetzen. Trotz des marginalen Unterschieds ist sie jedoch auch für einen robusten Praxiseinsatz ungeeignet. Auch hier sollte beim Fügeprozess direkt mit dem Bedienelement gesteuert werden.

Ein wesentlicher Unterschied des GORBEL-Systems ist jedoch die modulare Ausführung des Bedienelements mit verschiedenen Auswahlmöglichkeiten. Neben einer klassischen und einfachen Tastersteuerung sowie einem vertikalen Einhand-Schiebegriff für das Heben und Senken wird auch ein Bedienelement basierend auf einer Kraftsensorik angeboten. Letzteres ist vergleichbar mit dem Bedienelement des BINAR-Systems. Allerdings bietet GORBEL auch die in **Bild 4.6** dargestellte Kraftsensor Bedieneinheit „Hub“ an.

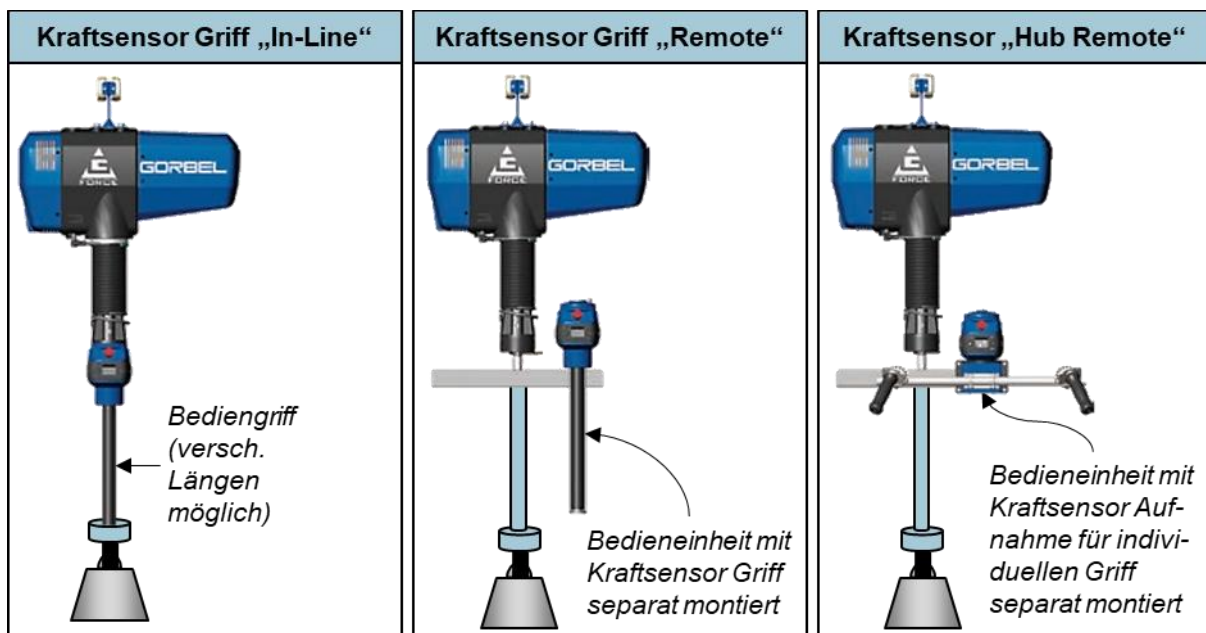


Bild 4.6: Integrationsmöglichkeiten Kraftsensor Bediengriff GORBEL G-Force iQ (Eigene Darstellung nach [GORB20, S. 8]; Bildquelle: GORBEL)

Integration possibilities force sensor operating handle GORBEL G-Force iQ

Diese Variante der Bedieneinheit besitzt eine Aufnahme für Anwendungsspezifische und individuell gefertigte Bedienelemente wie Griffstangen oder Lenker. Die Bedieneinheit inkl. Aufnahme kann flexibel an beliebiger Stelle montiert werden. Weiterhin können an der Aufnahme entsprechend den Prozessanforderungen ergonomisch optimierte Bediengriffe für die Steuerung der Auf- und Abbewegung installiert werden. Die flexible Anordnung und die wandlungsfähigen Gestaltungsmöglichkeiten der Bedieneinheit führen letztendlich zur Auswahl des GORBEL G-Force iQ Seilbalancers als Antrieb und Sensorik für das Modul Vertikalbalancer im Rahmen des entwickelten modularen IAD Konzepts dieser Arbeit.

Der Verfasser weist jedoch darauf hin, dass basierend auf dem modularen Ansatz und entsprechend der jeweiligen Prozessanforderungen auch andere elektronische Seilbalancer eingesetzt werden können.

4.4 Modul Orientier-Kinematik und Lastaufnahme

Module orientation-kinematic and load attachment

Das neuartige IAD wird im Rahmen der Arbeit zuerst anhand des existierenden exemplarischen Lastaufnahmemittels der ATS-Box (vgl. **Bild 3.20**) validiert. Es repräsentiert die typische Konfiguration existierender Lastaufnahmemittel. Gleichzeitig wird anhand des Beispiels die Verwendung bestehender Lastaufnahmemittel und ihrer Eigenschaften in Kombination mit dem neuartigen IAD getestet, untersucht und validiert.

Im Anschluss wird eine neuartige Lastaufnahmeeinrichtung mit Orientierkinematik beispielhaft entworfen, aufgebaut und getestet. Das Konzept der Arbeit sieht vor, dass hierzu Ansätze der Low-Cost-Automatisierung (LCA) verfolgt werden.

Im nachfolgenden Kapitel werden daher zuerst die generellen Anforderungen an Lastaufnahmeeinrichtungen sowie die Hintergründe des LCA-Ansatzes erläutert. Im Weiteren wird als Teil des Konzepts dieser Arbeit eine standardisierte methodische Vorgehensweise zum Entwerfen von Lastaufnahmemitteln bereitgestellt, die sich an den Methoden der Produktentwicklung orientiert. Als abschließenden Teil wird die damit ausgearbeitete allgemeine Funktionsstruktur präsentiert.

4.4.1 Anforderungen an Lastaufnahmeeinrichtung und Low-Cost-Ansatz

Requirements for load-bearing equipment and low-cost-approach

Lastaufnahmeeinrichtungen lassen sich nach DIN 15003 in drei Kategorien unterteilen, die in **Bild 4.7** dargestellt sind (s. [DIN 15003]).

Wie bereits in Kapitel 3 (Analyse und Anforderungen) beschrieben, werden speziell für flexibel eingesetzte Handhabungsgeräte in der Lkw-Montage oftmals Hebezeuge mit einfachen Lastaufnahmeeinrichtungen wie Anschlagmitteln genutzt. Die Vorteile von Anschlagmitteln wie Ketten oder Gurten sind die Robustheit, die flexiblen

Einsatzmöglichkeiten, die geringen Kosten und die standardisierten Bezugsmöglichkeiten. Neben den Anschlagmitteln sind aber auch die prozessspezifisch designten Lastaufnahmemittel (LAM) häufig mit Anschlagmitteln wie z.B. Ketten ausgerüstet und kombiniert. Als Beispiel dient hier das Lastaufnahmemittel für die ATS-Box Handhabung. Es besteht aus einer Traverse mit Ketten und Haken (dargestellt in Kap. 3.4.2, **Bild 3.20**, S. 70).

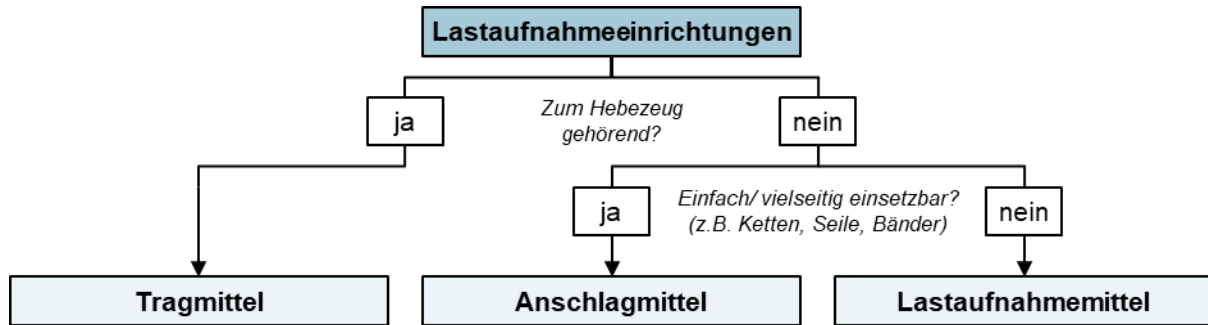


Bild 4.7: Unterschiedliche Arten von Lastaufnahmeeinrichtungen (Eigene Darstellung nach [DIN 15003, S. 1–3])

Different types of load-bearing equipment

Vorteilhaft ist der einfache mechanische Aufbau solcher Lastaufnahmemittel, der zu niedrigen Beschaffungs- und Servicekosten führt. Gleichzeitig bieten die Lastaufnahmemittel durch die Integration von Anschlagmitteln eine vielseitige Anwendbarkeit z.B. bei unterschiedlichen Varianten des Handhabungsobjekts oder beim Ausgleichen und Überwinden von Handhabungs- und Bewegungstoleranzen. Wie bereits ausgeführt sind die Nachteile vor allem in der Ergonomie zu finden. Damit einher geht zum Teil die mangelnde Kontrolle des Bedieners vor allem bei der Durchführung kleiner Orientierbewegungen der Last. Das kann zu einer geringeren Prozessrobustheit und –stabilität führen.

Basierend auf den Erkenntnissen und Anforderungen sollen im Rahmen dieser Arbeit die Vorteile der existierenden und großflächig in Anwendung befindlichen passiven Lastaufnahmemittel auf das neuartige IAD Konzept übertragen werden. Gleichzeitig soll eine Kinematik als Regionalstruktur für ergonomisch optimierte Rotationsbewegungen zur Änderung der Orientierung des Handhabungsobjekts durch den Bediener integriert werden.

Das Lastaufnahmemittel, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wird, muss wie jedes LAM entsprechend der Norm [DIN EN 14238, S. 14] folgende allgemeine, grundlegende und vor allem sicherheitstechnische Anforderungen erfüllen:

- Das LAM muss die Last unter Betriebsbedingungen sicher transportieren können.
- Es muss die erforderlichen Haltekräfte während des gesamten Handhabungsablaufs sicher übertragen können. Zu berücksichtigen sind dabei insbesondere auch Kräfte, die durch Beschleunigung auftreten können.

- Das LAM muss mit dem Rest des Manipulators bzw. der IAD kompatibel sein und ein unbeabsichtigtes Lösen der Verbindung zwischen dem auswechselbaren LAM und dem Manipulator muss verhindert werden.
- Sind im LAM bewegliche bzw. verstellbare Bauteile integriert, müssen sie mit Endanschlüssen gegen unbeabsichtigtes Lösen oder Herunterfallen der Last gesichert werden.

Basierend auf den o.g. grundlegenden Anforderungen werden in dieser Arbeit drei Handhabungsszenarien unterschieden. In jedem Szenario wird ein anderer Typ von Handhabungsobjekten vom Lastaufnahmemittel gehandhabt. **Bild 4.8** zeigt die im Rahmen des Konzepts betrachteten Handhabungsobjekte.

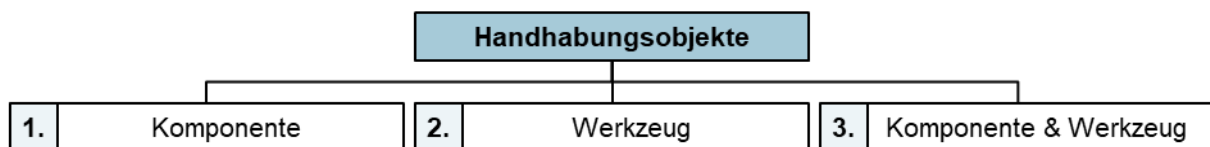


Bild 4.8: Handhabungsobjekte für IAD Konzept

Handling objects for IAD concept

Die Aufgabe eines IAD kann somit die Handhabung folgender Objekte beinhalten:

1. Nur die Handhabung einer **Komponente** (z.B. Frontmodul) in verschiedenen Subvarianten mit bspw. geringfügigen Unterschieden bei der Position der Lastaufnahmepunkte, dem Gewicht oder der äußeren Gestalt bzw. den Abmessungen. Hierbei kommen in der Regel biegeschlaffe Elemente als Anschlagmittel im Lastaufnahmemittel zum Einsatz
2. Nur die Handhabung eines **Werkzeugs** (z.B. Elektronisch gesteuerte Mehrfach- bzw. Spindelschrauber oder Schweißzangen). Hier kommen in der Regel Gelenke bzw. Kinematiken als Lastaufnahmemittel zum Einsatz. Das Werkzeug als definierte und gleichbleibende Last ist in den meisten Fällen fest mit dem Lastaufnahmemittel verbunden, das wiederum definierte Bewegungsmöglichkeiten bietet.
3. Die gleichzeitige Handhabung von **Komponente und Werkzeug** (z.B. ATS-Box & EC-Schrauber). Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus den beiden oben genannten Punkten, in der die Komponente über flexible Anschlagmittel und das Werkzeug gleichzeitig mittels eines Gelenkaufbaus aufgenommen ist.

In allen drei Szenarien sollen bei neuartigen Lastaufnahmemitteln Ansätze der Low-Cost-Automatisierung zum Einsatz kommen. Dazu zählen vor allem die Anwendung einfacher physikalischer Wirkprinzipien, die zum Teil auch unter dem Begriff Karakuri-Prinzip zusammengefasst werden (vgl. [BERT18, S. 273–276]). Diese Ansätze können bei Planung, Konstruktion und Bau neuer Lastaufnahmemittel unterstützen, um sie passiv, einfach und kostengünstig zu gestalten. Durch Anwendung der LCA-Strategie zur Entwicklung von prozessspezifischen Lastaufnahmemitteln soll vor allem die

Flexibilität in der Anwendung und die Höhe der Investmentkosten verbessert werden; vgl. [SHIM97, S. 213]. Die von FUJIMOTO beschriebene Strategie beinhaltet konkrete Ziele, die in dieser Arbeit auf die Entwicklung von Lastaufnahmemitteln übertragen werden [SHIM97, S. 217–218]:

- **Fokus auf die allgemeine Wettbewerbsfähigkeit:**

Als Teil des Gesamtsystems wird der LCA-Ansatz genutzt, um das Design des LAM durch Einsatz von einfachster, zuverlässigster und günstigster Ausrüstung auf ein bestimmtes Niveau der Automatisierung bzw. der Unterstützung zu heben.

- **Optimierung des Gesamtsystems:**

Das LAM wird im Sinne des Gesamtprozesses und somit in Einklang mit bspw. Produktdesign, Prozessablauf, Arbeitsschritten etc. simultan optimiert.

- **Einfache Automatisierung:**

Um die Anschaffungskosten eines LAMs gering zu halten, folgt das Design des LAM dem Ansatz, „gerade genug Funktionen, um den Zielprozess zu erfüllen“.

- **Robuste Gestaltung:**

Eine robuste Konstruktion des LAMs ermöglicht unter anderem einfache Modifikationen durchzuführen. Das beinhaltet die Implementierung von Zusatzfunktionen sowie Änderungen oder Verbesserungen.

- **Eigenfertigung der Automatisierungslösung:**

Der LCA-Ansatz zielt auf In-House Design (und Fertigung) ab, um vor allem unnötige und teure Zusatzfunktionen zu vermeiden. Gleichzeitig bieten In-House entwickelte LAM bessere Möglichkeiten der Optimierung und Instandhaltung durch die Mitarbeiter.

- **Inkrementelle Vorgehensweise:**

Anstatt großflächiger und komplexer Automatisierung stellt die LCA-Strategie die schrittweise Optimierung mit Low-Cost-Ansätzen in den Vordergrund. Einzelne Prozesse werden dabei unabhängig voneinander und nacheinander bearbeitet und können anschließend verknüpft und erweitert werden.

- **Kompatibilität für kontinuierliche Verbesserungen:**

Die LCA-Ansätze müssen mit den Kernelementen des gegebenen Lean Produktionssystems kompatibel sein. Bei einem LAM geht es z.B. neben implementierten Überwachungsfunktionen im Wesentlichen um die organisatorisch zusammenwirkende Gestaltung, Wartung und Verbesserung.

Neben der Hauptaufgabe des Aufnehmens der Last ergänzen die Ziele der Low-Cost-Automatisierung somit das Konzept, indem eine vornehmlich einfache und kostengünstige Funktionalität hinzugefügt wird, die den Bediener unterstützt und es ihm ermöglicht eine ergonomisch einfache Änderung der Orientierung der Last

durchzuführen. Die Wirkprinzipien sollen möglichst ohne externe Energieversorgung auskommen und idealerweise basierend auf dem Zusammenwirken mit der Schwerkraft oder mit Federkräften funktionieren. In Ausnahmefällen können auch einfache, standardisierte Elektronik oder Pneumatikelemente zum Einsatz kommen.

4.4.2 Methodische Vorgehensweise zum Entwerfen von Lastaufnahmemitteln

Systematic approach for design of load attachment devices

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept sieht vor, zukünftige Lastaufnahmemittel für spezifische Anwendungen mit LCA-Mechanismen auszurüsten. Der Prozess des Entwerfens wird durch eine standardisierte Vorgehensweise unter Anwendung strukturierter Lösungsfindungsmethoden unterstützt. Dabei werden Hilfsmittel und Methoden der Produktentwicklung angewendet und zum Teil adaptiert, um ein Betriebsmittel zu entwerfen, das oftmals nur in Stückzahl eins gefertigt wird.

Basierend auf den VDI Richtlinien 2222 Blatt 1 sowie 2221 zum methodischen Entwickeln von Lösungsprinzipien sowie zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme wurde die in **Bild 4.9** dargestellte angepasste und adaptierte Vorgehensweise sowie ausgewählte Methoden im Rahmen des Konzepts angewendet (vgl. [VDI 2222 Blatt 1]; [VDI 2221]).

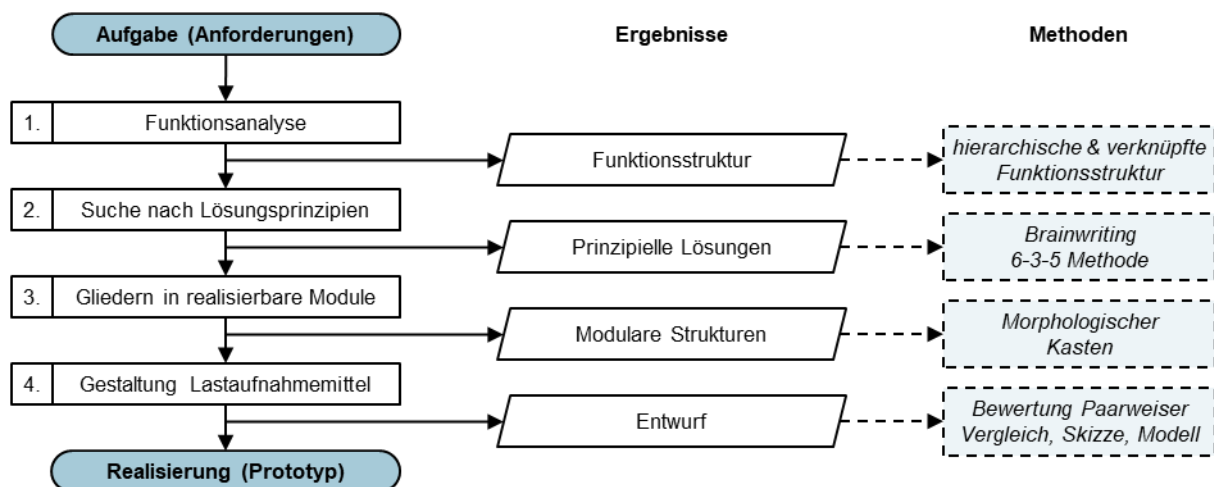


Bild 4.9: Methodische Vorgehensweise zur Entwicklung eines Lastaufnahmemittels; vgl. [VDI 2221, S. 9]

Systematic approach for design of load attachment device

Entsprechend der Vorgehensweise in **Bild 4.9** sieht das Konzept vor, basierend auf den allgemeinen Anforderungen an ein IAD-Lastaufnahmemittel für schwere Lasten im **ersten Schritt** eine Funktionsanalyse durchzuführen. Durch die Funktionsanalyse wird der technische Sachverhalt eines Lastaufnahmemittels abstrahiert in Form einer Funktionsstruktur dargestellt. In der Arbeit wird aufbauend auf einer hierarchischen Funktionsstruktur im weiteren Verlauf mit einer verknüpften Funktionsstruktur gearbeitet. Die Funktionsanalyse sowie die Funktionsstruktur wird im Rahmen der

Arbeit so allgemein wie möglich durchgeführt, um eine möglichst umfangreiche Wiederverwendbarkeit zu ermöglichen. Die hier erarbeitete Funktionsstruktur kann und soll somit auch als Vorlage für zukünftige Entwicklungen dienen.

Im **zweiten Schritt** erfolgt die Suche nach Lösungsprinzipien für jede Teilfunktion der Funktionsstruktur. Mit Hilfe von separat durchgeführten Ideenfindungsprozessen werden prinzipielle Lösungen für alle Teilfunktionen erzeugt. Hierbei wird die Kreativitätstechnik „Brainwriting“ in Form der „**6-3-5 Methode**“ angewendet. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Brainstormings, in der Ideen und Lösungsansätze während einer stillen Phase zu Papier gebracht werden. Im Ablauf bekommt eine möglichst interdisziplinär aufgestellte Gruppe von **sechs** Personen die jeweilige Teilfunktion bzw. das Problem und die Anforderungen und Randbedingungen erläutert. Im Anschluss beginnt die stille Phase, in der die Teilnehmer jeweils **drei** Lösungsansätze auf einem Formblatt skizzieren und stichpunktartig erläutern. Nach **fünf** Minuten werden die Blätter an den Nachbarn weitergereicht. Angeregt von den Vorschlägen des Vorgängers kann dieser die Ideen weiterentwickeln oder neue hinzufügen. Der Umlaufprozess wird insgesamt fünfmal fortgesetzt, bis jeder Teilnehmer alle Formblätter bearbeitet hat [EHRL13, S. 435]. Anschließend erfolgt eine Gruppensitzung zur Clusterbildung, Diskussion und Auswertung der generierten Lösungsvorschläge.

Die somit gesammelten prinzipiellen Lösungen für die Teilfunktionen werden im **dritten Schritt** in ein morphologisches Schemata, den sog. „Morphologischen Kasten“, übertragen. In der tabellarischen Darstellung bildet jede Zeile eine Teilfunktion ab. In den Spalten sind die jeweils dazugehörigen und erarbeiteten Teillösungen skizziert. Aus jeder Funktionszeile kann nun eine Teillösung ausgewählt und mit passenden Teillösungen aus den übrigen Zeilen zu einer neuen Gesamtlösung kombiniert werden; vgl. [EHRL13, S. 455–459].

Auf diese Art und Weise wird im **vierten Schritt** eine reduzierte Zahl von realistischen Gesamtlösungen gestaltet und als Entwurf ausgearbeitet. Die verschiedenen Entwürfe werden anhand technischer Kriterien einer Punktbewertung unterzogen. Jedes Kriterium ist zudem gewichtet. Zur Bestimmung der Gewichtung der Bewertungskriterien wird die Methode des paarweisen Vergleichs eingesetzt (vgl. [EHRL13, S. 535–537]; [ENGE06, S. 55–57]). Der Entwurf mit der besten Bewertung und höchsten Punktzahl wird abschließend final als Skizze ausgearbeitet und in ein Prototypmodell überführt.

4.4.3 Funktionsanalyse und Funktionsstruktur für Lastaufnahmemittel

Function analysis and function structure for load attachment devices

Die Funktionsanalyse wird im Rahmen der Arbeit, wie bereits beschrieben, möglichst allgemein durchgeführt, um einen hohen Grad der Wiederverwendbarkeit zu ermöglichen.

Die Durchführung der Funktionsanalyse orientiert sich dabei an der Richtlinie VDI 2803, [VDI 2803 Blatt 1]. Bei der Analyse werden folgende Punkte in chronologischer Reihenfolge durchgeführt:

1. Definition der funktionellen Randbedingungen
2. Aufstellen der Gesamtfunktion
3. Festlegen von Ein- und Ausgangsgrößen
4. Unterteilung in Teilfunktionen
5. Aufstellen der Funktionsstruktur

Die im **ersten Schritt** durchgeführte **Definition der funktionellen Randbedingungen** zielt nur auf die elementarsten Funktionsanforderungen im Rahmen des modularen IAD-Konzepts ab. Die Konzeption der Funktionsstruktur für das Modul Orientier-Kinematik und Lastaufnahme als Teil des modularen IAD-Konzepts umfasst demnach die nachfolgend aufgelisteten Randbedingungen:

- Die Verbindung zum übergeordneten Modul des IAD ist die Schnittstelle an der Unterseite der Sensorbox.
- An der Schnittstelle muss eine Kraft-/Momentenübertragung möglich sein.
- Die Lastaufnahme erfolgt von oben. Das bedeutet das Lastaufnahmemittel befindet sich über der Last.
- Die Positionierung der Last wird wie im Konzept beschrieben vom Positioniermodul übernommen.
- Die Orientierung der Last, entsprechend der jeweiligen Bewegungsanalyse, erfolgt im Lastaufnahmemittel bzw. durch dessen Orientier-Kinematik.
- Das Lastaufnahmemittel wirkt während der Lastorientierung unterstützend auf den Bediener bzw. ermöglicht eine ergonomisch optimierte Bedienung.
- Es muss eine durchgängige Rotation um die z-Achse und kleine Rotationsmöglichkeiten um die x- und y-Achse ermöglicht werden (vgl. **Tabelle 3.1**).
- Die Änderung der Orientierung der Last soll durch den Bediener durch Manipulation direkt an der Last erfolgen.

Je nach Handhabungsprozess können die Randbedingungen abweichen oder erweitert werden. Entsprechend der Bewegungsanalyse (s. **Tabelle 3.1**) und auch auf

Basis des exemplarischen Handhabungsprozesses der ATS-Box Montage (s. Kap. 3.4.2) können die Randbedingungen als allgemein gültig für eine Vielzahl von Handhabungsprozessen von Großbauteilen angesehen werden.

Im **zweite Schritt** erfolgt das **Aufstellen der Gesamtfunktion**. Auch an dieser Stelle steht die allgemeine Anwendbarkeit des Lastaufnahmemittels im Vordergrund und muss mehrere verschiedene Aufgaben erfüllen. Im Kern stehen jedoch das Aufnehmen bzw. Halten sowie das Orientieren der Last. Diese Funktionen werden im Rahmen des Konzepts von allen Lastaufnahmemitteln umgesetzt. Daraus ergibt sich die Gesamtfunktion „*Last halten und orientieren*“.

Im **dritten Schritt** erfolgt die Festlegung der **Ein- und Ausgangsgrößen**. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um den Zustand der Last bezüglich ihrer Orientierung vor und nach dem Handhabungsvorgang. Der Eingangszustand definiert sich durch größtenteils beliebige Orientierung der Last am Bereitstellungsort. Definiert ist nur, dass die Oberseite der Last nach oben ausgerichtet ist. Im Ausgangszustand liegt dann eine definierte Orientierung der Last vor. Auch hierbei gibt es Unterschiede je nach Konfiguration des Produkts, an dem das Montageobjekt gefügt wird. Die real existierenden Unterschiede zwischen Ein- und Ausgangszustand der Lastorientierung lassen sich z.B. aus **Tabelle 3.1** auf S. 61 entnehmen. Im Rahmen des Konzepts werden explizit keine weiteren Einschränkungen hinsichtlich der Orientierung vorgenommen. Somit sollen möglichst viele universelle Lösungen betrachtet werden können ohne sie vorab auszuschließen.

Nachdem das äußere Gerüst gebildet ist, wird im **vierten Schritt** die Gesamtfunktion in **Teilfunktionen untergliedert**. Dadurch erfolgt eine detailliertere abstrahierte Darstellung und Aufteilung der Gesamtfunktion, die eine Berücksichtigung aller wichtigen Komponenten ermöglicht. Die hierzu interdisziplinär gesammelten Teilfunktionen sind in einem bestimmten Abstraktionsgrad formuliert, der im Bereich zwischen realer und ikonisch, symbolischer Beschreibung liegt. Die Teilfunktionen werden zudem noch in Haupt- und Nebenfunktionen untergliedert und unnötige sowie unerwünschte Teilfunktionen werden eliminiert [VDI 2803 Blatt 1, S. 5].

Basierend auf den oben beschriebenen Vorarbeiten wird letztendlich im **fünften Schritt** die **Funktionsstruktur aufgestellt**. Die Funktionsstruktur wird im Rahmen des Konzepts möglichst allgemein gehalten, um eine gute Wiederverwendbarkeit aufzuweisen. In diesem Zuge werden nachfolgend ein Funktionsbaum (hierarchische Funktionsstruktur) als auch eine verknüpfte Funktionsstruktur als zwei gängige Darstellungsmethoden ausgearbeitet. Im Funktionsbaum werden die Teilfunktionen hierarchisch gegliedert. Die alternative verknüpfte Funktionsstruktur lässt sich gut daraus ableiten. Sie hat den Vorteil, dass die Verbindungen der einzelnen Teilfunktionen zueinander und deren Zusammenwirken ersichtlich werden. Dadurch eignet sie sich gut als Ansatzpunkt für die weitere Lösungssuche.

Nachfolgend werden die im Rahmen des Konzepts dieser Arbeit erstellten allgemeingültigen Funktionsstrukturen dargestellt. **Bild 4.10** zeigt die hierarchische Funktionsstruktur.

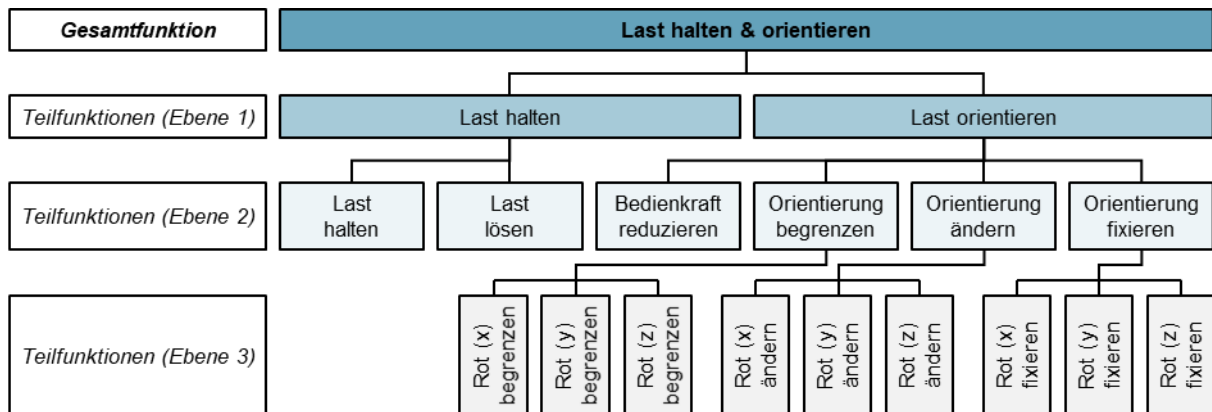


Bild 4.10: Hierarchische Funktionsstruktur – Funktionsbaum

Hierarchical function structure – function tree

Die verknüpfte Funktionsstruktur ist in **Bild 4.11** abgebildet. Hierbei sind die Ein- und Ausgangsgrößen nach Informations-, Energie- und Stofffluss unterteilt.

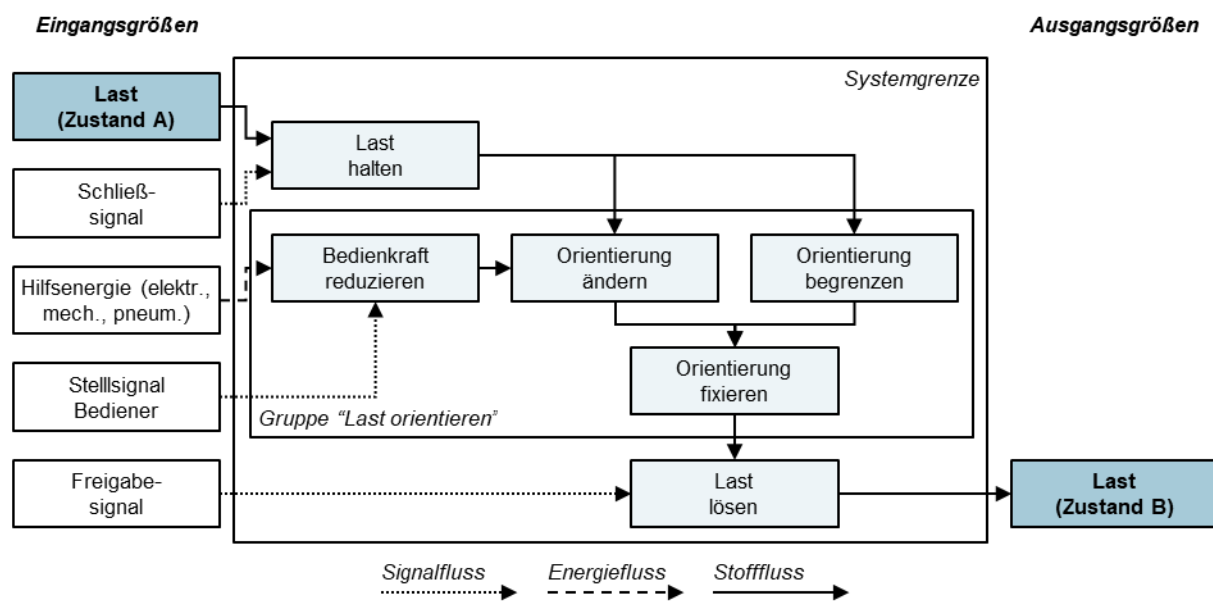


Bild 4.11: Verknüpfte Funktionsstruktur

Linked function structure

Zusammenfassend wird im Rahmen des Konzepts somit eine strukturierte Vorgehensweise, eine abstrakte Funktionsstruktur und Ansätze zur Erleichterung der Orientierbewegungen und der Optimierung der Ergonomie bereitgestellt. Das Modul „Orientier-Kinematik und Lastaufnahme“ ist jedoch immer prozessspezifisch. Zwar lassen die Ergebnisse der Bewegungsanalyse (siehe Kap. 3.4.1, **Tabelle 3.1**, S. 61) auf eine große Ähnlichkeit verschiedener Lastaufnahmemittel und deren Orientierbewegungen folgern, ein universelles Lastaufnahmemittel ist allerdings nicht

realistisch. Aus diesem Grund soll vor allem die angewendete strukturierte Vorgehensweise für die Entwicklung des Lastaufnahmemittels für den Demonstrator dieser Arbeit als Blaupause für zukünftige Entwicklungen dienen. Damit kann die Entwicklungszeit zukünftig reduziert oder neue, bessere Lösungsmöglichkeiten entwickelt werden. Weiterhin können die basierend auf der Funktionsanalyse erarbeiteten und im morphologischen Kasten dargestellten Teillösungen sowie die Gesamtlösungen als Grundlage eines Ideenpools dienen, der für zukünftige Entwicklungen ständig erweitert wird. Damit ist das Modul „Orientier-Kinematik und Lastaufnahme“ in Rahmen des Konzepts dieser Arbeit eine Vorgehensweise und Handlungsempfehlung. Beispielhaft wird im Rahmen der Arbeit ein LAM Prototyp für den Demonstrator entwickelt und aufgebaut. Das daraus resultierende Ergebnis kann als Grundlage eines Lösungskatalogs für Lastaufnahmemittel mit LCA-Mechanismen dienen.

5 Realisierung des modularen IAD-Konzepts

Realization of the modular IAD-concept

Im nachfolgenden Kapitel wird die Realisierung des zuvor erläuterten IAD-Konzepts beschrieben. Zu Anfang wird der Aufbau des basierend auf dem Konzept entwickelten Demonstrators mit seinen einzelnen Modulen beschrieben. Darauf aufbauend folgt entsprechend der Inbetriebnahme des Demonstrators die Parametrierung und Optimierung der Steuerung. Dieser Teil umfasst im Wesentlichen die Kalibrierung der Sensorbox für Horizontalbewegungen sowie die Parametrierung ihres Steuerungs- und Regelungskonzepts mittels statistischer Versuchsplanung. Weiterhin werden die Umsetzung von ergänzenden Zusatz- und Sicherheitsfunktionen betrachtet. Im letzten Abschnitt des Kapitels erfolgt die Validierung des entwickelten Konzepts sowie die Zusammenfassung der Ergebnisse. Wesentliche Themen sind dabei ein Ergonomievergleich, die Möglichkeiten und Einsetzbarkeit der Teilautomatisierbarkeit sowie das basierend auf der zuvor entwickelten Methodik prototypisch aufgebaute LCA-Lastaufnahmemittel. Abschließend erfolgt ein Vergleich mit den eingangs definierten Hauptanforderungen, um die Forschungsergebnisse gegenüber der Zielsetzung einzuordnen.

5.1 Aufbau des Demonstrators

Setup of demonstrator

Zur Realisierung und Validierung des modularen IAD-Konzepts wurde im Rahmen der Arbeit ein Demonstrator aufgebaut. Der Demonstrator entstand in Projektkooperation mit und bei der Firma EEPOS in Wiehl. In diesem Kapitel wird die konkrete technische Umsetzung des Versuchsaufbaus erläutert. Ziel des Demonstratoraufbaus ist die Validierung des modularen IAD-Konzepts.

Der Gesamtaufbau des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und aufgebauten Demonstrators ist in **Bild 5.1** dargestellt.

Entsprechend dem in Kapitel 4.1 beschriebenen IAD-Konzept ist er modular aufgebaut. Der Versuchsaufbau besteht aus einer Positionierkinematik basierend auf einem angetriebenen Kranschienensystem mit teleskopierbarer Kranbrücke und Hubachse, in die ein Seilbalancer integriert ist. Daran angebunden ist die Sensorbox, an der sich wiederum ein experimentelles Lastaufnahmemittel inklusive der Attrappe eines Schraubwerkzeugs zur Handhabung und Montage einer ATS-Box befindetet.

Nachfolgend werden ausgewählte Module sowie die Bedieneinheiten des Demonstrators näher beleuchtet. Im Anschluss wird noch auf die Peripherie des Demonstrators eingegangen. Die zusätzliche experimentelle Versuchsumgebung wird im weiteren Verlauf zur Nachahmung realistischer Handhabungs- und Montageprozesse genutzt und dient der Überprüfung möglicher Prozessverbesserungen durch Einsatz des neuartigen IAD.

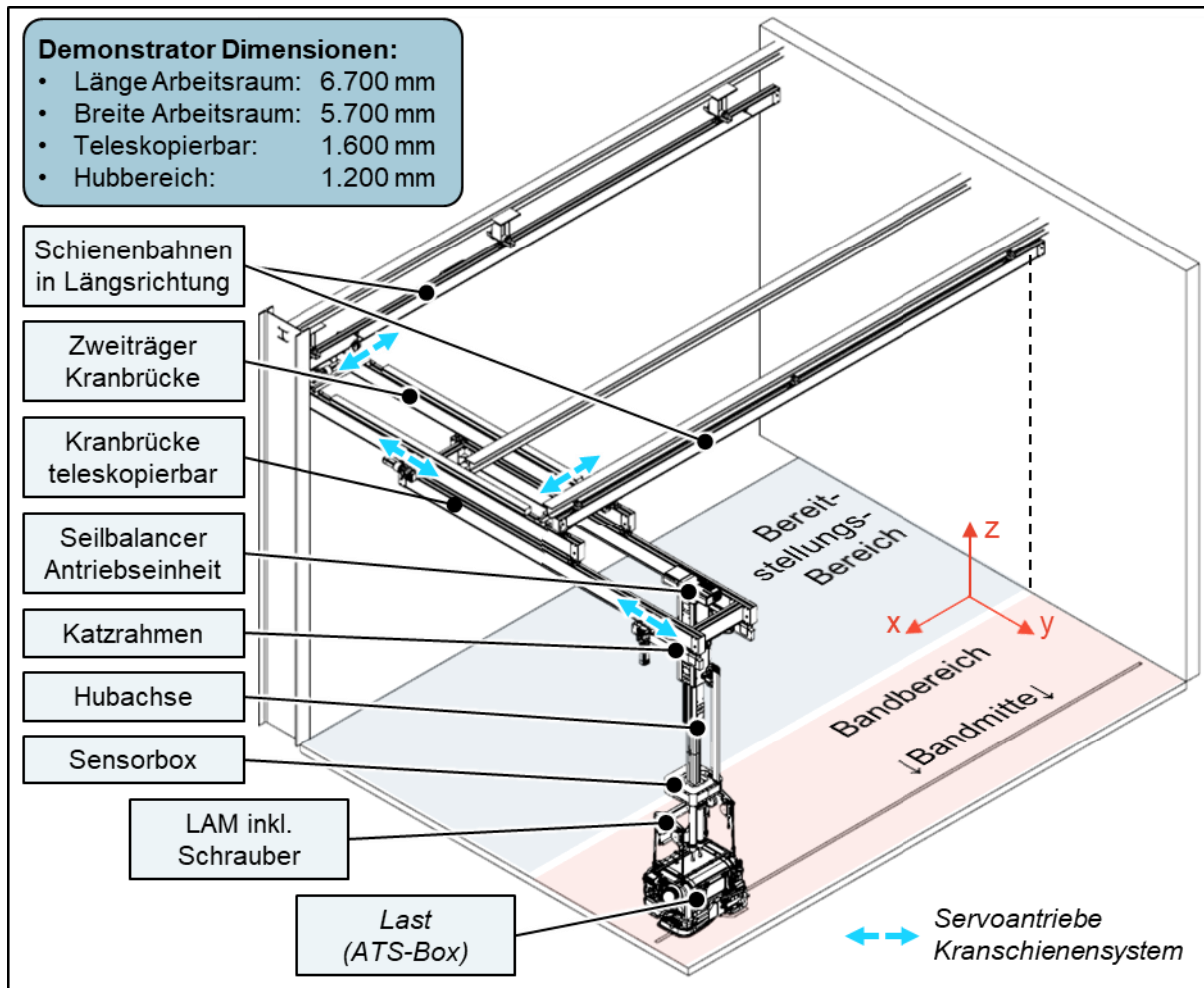


Bild 5.1: Aufbau Demonstrator
Setup Demonstrator

5.1.1 Demonstrator – Modul Positionier Kinematik

Demonstrator – Module Positioning Kinematic

Für die Positionierkinematik wurde ein Aufbau basierend auf dem EEPOS Kranschienensystem realisiert. Hierzu ist an einem Sekundärstahlbau eine Zweischienebahn mit angetriebener Kranbrücke, die als Zweitträgerkrananlage ausgeführt ist, installiert. Für Bahn und Brücke werden die EEPOS Aluminiumschienen in XL Ausführung verwendet. Jede Schiene ist somit für Traglasten bis zu 1200 kg geeignet. Aufgrund möglicher Lasten über 600 kg müssen jedoch zwei Fahrwerke eingesetzt werden, was zur Ausführung der Zweitträgerkrananlage führt.

Eine Besonderheit des Demonstrators ist die teleskopierbare Ausführung der Kranbrücke. Der Demonstrator bildet somit reale Anforderungen aus der Fabrik nach. Dort müssen Lasten oftmals aus dem seitlichen Bereitstellungsbereich in den Bandbereich transportiert werden, ohne dass feste Installationen oberhalb des Bandbereichs möglich sind. Grund dafür sind z.B. weitere Krananlagen aus dem Bereich der Fördertechnik, die taktgebunden in Bandrichtung operieren und eine

entsprechende Kollisionsgefahr darstellen. In der Regel haben sie Vorrang gegenüber den Handhabungsgeräten. Mit Hilfe der Teleskopbrücke kann somit für einen ausgewählten Zeitraum auf bestimmte Flächen zugegriffen werden. Nach Beendigung des Handhabungsvorgangs erfolgt der manuelle oder auch selbstständige Rückzug in eine definierte Position.

Als Hubachse wird eine passive dreigliedrige EEPOS move Hubachse in L Ausführung genutzt. Die drei Teleskopsegmente lassen sich vertikal ineinanderschieben. Die Hubachse besitzt eine maximale Tragfähigkeit von 500 kg und kann z.B. bei außermittiger Lastaufnahme ein maximal zulässiges Biegemoment von 2.500 Nm aufnehmen. Das Hohlkammerprofil ermöglicht die Ausrüstung der passiven Hubachse mit einem Seilbalancer, dessen Seil geschützt im Inneren verlaufen kann. Aufgehängt ist die Hubachse an einem passenden Katzrahmen, der wiederum in den Schienenbahnen der teleskopierbaren Doppelkranbrücke aufgehängt ist.

Die Dimensionen und wesentlichen Maßangaben des Versuchsaufbaus sind in **Bild 5.2** dargestellt.

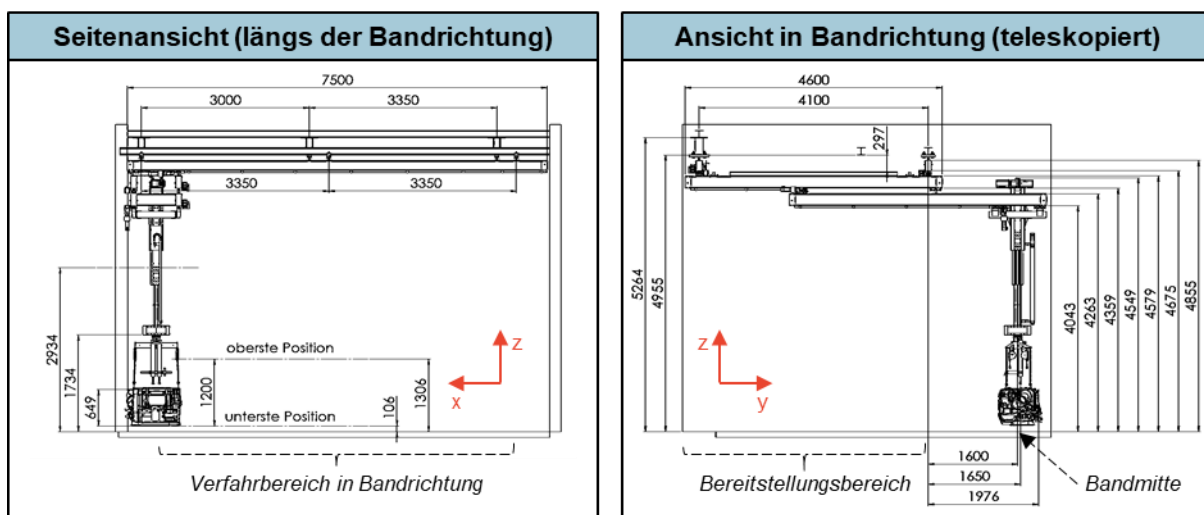


Bild 5.2: Dimensionen Demonstrator
Dimensions Demonstrator

Als Antrieb für die Bewegungen in x- und y-Richtung werden von EEPOS entwickelte adaptierbare Antriebseinheiten eingesetzt. Sie sind jeweils an den beiden Schienenbahnen in x-Richtung sowie an der teleskopierbaren Kranbrücke und dem Katzrahmen in y-Richtung montiert. Wie in **Bild 5.3** dargestellt, handelt es sich bei den Antriebseinheiten um adaptierte Fahrwerk-Trolleys. Der angetriebene Trolley besitzt einen Servomotor, der seine Kraft über eine Kupplung und ein Getriebe an eine Reibrolle überträgt, die wiederum an der Schienenbahn anliegt.

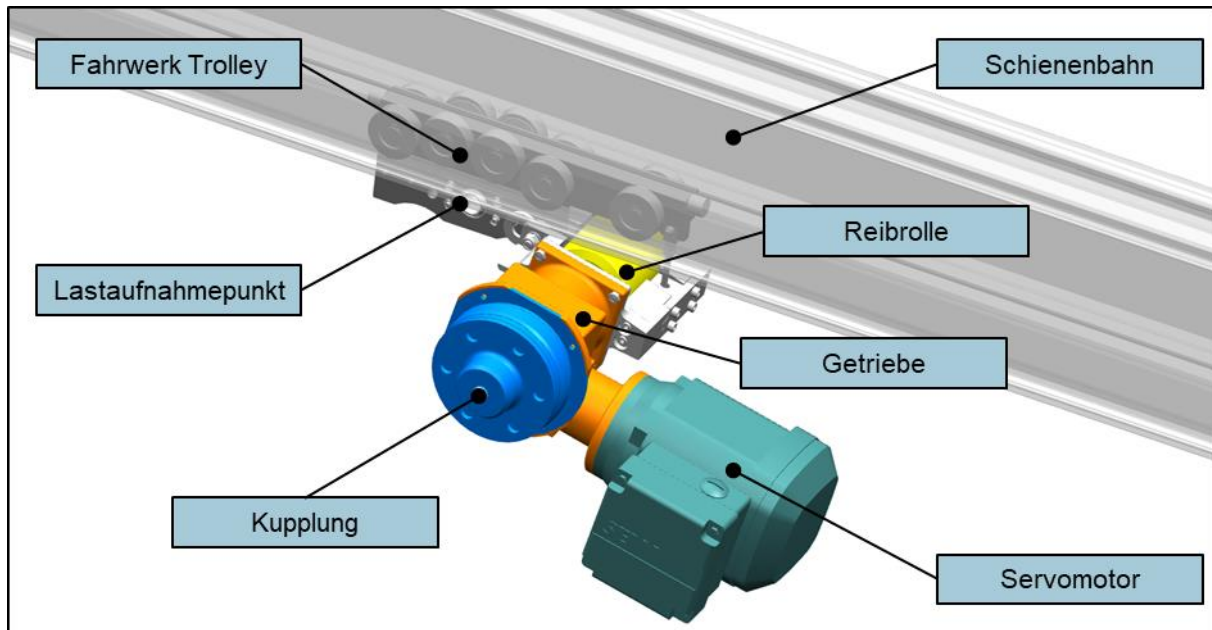


Bild 5.3: Servomotorisch angetriebener Fahrwerk-Trolley für Kranschienensystem (Eigene Darstellung; Bildquelle: EEPOS)

Servo driven trolley for crane rail system

5.1.2 Demonstrator – Modul Sensorik

Demonstrator – Module Sensors

Die Sensorbox als elementares Modul, deren Integration ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit darstellt, ist entsprechend dem in Kapitel 4.3.1 ausgeführten Konzept aufgebaut. Die Details können **Bild 4.4** entnommen werden. **Bild 5.4** zeigt eine Fotoaufnahme der Sensorbox des Demonstrators. Die Sensorbox ist am unteren Segment der Hubachse angebracht. An ihr befestigt sind der Not-Halt- und Quittier-Knopf sowie eine Statusanzeige für die mit der Sensorbox verknüpfte Steuerung und Antriebe in der Positionierkinematik.

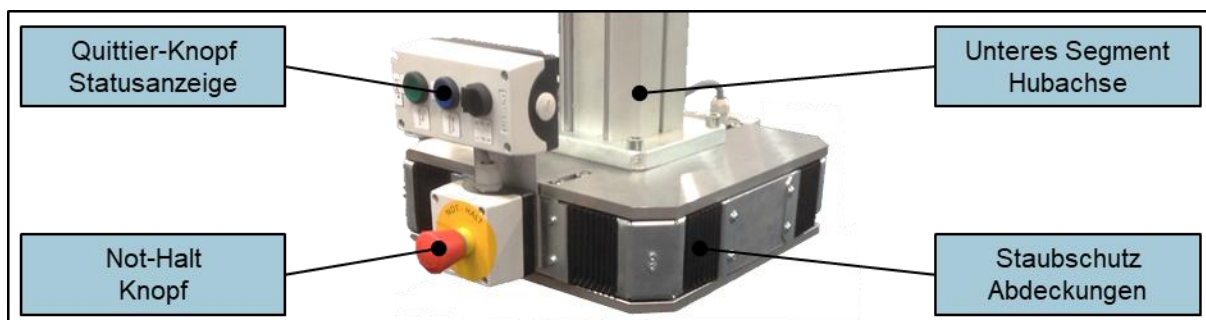


Bild 5.4: Sensorbox Demonstrator

Sensorbox Demonstrator

Die Integration der Sensorik des Vertikalbalancers wird in Kapitel 5.1.4 (Demonstrator – Vertikalbalancer und Bediengriff) beschrieben.

5.1.3 Demonstrator – Modul Orientier-Kinematik und Lastaufnahmemittel

Demonstrator – Module Orientate kinematic and load attachment device

Zur Nachbildung des exemplarischen Montageprozesses der ATS-Box Montage wurde im Demonstrator ein Lastaufnahmemittel ähnlich der Realanwendung umgesetzt. Der Aufbau des Demonstrator-Lastaufnahmemittels ist in **Bild 5.5** dargestellt.

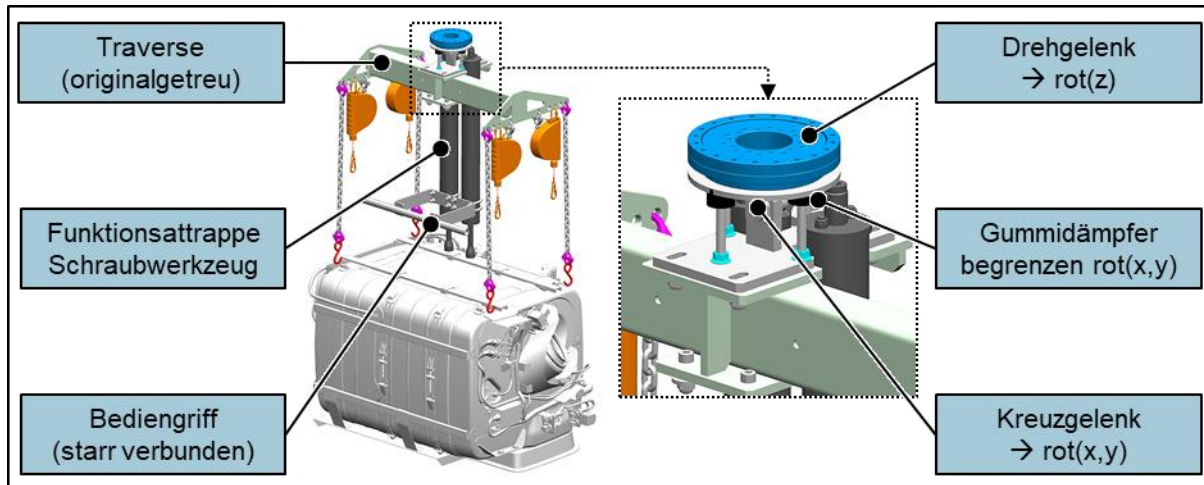


Bild 5.5: Lastaufnahmemittel Demonstrator

Load attachment device demonstrator

Es orientiert sich stark an dem Original Lastaufnahmemittel, das bereits in **Bild 3.20** erläutert wurde und verwendet die gleiche Traverse inkl. Ketten, Haken und Rückhol-Federbalancer. Als Werkzeug zur Simulation der Schraubprozesse ist eine Funktionsattrappe eines EC-Schraubers in das Lastaufnahmemittel integriert. Wie bei einem realen Schrauber lassen sich bei der Attrappe die Steckschlüsselaufsätze um ihre Längsachse drehen und sind axial federnd gelagert. Der Schrauber selbst ist starr mit der Traverse verbunden und dient gleichzeitig als Aufnahmepunkt für einen starr angebrachten Bediengriff in Form eines Lenkergriffs. Der wesentliche Unterschied zum originalen Lastaufnahmemittel ist die Aufhängung der Traverse an der Sensorbox mit einer Gelenkkombination (siehe rechte Seite in **Bild 5.5**). Die Traverse ist mit der Sensorbox über ein endlos drehbares Drehlager in Vertikalrichtung und einem Kreuzgelenk mit eingeschränkten Bewegungsmöglichkeiten um die beiden Horizontalachsen verbunden. Durch den Einsatz von vier einstellbaren Gummipuffern werden nur minimale Drehbewegungen um die x- und y-Achse zugelassen. Gleichzeitig dient die durch die Gummielemente hervorgerufene Dämpfung auch der Kraftübertragung, um die Sensorbox durch manuelle Krafteinwirkung auf das Lastaufnahmemittel und die Last bewegen zu können.

5.1.4 Demonstrator – Vertikalbalancer und Bediengriff

Demonstrator – Vertical Balancer and Operating Handle

Wie bereits in der Konzeptbeschreibung in Kapitel 4.3.2 beschrieben, wird zur Integration einer Vertikalbalancer Technologie in den Demonstrator der GORBEL G-Force iQ Seilbalancer mit einer Traglast von 300 kg eingesetzt. Die Antriebseinheit mit Servomotor und Seilwinde ist an der Oberseite der Hubachse im Katzrahmen integriert. Das Seil verläuft geschützt in der Hubachse und ist am unteren Ende des kleinsten Segments befestigt. Die beiden weiteren Komponenten des Seilbalancers sind die Wiegezone und die externe Bedieneinheit, die jeweils per Kabel mit der Antriebseinheit verbunden sind. Die Integration der beiden Komponenten in den Demonstrator ist in **Bild 5.6** dargestellt.

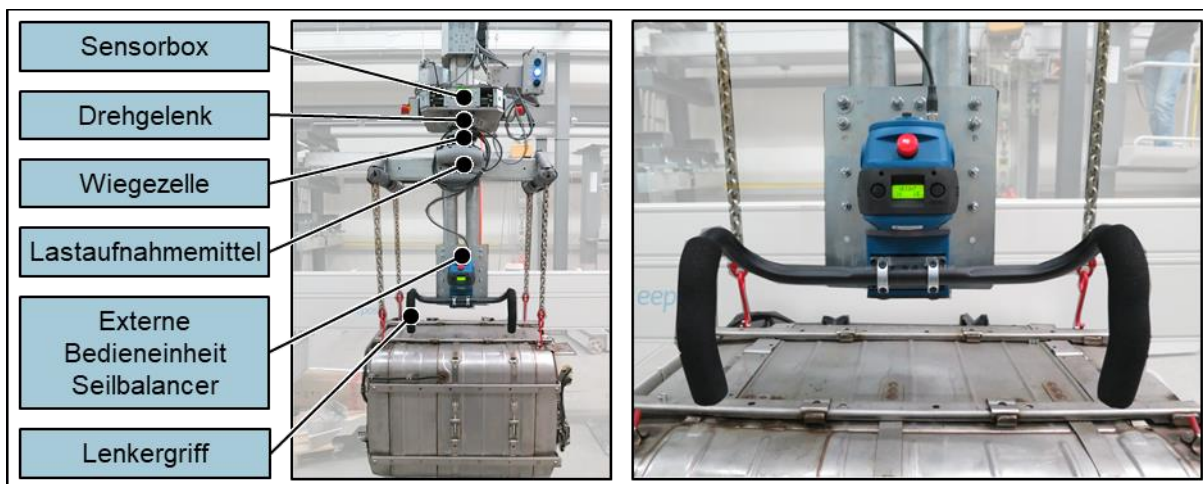


Bild 5.6: Integration Seilbalancer Sensorik und Bedieneinheit

Integration rope balancer sensors and operating unit

Die Wiegezone wurde im Versuchsaufbau unterhalb des Drehgelenks, das sich an der Sensorbox befindet, angebracht. Durch diese Anordnung lässt sich die Kabelführung mittels einer Drehdurchführung realisieren. Zudem befindet sich so unterhalb der Wiegezone die jeweils zu handhabende Last, an der manipuliert werden soll und deren Gewicht bei Bedarf (z.B. für den Float-Modus) gemessen werden kann.

Als externe Bedieneinheit wurde die Variante „Hub Remote“ gewählt (siehe **Bild 5.6**, rechte Seite), an die ein individueller Bediengriff montiert werden kann. Die Bedieneinheit ist ergonomisch gut erreichbar am Lastaufnahmemittel angebracht und mit einem Lenkergriff ausgestattet. Der Lenkergriff ist direkt mit dem Kraftsensor der Bedieneinheit verbunden. Vertikale Bedienkräfte werden somit direkt erfasst, verarbeitet und in vertikale Hub- und Senkbewegungen umgesetzt, deren Geschwindigkeit lastabhängig stufenlos zwischen 0,3 und 61 m/min gesteuert werden kann (im Float-Modus zwischen 11 und 31 m/min) [EMOT14, S. 1–4]. An der Bedieneinheit befindet sich noch ein Not-Halt Taster sowie zwei Bedienknöpfe, über die Balancereinstellungen vorgenommen werden können oder der Float-Modus aktiviert werden kann. Über das Display werden Betriebsinformationen wie z.B. das

aktuell aufgenommene Gewicht angezeigt und es visualisiert die Menüführung im Einrichtbetrieb.

Der elektronische Seilbalancer verfügt über eine Vielzahl an Einstellmöglichkeiten. Es können unter anderem folgende elektronisch geregelte Anpassungen vorgenommen werden [EMOT14, S. 1–4]:

- Lastbegrenzung (maximale Hublast)
- Minimale und maximale Hubhöhe
- Geschwindigkeitsreduzierung Hub- und Senkbewegung ab bestimmten Hubhöhen
- Maximale Hubgeschwindigkeit
- Sensitivität für Beschleunigung der Hubgeschwindigkeit

Die Einstellungen ermöglichen die Anpassung des Seilbalancer-Systems an spezifische Prozessbedingungen und können den Bediener bei sich wiederholenden Handhabungsprozessen unterstützen sowie für erhöhte Sicherheit sorgen.

5.1.5 Demonstrator – Experimentalumgebung

Demonstrator – Experimental environment

Zur realistischen Durchführung von Handhabungs- und Montageversuchen mit dem Demonstrator wurden die realen Umgebungsbedingungen des exemplarischen Prozesses der ATS-Box Montage nachgebildet. Der Demonstrator umfasst daher eine experimentelle Förderanlage zur Simulation des realen Montagebands. Der Aufbau der Förderanlage ist in **Bild 5.7** dargestellt und fördert ein originalgetreues Lkw-Rahmensegment mit entsprechenden Haltern für die ATS-Box.

Das Lkw-Rahmensegment ist an einem Fahrwagen befestigt. Durch Anpassung der beiden Stützen an den Enden der Schienenbahnen lässt sich die Höhe des Rahmensegments entsprechend den verschiedenen Rahmenhöhen am Montageband anpassen. Das Rahmensegment selbst ist so am Fahrwagen befestigt, dass sich die Neigung einfach und schnell entsprechend den Bedingungen in der Realität einstellen lässt. Zuletzt bietet der servomotorische Antrieb des Fahrwagens die Möglichkeit der genauen Einstellung der konstanten Fördergeschwindigkeit. Die einstellbaren Faktoren orientieren sich am realen Anwendungsfall der ATS-Box Montage (vgl. **Bild 3.21**).

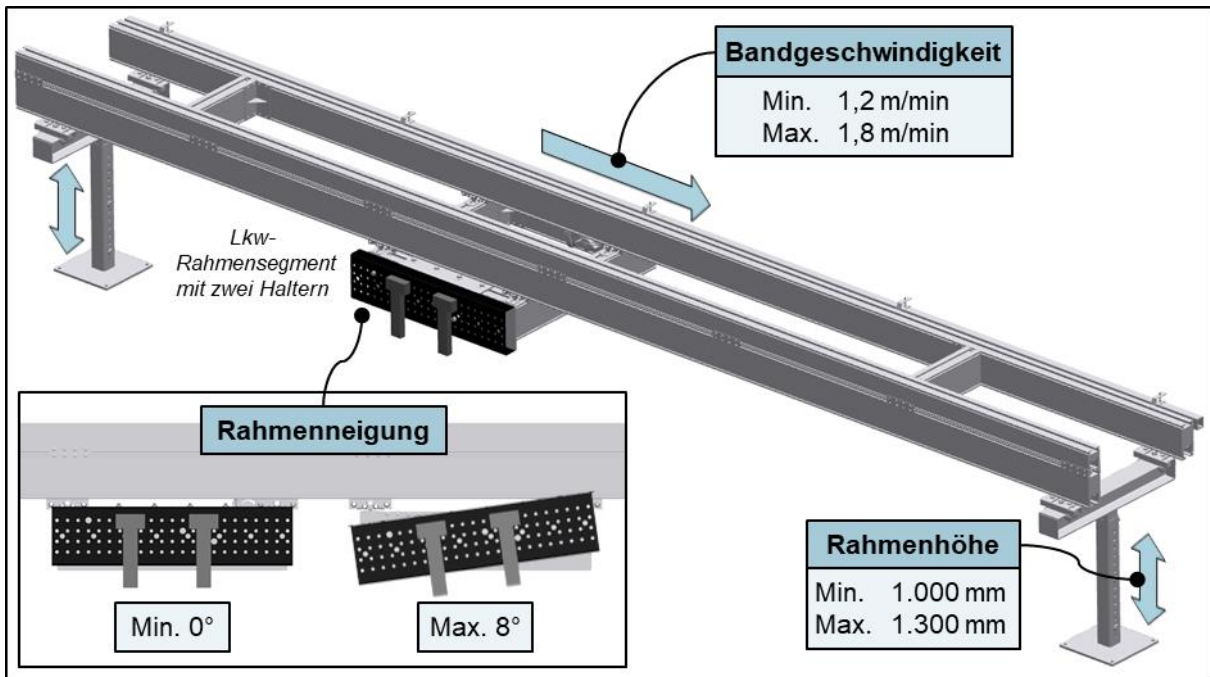


Bild 5.7: Experimentelle Versuchsumgebung
Experimental test environment

5.2 Parametrierung und Optimierung der Steuerung

Parameterization and optimization of controls

Nachdem in Kapitel 5.1 der konstruktive Aufbau des Demonstrators beschrieben wurde, befasst sich dieses Kapitel mit der Parametrierung und Inbetriebnahme der integrierten Sensorbox in Verbindung mit der Steuerung der Antriebe der Positionierkinematik.

5.2.1 Grundlegendes Steuerungs- und Regelungskonzept Sensorbox

Das Systemschema des mechatronischen Aufbaus aus Sensorbox und angetriebenen Kranschienensystem ist in **Bild 5.8** dargestellt.

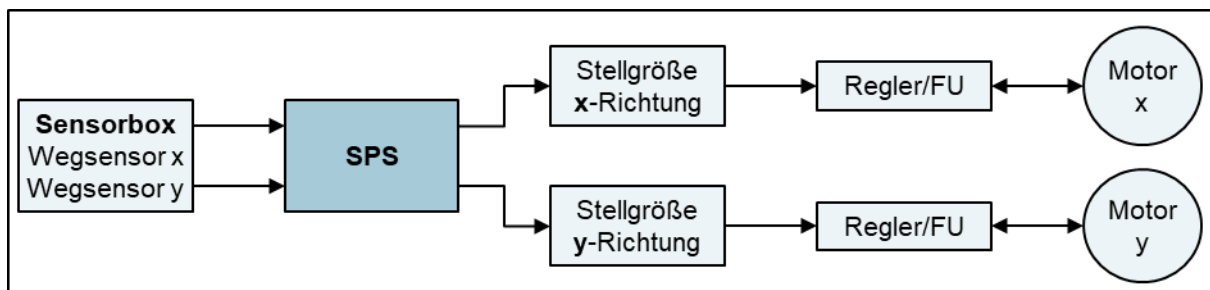


Bild 5.8: Systemschema
System Diagram

Prinzipiell werden zur Erfassung der Bedienabsicht die Signale der beiden Wegmesssysteme (x- und y-Richtung) in der Sensorbox (s. **Bild 4.4**) analog

eingelassen und in einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) mit dem entworfenen Regelungskonzept verarbeitet. Daraus folgend erhalten die Servomotoren der Fahrtriebe an den Schienenbahnen ihren Sollwert über eine Buskommunikation und übernehmen den Vortrieb des Kranschienensystems.

Im nachfolgenden wird das grundlegende Regelungskonzept zur Steuerung der Fahrtriebe basierend auf den manuell ausgelösten Minimalbewegungen in der Sensorbox-Kinematik schematisch beschrieben. Das Regelungskonzept ist stufenweise aufgebaut und in **Bild 5.9** dargestellt.

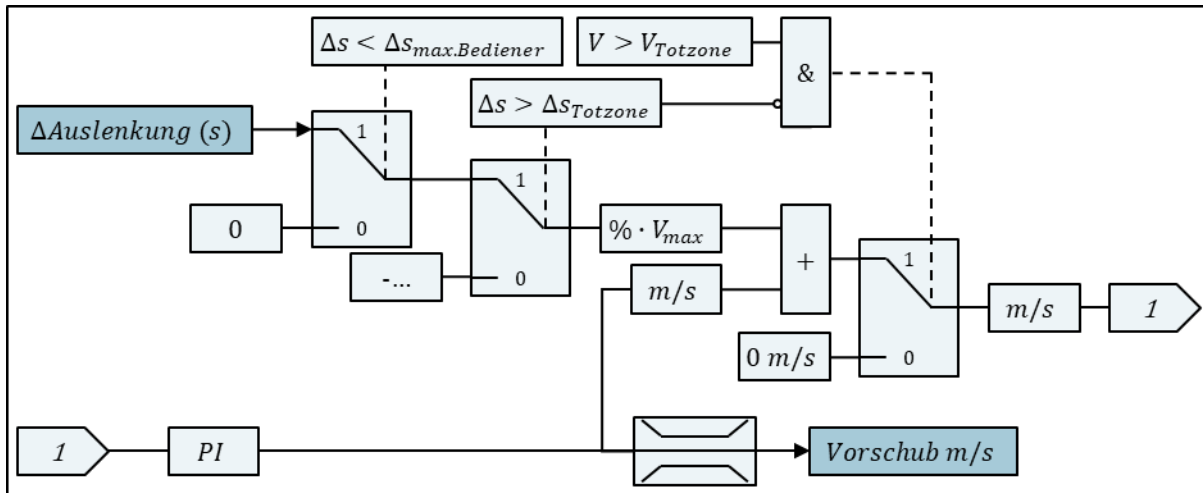


Bild 5.9: Schema grundlegendes Regelungskonzept

Scheme fundamental regulation concept

In der **ersten Stufe** wird die Änderung des Messwerts der Auslenkung der Sensorbox über eine bestimmte Zeit errechnet (Δs).

In der **zweiten Stufe** wertet die Steuerung aus, ob die Messwertänderung in einem realistischen und noch in einem von einem Bediener ausführbaren Bereich liegt. Liegt die Wertänderung oberhalb dieses Limits, wird der Änderungswert auf null gesetzt, um ein möglicherweise fehlerhafte oder unbeabsichtigte Beschleunigung zu verhindern.

In der **dritten Stufe** erfolgt die Prüfung, ob sich die Änderung des Messwerts außerhalb der sog. Totzone befindet. Da das Wegmesssignal analog ist, beschreibt die Totzone prinzipiell die Nullstellung der Sensorbox. Die Werte der Totzone sind einstellbar und werden durch Kalibrierung und Parametrierung der Sensorbox ermittelt. Liegt die Wertänderung innerhalb der Totzone, ist keine Bewegung oder Beschleunigung gewollt und die Servomotoren werden abgebremst. Somit werden auch unerwünschte und unsichere langsame Driftbewegungen der Antriebe und des Manipulators, die ohne manuelle Einwirkung entstehen könnten, vermieden. Liegt die Wertänderung jedoch außerhalb der Totzone, ist eine Beschleunigung gewollt und es findet eine entsprechende Beschleunigung statt.

In der **vierten Stufe** erfolgt die Berechnung der absoluten Erhöhung der Geschwindigkeit indem die Sollbeschleunigung in % mit der Maximalgeschwindigkeit v_{max} multipliziert wird.

Erfolgt hingegen eine Verringerung der Geschwindigkeit bzw. eine Abbremsung der Servomotoren in einen Bereich der Geschwindigkeits-Totzone, so werden die Antriebe stillgesetzt, bis sich die Auslenkung der Sensorbox wieder im realistischen Bereich eines Bedieners befindet.

Im Anschluss wird die Realgeschwindigkeit der Antriebe noch final über einen PI-Regelkreis ausgeregelt. Die Drehzahl der Antriebsmotoren und damit die Verfahrgeschwindigkeit der Krananlage ist überdies hinaus limitiert. Der PI-Regler bietet den Vorteil einer schnellen Reaktion sowie einer exakten Ausregelung und ist im Vergleich zum universelleren PID-Regler durch die reduzierte Zahl an Einstellgrößen einfacher zu parametrieren.

5.2.2 Kalibrierung Sensorbox

Calibration Sensorbox

Als erster Schritt der Inbetriebnahme des Systems wird die Sensorbox kalibriert. Der mechanische Aufbau der Sensorbox besteht, wie bereits beschrieben, aus Axialführungen. Nach einer Auslenkung sorgen jeweils adaptierte Feder-Dämpfer-Systeme für die Rückstellung der Schwimmpplatten in die Nullstellung. Die Auslenkungen in x- und y-Richtung werden jeweils über einen Linearwegsensor ermittelt (s. Kap. 4.3.1).

Zur Inbetriebnahme ist es daher notwendig, den Absolutwert der Wegmesssensoren für die Nullstellung der Sensorbox zu ermitteln.

Die Rückstellung des Systems in Nullstellung ist nur mit einer zu ermittelnden Wiederholgenauigkeit möglich. Gründe dafür sind zum einen Fertigungstoleranzen und die im Gleitschienensystem sowie durch die Rotationsdämpfer verursachte Reibung. Zudem kann sich das Kranschienensystem aufgrund elastischer Verformung bei entsprechender Belastung leicht durchbiegen, was zu einer Schrägstellung der Hubachse und somit auch der Sensorbox führen kann. Bei einer Abweichung der Schwimmpplatten aus der Horizontallage, kann das zu einer unausgeglichene zusätzlichen Axialkraft anteilig der Gewichtskraft führen.

Der Absolutwert der Nullstellung der Sensorbox wird im Rahmen der Arbeit daher in einer Versuchsreihe als Zentrum einer Punktwolke berechnet. Die Punktwolke gibt Einblick auf die Wiederholgenauigkeit der Rückstellung und auf die Präzision des Sensorwerts bezugnehmend auf seine Montageposition.

Erläuterung Linearwegsensoren in Sensorbox

In der Sensorbox sind zwei identische induktive Linearwegsensoren verbaut. Für jede Bewegungsachse einer. Der Messbereich und die für die Weiterverarbeitung ausgegebenen Werte der Linearwegsensoren sind in **Bild 5.10** erläutert.

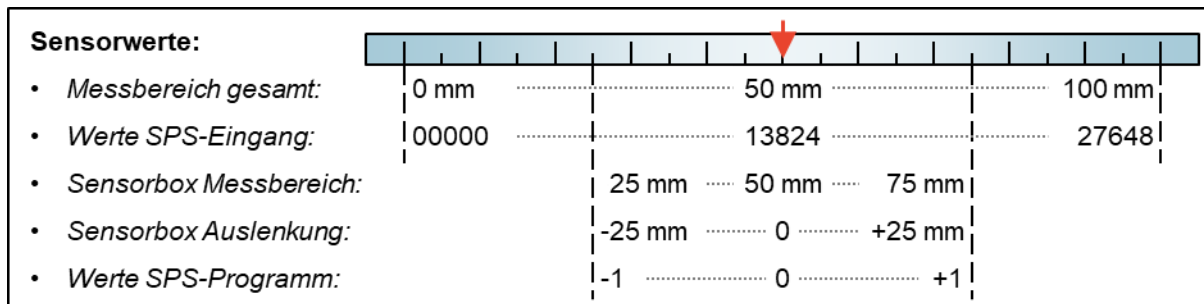


Bild 5.10: Erläuterung Werte Wegmesssensoren in Sensorbox

Explanation values position sensors in sensorbox

Die verbauten Linearwegsensoren besitzen einen Messbereich von 0 bis 100 mm. Die Messwerte werden über den Analogausgang der Sensoren (0 bis 10 V) an die SPS geleitet, wo sie von einer Analogkarte gewandelt und als digitaler Dezimalwert (00000 bis 27648, Auflösung 0,024 mm/12 bit) dem SPS-Programm zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der mechanisch eingeschränkten Auslenkungsbewegung der Sensorbox und der (abzüglich der Montagetoleranz) mittigen Anordnung der Sensoren wird jeweils nur der Messbereich von ca. 25 bis 75 mm genutzt. Das entspricht einer Auslenkung der Sensorbox von ± 25 mm aus der Nullstellung. Basierend auf der Kalibrierung des Systems entspricht das einer Maximalauslenkung von ± 1 im SPS Programm.

Ermittlung Nullstellung der Sensorboxauslenkung

Zur Kalibrierung der Sensorbox wurden im Rahmen der Arbeit die absoluten Sensorwerte der Demonstrator-Sensorbox ermittelt, die sie in ihrer Nullstellung hat. Da die Rückstellung der Sensorbox in Nullstellung nach einer Auslenkung mit Ungenauigkeiten und Abweichungen verbunden ist, wurde die Nullstellung als Mittelwert aus einer Reihe von Messungen errechnet.

Für die Versuchsreihe wurde die Hubachse stillgesetzt und die Last unter der Sensorbox von zwei unabhängigen Personen jeweils 25-mal auf randomisierte Art manuell in Schwingung versetzt. Nach jedem Ausklingen der Schwing- bzw. Pendelbewegung und dem damit verbundenen Stillstand der Sensorbox wurde der Sensorwert ausgelesen. Diese Prozedur wurde gemäß der schematischen Darstellung in **Bild 5.11** sowohl mit einteleskopierter Kranbrücke als auch bei voll austeleskopierter Kranbrücke durchgeführt. Dabei wurden jeweils drei Versuchsdurchläufe „ohne Last“ (nur mit einem Lenkergriff unter der Sensorbox), mit „pendelnder Last“ (Demonstrator-LAM mit ATS-Box) und mit einer „starrten Last“ von 200 kg (Versuchsgewicht) durchgeführt.

Die Aufnahme und Kombination der verschiedenen Kinematik-, Last-, und Bedienerinflüsse in die Messreihe zielt darauf ab, ein möglichst breites Bild der Realität abzudecken und einen global gültigen Nullpunkt der Sensorbox zu ermitteln. Gleichzeitig dient die Messreihe der Darstellung möglicher Auswirkungen von Positionierkinematik- und Lastzustand auf die Sensorbox.

Bei der Versuchsdurchführung wurden die SPS-Eingangswerte im Dezimalformat ausgelesen. Zur besseren Darstellung im Diagramm wurden sie in die passenden Linearwegpunkte des Messbereichs des Sensors in Millimeter umgerechnet (vgl. **Bild 5.10**).

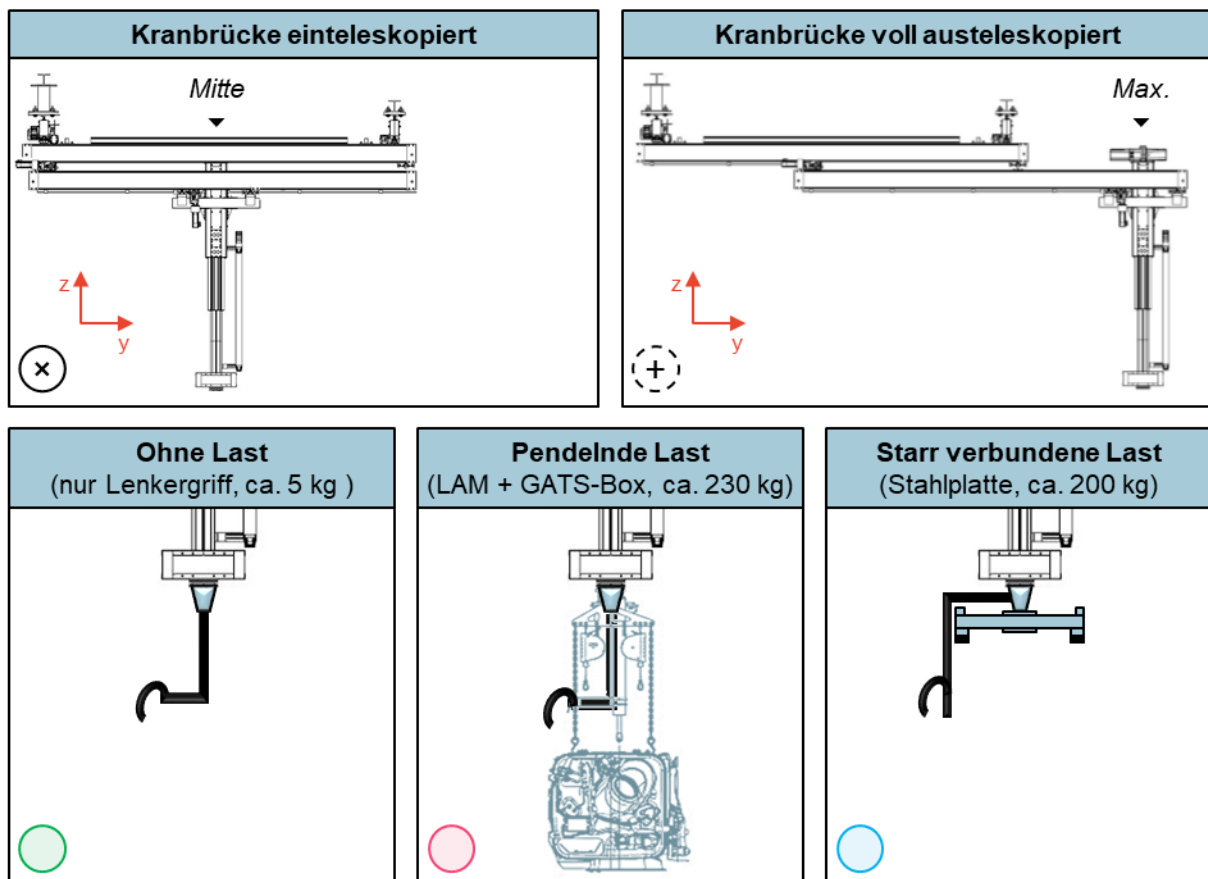


Bild 5.11: IAD- und Lastzustände für Nullpunkt Ermittlung (schematische Darstellung)

IAD- and load conditions for zero point determination (schematic illustration)

Das Diagramm in **Bild 5.12** zeigt die Zusammenfassung der Kalibriermessreihe. Die einzelnen Messpunkte jeder Messreihe sind als Kreuze im Diagramm angezeigt. Da bei jeder Messreihe die Darstellung einer Punktwolke entsteht, sind die jeweiligen Zentren bzw. Mittelwerte der Punktwolken mit einem Umkreis mit dem Radius von 1 mm gekennzeichnet. Es ist erkennbar, dass die beiden Zentren der Messreihe „Ohne Last“ sehr nah beieinander sind. Daraus lässt sich folgern, dass in diesem Lastzustand die Austeleskopierung der Kranbrücke kaum Einfluss auf den Nullpunkt hat. Bei den beiden anderen Messreihen „Pendelnde Last“ und „Starr verbundene Last“ ist hingegen eine klare Verschiebung des Nullpunkts auf der y-Achse zu erkennen. Die jeweiligen Zentren im einteleskopierten und im austeleskopierten Zustand sind jedoch

sehr nah beieinander. Dieses Verhalten legt den Einfluss der Durchbiegung der Kranbrücke im austelskopierten Zustand offen. Speziell bei maximaler Austeleskopierung und schwerer Last kommt es zu elastischen Verformungen im Material der Kranbrücke, sodass sie sich biegt. Damit einher geht eine geringfügige Schrägstellung der Hubachse und somit auch eine Neigung der daran befestigten Sensorbox. In der x-Richtung gibt es generell keine nennenswerte Verschiebung der Messwerte.

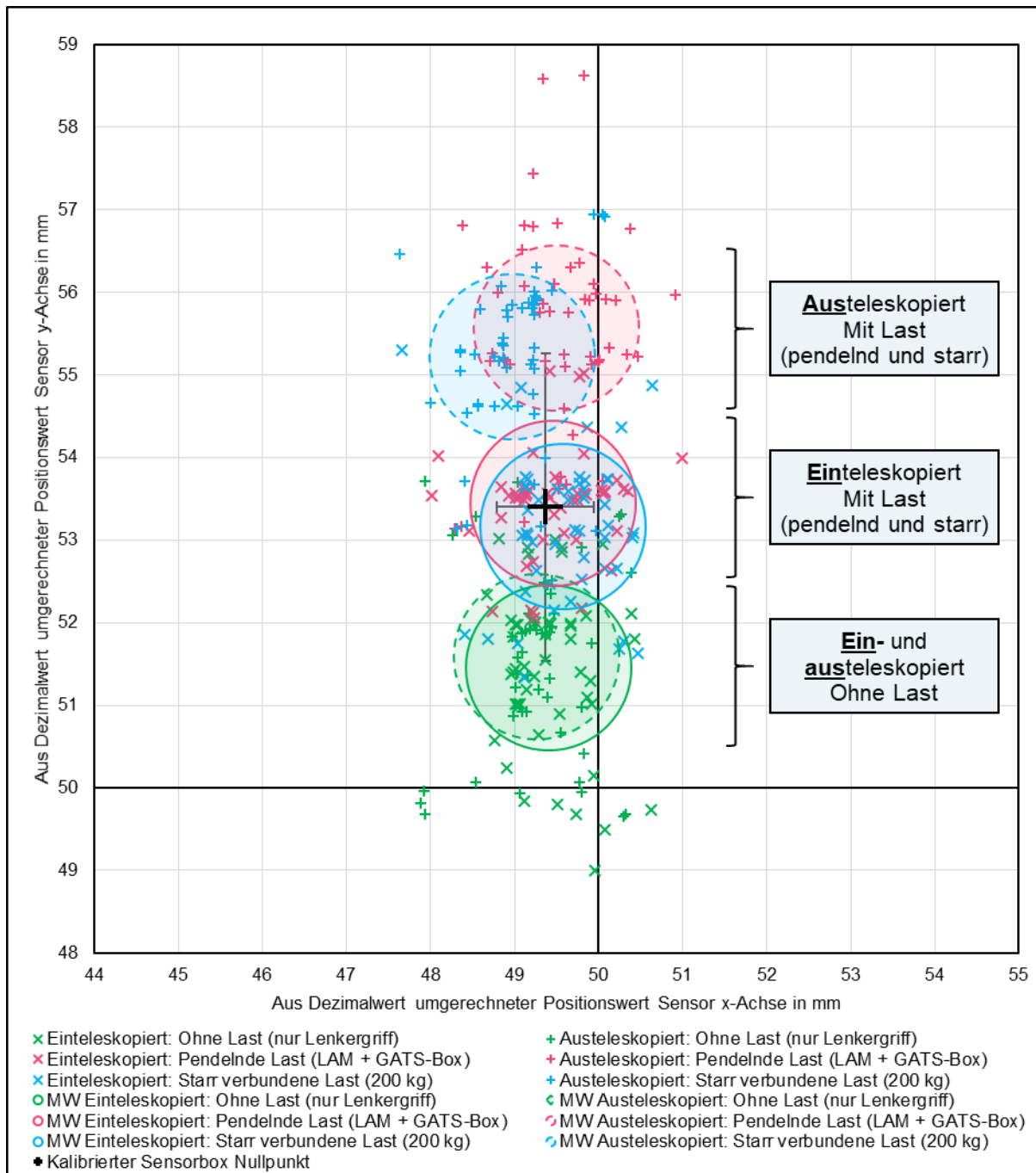


Bild 5.12: Kalibrierung Sensorbox und Ermittlung des Nullpunkts

Calibration sensorbox and calculation of zero point

Für die Sensorbox des Demonstrators wurde der Mittelwert aller Messpunkte der Messreihe berechnet und als Nullpunkt für die Kalibrierung des Systems verwendet.

Das Diagramm lässt weiterhin erkennen, dass der real gemessene Rückstellwert der Sensorbox in x-Richtung ca. $\pm 1,6$ mm und in y-Richtung um ca. $\pm 4,8$ mm vom kalibrierten Nullpunkt abweichen kann. Die Standardabweichung in x-Richtung beträgt 0,6 mm und in y-Richtung 1,9 mm. Dieses Verhalten muss von der Regelung ausgeglichen werden. Hierzu wird im weiteren Verlauf die Größe der Totzone im Verhältnis zur Maximalauslenkung der Sensorbox ermittelt und für die Regelung ausgelegt.

5.2.3 Parametrierung mittels statistischer Versuchsplanung

Parameterization by statistical design of experiments

Das Zusammenspiel der Antriebe der Positionierkinematik mit der Sensorbox wird über das in Kapitel 5.2.1, (S. 104) beschriebene Regelungskonzept gesteuert. Die Auslegung der zugrundeliegenden PI-Reglung hat zum Ziel, die Handhabungsbewegungen für den Bediener möglichst natürlich, komfortabel und kontrollierbar zu gestalten. Gleichzeitig soll das angetriebene Unterstützungssystem den Bediener in seiner Aufgabe unterstützen und im Vergleich zu manuellen Systemen vor allem die ergonomischen Kräfte reduzieren sowie die Arbeits- und Prozessgeschwindigkeit verbessern.

Da die Parametrierung des Reglers durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird und auf keine Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methode der statistischen Versuchsplanung angewendet, um die optimalen Parameterwerte zu ermitteln. Die Anwendung der statistischen Versuchsplanung zur Reglerauslegung bietet einen planbaren Kompromiss aus Aussagefähigkeit der Untersuchungen sowie deren Zeit- und Arbeitsaufwand. Zudem wird dadurch ein unstrukturiertes Ausprobieren (trial and error) oder ein zeitaufwändiges Prüfen des Einflusses einzelner Faktoren (one factor at the time), bei dem zudem auch keine Einflüsse aus Faktorwechselwirkungen beachtet werden, vermieden.

Es existieren drei grundlegende Arten von statistischen Versuchsplänen: Screeningpläne, Modellierungspläne und Optimierungspläne. Screeningpläne werden angewendet, um bei einer großen Anzahl von Faktoren diejenigen mit den größten Effekten zu identifizieren. Damit kann die Untersuchungsmatrix für weitere Versuche verkleinert werden. Bei Modellierungsplänen werden die Haupteffekte identifiziert sowie deren Wechselwirkungen und Einfluss auf die Zielgrößen untersucht. Beide Versuchsplantypen basieren auf linearen Modellen. In dieser Arbeit wird als statistischer Versuchsplan ein Optimierungsplan angewendet, da die wesentlichen einstellbaren Einflussfaktoren bekannt sind und eine ungefähre Lage des Optimums basierend auf minimalen und maximalen Faktorwerten bestimmbar ist. Ein Optimierungsplan basiert auf quadratischen Modellen und kann somit aus den verschiedenen Werten im Versuchsraum ein global optimiertes Maximum berechnen.

Zu parametrierende Einflussgrößen und Zielgrößen des Versuchsplans

Wie zuvor beschrieben, erhält der PI-Regler als Eingangssignal der Antriebssteuerung das sich infolge der Auslenkung der Sensorbox verändernde Signal des Wegmessensors. Das Signal wird vom PI-Regler verarbeitet und gibt als Ausgangssignal den Motor-Sollwert an die Antriebe weiter.

Um den PI-Regler mit Hilfe eines statistischen Versuchsplans auszulegen, werden im Folgenden die für die Aufstellung des Versuchsplans notwendigen variierbaren Einflussgrößen sowie die messbaren Ziel- bzw. Ausgangsgrößen festgelegt. Daneben existieren noch Störgrößen, die es bei der Versuchsdurchführung zu beachten und gegebenenfalls zu eliminieren gilt.

Die für die Versuchsplanung relevanten Ein- und Ausgangsgrößen, die Einfluss- und Zielgrößen sowie die Störgrößen sind in **Bild 5.13** dargestellt und werden in den nächsten Absätzen erläutert.

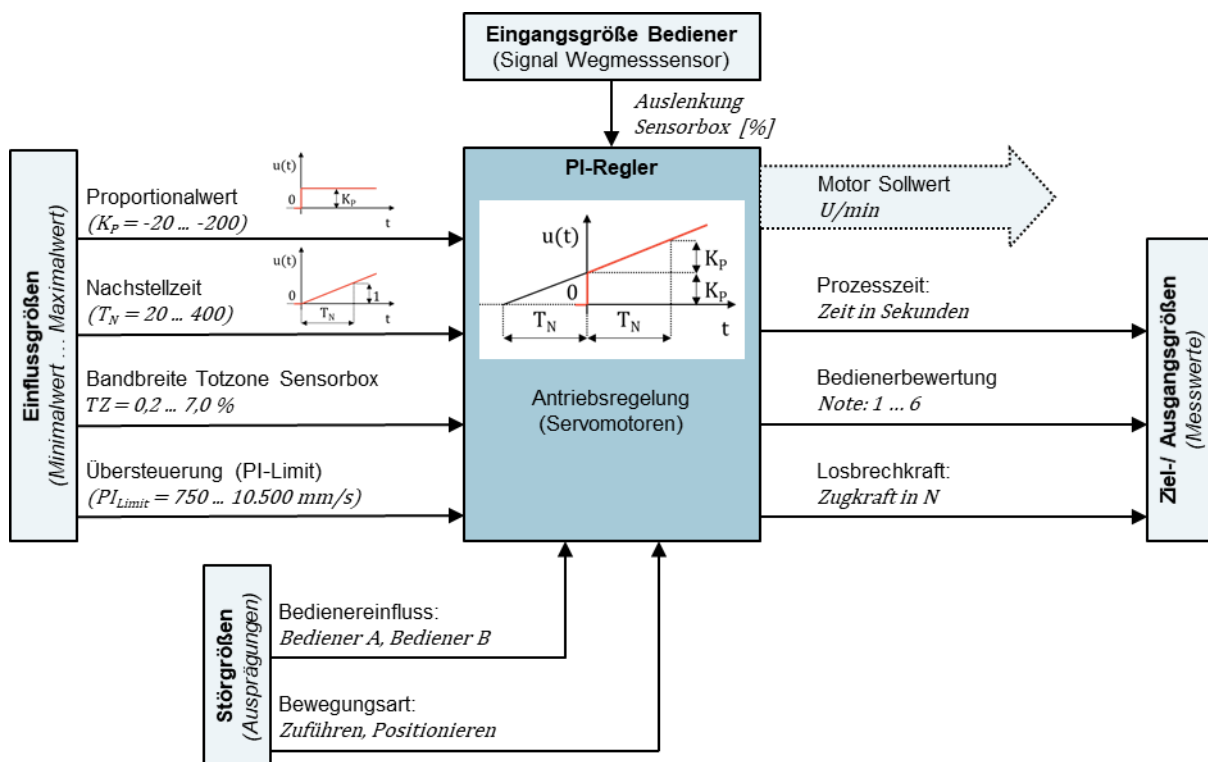


Bild 5.13: Faktoren Versuchsplan Parametrierung PI-Regler

Factors experimental plan parameterization PI-controller

Einflussgrößen Proportionalwert, Nachstellzeit und Übersteuerung

Für die Auslegung des PI-Reglers wurden vier variierbare Einflussgrößen festgelegt. Dazu gehören vorneweg der Anteil des Proportionalglieds (K_P) sowie der Anteil des Integralglieds, die Nachstellzeit (T_N). Weitere Einflussgrößen sind die einstellbare Bandbreite der Totzone (TZ) der Sensorbox (vgl. Kap. 5.2.1) sowie das Limit der Übersteuerung der Antriebe (PI_{Limit}) aufgrund der Drehmomentregelung der Servoantriebe. Die jeweilige minimale und maximale Ausprägung der vier Faktorstufen

ist bereits in **Bild 5.13** vermerkt. Für die Faktoren K_P , T_N und PI_{Limit} wurden die jeweiligen Minimal- und Maximalwerte für den Versuchsplan in Abstimmung mit den Steuerungstechnikexperten der Fa. EEPOS definiert.

Einflussgröße Bandbreite Totzone

Die mögliche Bandbreite der Totzone TZ wurde anhand einer separaten Versuchsreihe, zur Bestimmung der mechanischen Losbrechkraft der Sensorbox sowie des Zusammenhangs zwischen Kraft und Auslenkung, ermittelt. Aufgrund der Trägheits- und Reibungskräfte im mechanischen Aufbau der Sensorbox existieren entsprechende Losbrechkräfte. Befindet sich die Sensorbox in Ruhelage, so muss die Losbrechkraft übertroffen werden, um die Schwimmsplatten zu bewegen. Erst dann ist es möglich, eine Auslenkung zu messen. Zur Messung der mechanischen Losbrechkraft der Sensorbox wurde die Hubachse stillgesetzt und jeweils in positiver wie negativer x-Richtung eine sich schrittweise erhöhende Zugkraft aufgebracht. Nach Aufbringung der Zugkraft wurde die Auslenkung der Sensorbox gemessen. Diese Messreihe wurde einerseits ohne angebundene Last und andererseits mit einer pendelnd angebrachten Last (LAM + ATS-Box) durchgeführt (vgl. **Bild 5.11**). Das Ergebnis der Messreihe ist im Diagramm in **Bild 5.14** dargestellt.

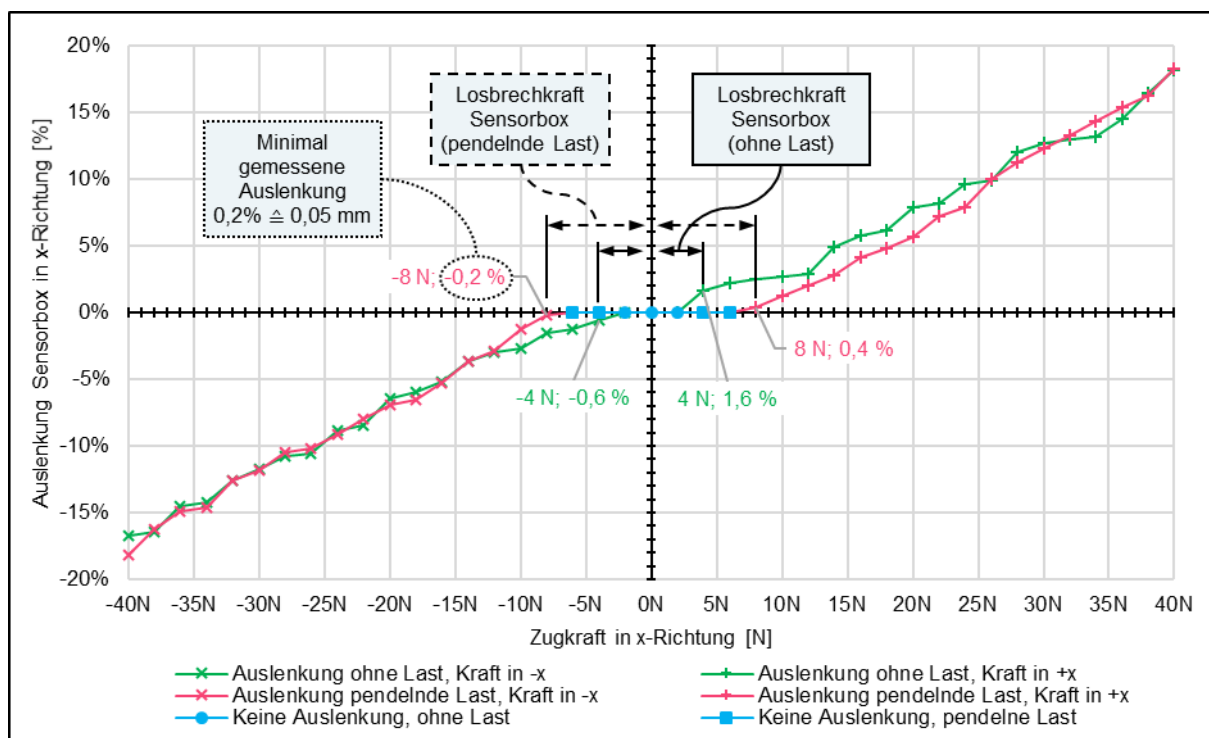


Bild 5.14: Messung der mechanischen Losbrechkraft der Sensorbox

Measurement mechanic breakaway force of Sensorbox

Es ist erkennbar, dass bei der Messreihe mit pendelnder Last sowohl in positiver als auch in negativer x-Richtung die kleinste Auslenkung bei einer Zugkraft von ± 8 N gemessen wird. Der Wert entspricht somit der Losbrechkraft der Mechanik der Sensorbox bei angehängter Last. Bei der Messreihe ohne Last wird die kleinste

Auslenkung bereits bei einer Zugkraft von ± 4 N detektiert. Aufgrund der geringeren Reibungs- und Trägheitskräfte, ohne die angehängte Last, kann die minimale Losbrechkraft der Sensorbox somit auf 4 N festgelegt werden. Im weiteren Verlauf der beiden Messreihen ist ein linearer Zusammenhang zwischen Zugkraft und Auslenkung erkennbar und die beiden Messreihen gleichen sich mit erhöhter Zugkraft einander an.

Die minimal gemessene Auslenkung der Sensorbox beträgt 0,2 %. Dieser Wert wird daher als kleinster Parameterwert für die Bandbreite der Totzone *TZ* definiert. Der Maximalwert wird auf 7 % festgelegt. Bei dieser Auslenkung muss der Bediener mindestens eine Kraft von ca. 20 N überwinden, um ein Signal an die Antriebe weiterzuleiten.

Störgrößen und praktische Versuchsdurchführung

Zuvor wurden bereits die für die Regelung entscheidenden Einflussfaktoren identifiziert und deren Ausprägungen beschrieben. Im Folgenden werden die zu messenden Zielgrößen sowie die Versuchsdurchführung zur Erhebung ihrer Werte definiert.

Die beiden festgestellten Störgrößen sind der Bedienereinfluss und die Bewegungsart.

Um den Einfluss des Bedieners auf die Zielgrößen zu eliminieren wird bei der Versuchsplanung auf eine zweifache Replikation zurückgegriffen. Zwei unabhängige Bediener führen somit jeweils die gleichen Versuche durch und ermitteln die Werte der Zielgrößen.

Die Bewegungsart hingegen wird in die praktische Versuchsdurchführung integriert. Unterschieden wird in zwei Bewegungsanteile eines Handhabungsprozesses, die in diesem Kapitel unter den Begriffen „**Zuführen**“ und „**Positionieren**“ geführt werden.

Beim **Zuführen** geht es darum, die Last vom Bereitstellungsart zum Montageort zu transportieren und Transportbewegungen mit vergleichsweise längeren Distanzen und groben Positionieranforderungen zu bewältigen. Darin enthalten sind Bewegungspfade von mehreren Metern, die in der Regel auf dem schnellsten Weg absolviert werden sollen. Die Genauigkeit der Erreichung einer Endposition ist an dieser Stelle sekundär. Primär betrachtet werden bei diesen Bewegungsanteilen die Trägheit beim Anfahren und Abbremsen einer Last. Das kann z.B. bei scharfen Richtungswechseln (z.B. $\geq 90^\circ$) oder bei Reversierbewegungen vorkommen. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist an dieser Stelle die Umsetzung des Freilaufs, sobald eine Last in Bewegung ist. Zur Ermittlung der Einflüsse dieser Bewegungsanteile wird für die Versuchsdurchführung ein standardisierter Bewegungspfad genutzt. Der für den Demonstrator konzipierte Bewegungspfad „Zuführen“ ist in **Bild 5.15** dargestellt. Er gleicht einem sog. Montagedreieck, bei dem die Last vom Bereitstellungsart (WP-0) zu einem Montageort (WP-1) transportiert wird. Dort angekommen folgt die Bewegung der Richtung der Montagelinie bis zum Abschluss eines möglichen Montagevorgangs (WP-2) und kehrt von dort wieder zurück zum Ausgangspunkt (WP-0). Bei der Durchführung dieses Bewegungspfads muss der Bediener an jedem Wegpunkt (WP-#) für eine Sekunde die Last in einem Kreis mit dem Durchmesser 10 cm halten.

Hierzu wurden Markierungen am Boden angebracht und ein Laserpointer am Handhabungsgerät installiert.

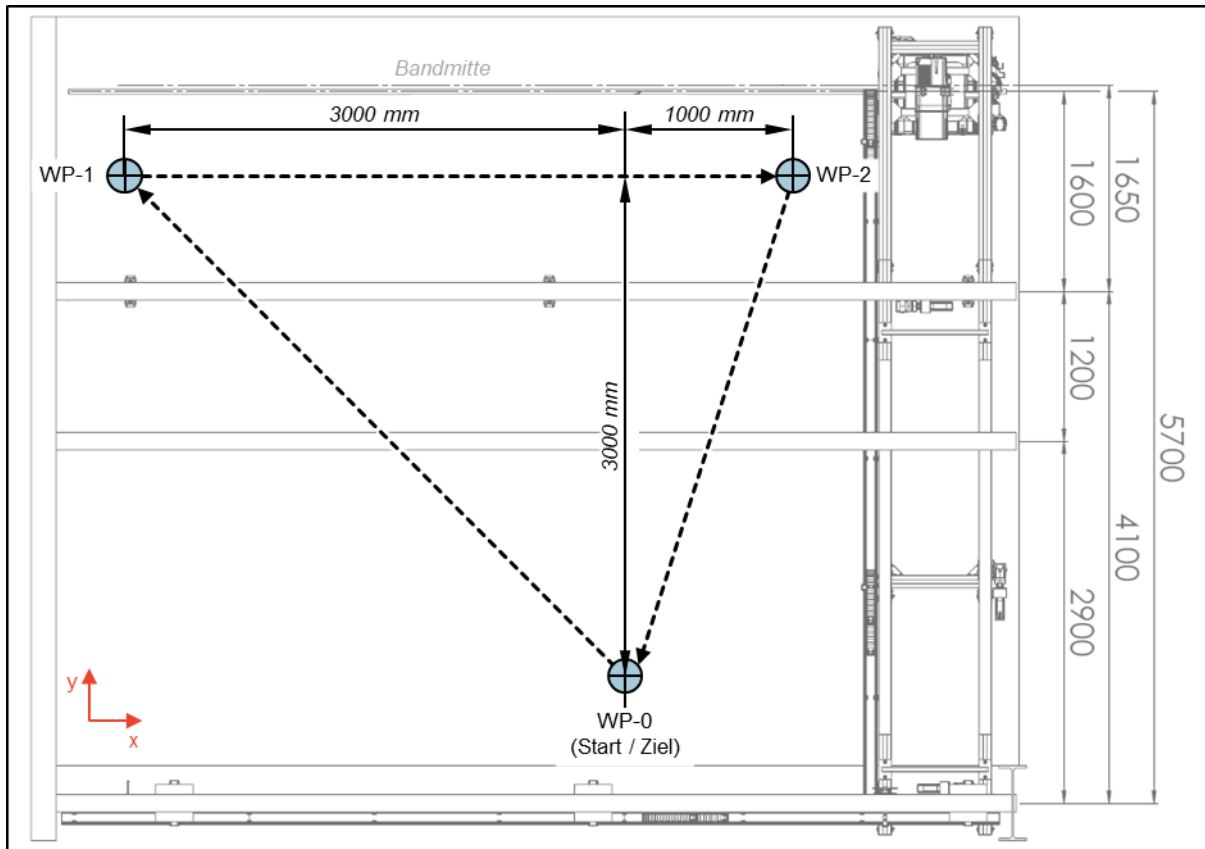


Bild 5.15: Bewegungspfad „Zuführen“, (Haltepunkte auf Montage-dreieck)

Motion path „handling“, (Stop positions on assembly triangle)

Beim **Positionieren** hingegen geht es im Wesentlichen darum, die Last am Montageort durch kleine Bewegungen fein auszurichten und evtl. mit einem sich bewegenden Montageobjekt zu synchronisieren. Darunter fallen Bewegungsdistanzen im Bereich von Millimetern bis wenigen Zentimetern. Bei der Bewegung selbst kommt es stark auf die genau kontrollierbare Positioniergenauigkeit an. Das beinhaltet das exakte und einfache Beschleunigen und Abbremsen der Last auf sehr kurzen Wegen sowie das genaue Verfolgen von kurvenförmigen Bewegungspfaden, wie sie bspw. bei Fügevorgängen notwendig sein können. Um die Anteile des Positionierens an der Störgröße Bewegungsart im Versuchsplan zu beachten, wird der Versuchsdurchführung ein weiterer standardisierter Bewegungspfad „Positionieren“ hinzugefügt. Der konzipierte Bewegungspfad „Positionieren“ ist in **Bild 5.16** dargestellt. Es handelt sich um einen „Parcours“, der auf einem DinA3-Blatt abgedruckt ist. Zur Durchführung des Experiments wird eine Stiftmine an das Lastaufnahmemittel, das mit der Sensorbox verbunden ist, befestigt. Der Proband soll mit der Stiftmine die Mittellinie des Parcours auf dem DinA3-Blatt so exakt wie möglich abfahren und ist dabei aufgefordert innerhalb der Begrenzung zu bleiben.

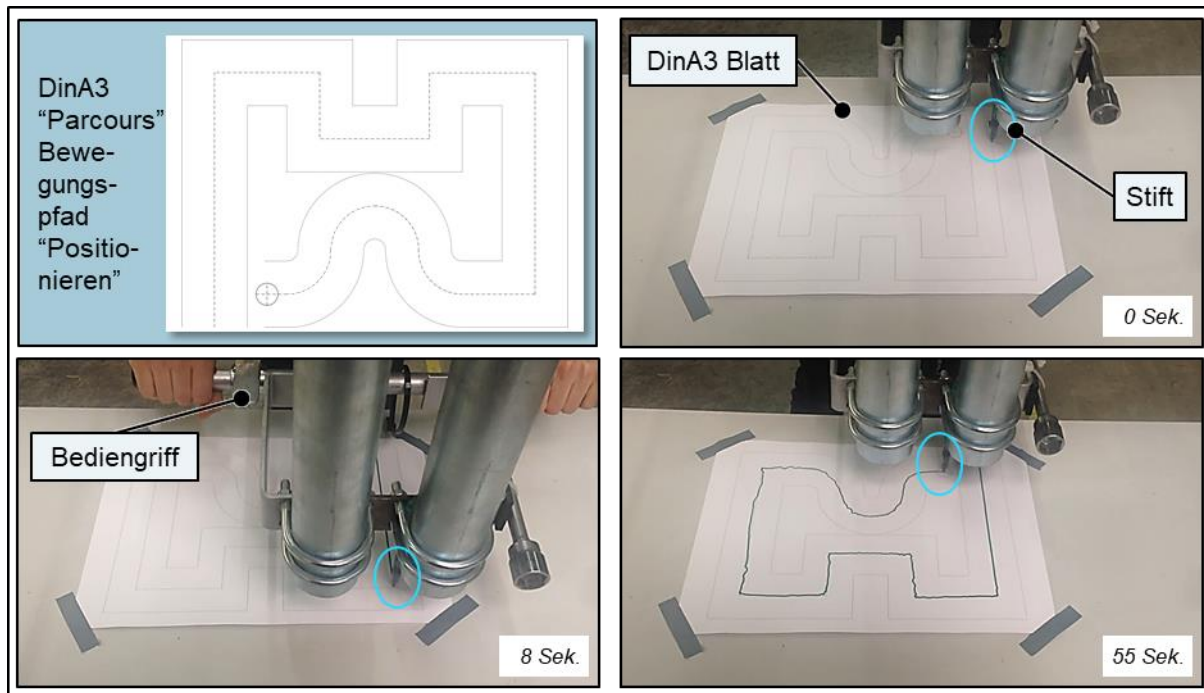


Bild 5.16: Bewegungspfad „Positionieren“, (DinA3-Blatt für Feinbewegungen)

Motion path „positioning“, (DinA3-sheet for sensitive movements)

Zielgrößen und Bewertungsschema

Durch die zweifache Replikation der Versuchsdurchführung mit zwei unterschiedlichen Probanden und mit Hilfe der beiden standardisierten Bewegungspfade „Zuführen“ und „Positionieren“ werden die beiden Störgrößen eliminiert bzw. beachtet.

Im Weiteren wird noch beschrieben, wie die Zielgrößen ermittelt und gemessen werden. Für beide Bewegungspfade „Zuführen“ und „Positionieren“ wird bei jedem Versuch die Zeit gemessen sowie eine Note vom Probanden vergeben. Die Note stellt eine Möglichkeit dar, die teils subjektive Wahrnehmung von Bedienbarkeit, Kontrolle und Gefühl über die Masse, Beschleunigung und Geschwindigkeit der Last zu bewerten. Um eine gleichbleibende Bewertung durch mehrere Probanden zu gewährleisten, wurde eine standardisierte Notenskala, vergleichbar mit dem Schulnotensystem, konzipiert und verwendet. Die jeweiligen Kriterien für die Vergabe der Noten sind in **Tabelle 5.1** beschrieben.

Tabelle 5.1: Notenskala und Kriterien für Bedienerbewertung

Grading scale and criteria for operator evaluation

Schulnote	Bewertungskriterien für Versuche
Note 1	Sehr gute Anwendbarkeit, sehr natürliches Gefühl für Handhabungsbewegung und Kontrolle, große ergonomische Erleichterung, guter Freilauf, den erwarteten natürlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei den Handhabungsbewegungen entsprechend

Note 2	Gute Anwendbarkeit, ergonomische Erleichterung, leicht künstliches Gefühl für Handhabungsbewegung und Kontrolle, leicht träge oder sensibel ggü. den erwarteten natürlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei den Handhabungsbewegungen
Note 3	Befriedigende Anwendbarkeit, mit Einschränkungen, künstliches Gefühl für Handhabungsbewegung und Kontrolle, Ergonomie vergleichbar mit nicht angetriebenen Systemen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei den Handhabungsbewegungen ggü. den Erwartungen zu träge oder zu sensibel
Note 4	Versuche durchführbar, gerade noch anwendbar, Gefühl für Handhabungsbewegung und Kontrolle gerade noch ausreichend, keine ergonomische Erleichterung gegenüber nicht angetriebenen Systemen, sehr träge Reaktion auf Richtungsänderungen oder Beschleunigungen während Handhabungsbewegung
Note 5	Unter schweren Bedingungen durchführbar, keine Anwendbarkeit, fehlendes Gefühl für Handhabungsbewegung und Kontrolle, ergonomisch erschwert gegenüber nicht angetriebenen Systemen
Note 6	Nicht durchführbar, Gefühl oder Kontrolle für Handhabungsbewegung nicht vorhanden, System schwingt sich z.B. sofort auf, Gefahr oder Fehler, Versuche zum Teil nicht durchführbar.

Beispielhaft für die Bewertung des Bewegungspfads „Positionieren“, bei dem die Probanden den Parcours auf einem DinA3-Blatt mit einer an der Positionierkinematik befestigten Stiftmine folgen müssen, stehen die Auszüge in **Bild 5.17**. Im linken Bereich ist der ideale Verlauf abgebildet. Die Probanden müssen dabei 90° Richtungsänderungen auf sehr kurzen Wegen vornehmen und einer Kurvenlinie folgen.

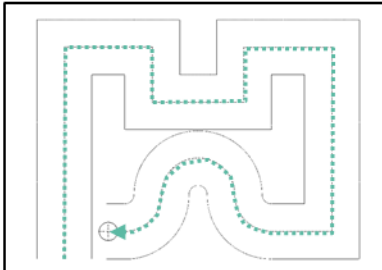
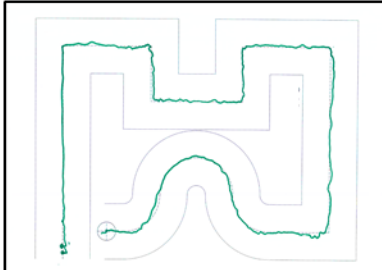
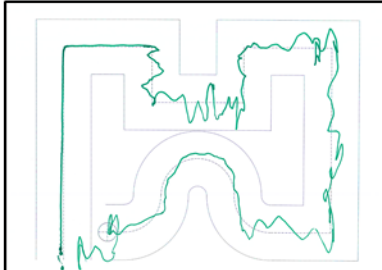
Bewegungspfad DinA3 Blatt	Beispiel A	Beispiel B
		
Positionieren, 90° Winkel, Radien • Benotung durch Testperson (1 bis 6) • Zeit für Abfahren des "Parcours"	Gute Kontrollierbarkeit, leicht träge • Bsp. Note Bewertung: 2 von 6 • Bsp. Zeitdauer: 50 Sek.	Fast unkontrollierbar, übersensibel • Bsp. Note Bewertung: 5 von 6 • Bsp. Zeitdauer: 44 Sek.

Bild 5.17: Bewertung Bewegungspfad „Positionieren“, (DinA3-Blatt für Feinbewegungen)

Evaluation motion path „positioning“, (DinA3-sheet for sensitive movements)

Beispiel A zeigt eine akkurat folgende Linie. Der Bediener kann das Handhabungsgerät gut kontrollieren und nimmt ein natürliches Gefühl wahr. Daher ist dieses Experiment mit der Note 2 bewertet. Der Grund ist hauptsächlich eine leicht träge Beschleunigung gepaart mit einer gefühlt etwas zu langsamen Geschwindigkeit. Dies spiegelt sich in diesem Fall auch in der Prozesszeit wieder. Sie beträgt 55 Sekunden. Das Optimum liegt hingegen bei ungefähr 30 Sekunden.

Beispiel B zeigt als Gegenüberstellung eine fast unkontrollierbare übersensible Systembewegung. Der Bediener konnte die Stiftmine nur mit Mühe innerhalb des Begrenzungsraums führen. Das System ist zwar sensibel und schnell reagierend, starke Auslenkungen und Schwingbewegungen lassen jedoch erkennen, dass die Steuerung der Bewegungsrichtung mit starken und kaum kontrollierbaren Beschleunigungen verbunden ist. Das Systemverhalten ermöglicht daher keine Anwendbarkeit in der Realität. Somit wurde in Beispiel B die Note 5 vergeben und eine Prozesszeit von 44 Sekunden ermittelt.

Für den Bewegungspfad „Zuführen“ wird bei der Versuchsdurchführung auf gleiche Art und Weise sowohl die Prozesszeit für das Abfahren des Montagedreiecks gemessen, als auch vom Bediener eine Notenbewertung auf Basis der Kriterien aus **Tabelle 5.1** abgegeben.

Neben den beiden Prozesszeiten und Bewertungen für die Versuche Montagedreieck und DinA3-Parcours wird als dritte Zielgröße noch die Losbrechkraft des angetriebenen Systems gemessen. Somit werden für jeden Versuch insgesamt fünf Ziel- bzw. Optimierungsgrößen ermittelt.

Versuchsplan

Oben wurden bereits die entscheidenden Faktoren identifiziert und beschrieben sowie die zu optimierenden Zielgrößen definiert. Im Folgenden wird aus den Methoden der statistischen Versuchsplanung ein Optimierungsplan genutzt, um die optimalen Faktorwerte für die Reglerauslegung zu bestimmen.

Da es sich um vier Faktoren handelt, deren Optimum berechnet werden soll, wird ein zentral zusammengesetztes Wirkungsflächenexperiment entworfen. Als Statistik-Software für die Erstellung, Auswertung und Optimierung des Versuchsplans wurde das Programm MINITAB verwendet. Die darin angewandte Zielgrößenoptimierung basiert auf einer quadratischen Modellbildung.

Der erstellte Wirkungsflächenversuchsplan ist zentral zusammengesetzt und enthält die oben beschriebenen vier stetigen Faktoren. Der zugrundeliegende zweistufig vollfaktorielle Versuchsplan ohne Blockbildung enthält somit 31 Basisdurchläufe. Aufgrund der zweifachen Replikation, die durch zwei unabhängige Probanden zur Elimination des Bedienereinflusses durchgeführt werden, folgt daraus eine Gesamtanzahl von 62 Versuchsdurchläufen. Jeder Proband führt dabei die identischen 31 Versuchsdurchläufe durch. Die in der Gesamtzahl der Durchläufe enthaltenen Punktypen sind aufgeteilt in 32 Würfelpunkte, 14 Zentelpunkte im Würfel

und 16 Sternpunkte. Gewählt wurde zudem ein flächenzentrierter Versuchsplan mit $\alpha = 1$. Auf diese Weise können die bereits gut definierbaren minimalen und maximalen Ausprägungen der Faktoren im Versuchsplan als Hoch- und Tiefpunkte des Würfels vorgegeben werden. Die im Versuchsplan angewandten einzelnen Faktorstufen wurden bereits Eingangs des Kapitels beschrieben und sind nochmals in **Tabelle 5.2** zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Faktorstufen des Wirkungsflächenversuchsplans

Factor levels of response surface analysis

Einflussfaktoren	Faktorstufen		
	Tief (-1)	Hoch (+1)	Center Point (CP)
K_P (Kp)	-200	20	-110
T_N (Tn)	20	400	210
TZ (Tz)	0,2	7,0	3,6
PI_{Limit} (PI_Limit)	750	10.500	5.625

Der gesamte Wirkungsflächenversuchsplan in tabellarischer Form befindet sich im Anhang in **Tabelle 8.9**.

Versuchsdurchführung und Zielgrößenoptimierung

Die komplette Versuchsdurchführung auf Basis des Versuchsplans wurde insgesamt dreimal durchgeführt. Jeweils mit unterschiedlicher Lastart (vgl. **Bild 5.11**):

1. Ohne Last (oL)

An der Sensorbox befindet sich nur das aus **Bild 5.5** bekannte Lastaufnahmemittel mit Bediengriff.

2. Pendelnde Last (pL)

An der Sensorbox befindet sich, wie in **Bild 5.5** dargestellt, das Lastaufnahmemittel mit an den Ketten angehängter schwingfähiger ATS-Box mit ca. 200 kg.

3. Starre Last (sL)

An der Sensorbox ist, wie in **Bild 5.11** dargestellt, ein ca. 200 kg schweres Lastgewicht mit einem Bediengriff angebracht. Die Last ist nicht schwingfähig und kann sich über das Drehgelenk unter der Sensorbox nur zentrisch um die Vertikalachse drehen.

Bei der Versuchsdurchführung wurden basierend auf den im Versuchsplan ermittelten Faktorstufenkombinationen und Wiederholungen für jeden Durchlauf jeweils der Bewegungspfad „Positionieren“ und „Zuführen“ von zwei Probanden durchgeführt,

benotet sowie die Prozesszeit gemessen. Darüber hinaus wurde die Losbrechkraft gemessen. Die erhobenen Werte aus den Experimenten sind im Anhang **Tabelle 8.10** zu entnehmen.

Zur Auslegung der Regelparameter und damit der Bedienbarkeit des Systems wird anhand der ermittelten Werte eine Zielgrößenoptimierung durchgeführt. Sie hat zum Ziel, jeweils für jede der drei Lastarten ein optimales Parametersetting zu ermitteln. In der Praxis kann dann z.B. anhand einer im Handhabungsgerät integrierten Wägezelle erkannt werden, ob eine (pendelnde) Last angehängt ist oder nicht. Auf Basis dieser Information kann automatisch zwischen den Parametersets gewechselt werden. Bei einer starr angebundnen Last wird davon ausgegangen, dass es sich um die Handhabung eines schweren Werkzeugs (z.B. Schraubwerkzeug) handelt. Bei solch einem Handhabungsprozess bleibt die Lastart und damit auch die Reglerparameter unverändert.

Bei der durchgeführten Zielgrößenoptimierung wurden für jede der drei Lastarten die insgesamt fünf Zielgrößen minimiert. Dabei wurden die Sollwerte und Obergrenzen wie in **Tabelle 5.3** dargestellt, angewendet.

Tabelle 5.3: Sollwerte und Obergrenzen für Zielgrößenoptimierung (Minimieren)

Target values and upper values for response optimizer (minimize)

Zielgröße	Ziel	Sollwert	Obergrenze
Losbrechkraft	Minimieren	4 N	20 N
Note Positionieren	Minimieren	Beste Note in Exp.	Note 3
Zeit Positionieren	Minimieren	30 Sek.	60 Sek.
Note Zuführen	Minimieren	Beste Note in Exp.	Note 3
Zeit Zuführen	Minimieren	30 Sek.	60 Sek.

Das Ergebnis der Zielgrößenoptimierung mit MINITAB für den Systemzustand „ohne Last“ ist in **Bild 5.18** abgebildet.

Gleiches wurde darüber hinaus für die beiden weiteren Lastzustände „pendelnde Last“ und „starre Last“ durchgeführt. Die dazugehörigen Optimierungsergebnisse sind im Anhang in **Bild 8.1** und **Bild 8.2** abgebildet. Die Übersicht der ermittelten Optimierungsergebnisse für die drei Lastarten sind in **Tabelle 5.4** dargestellt.

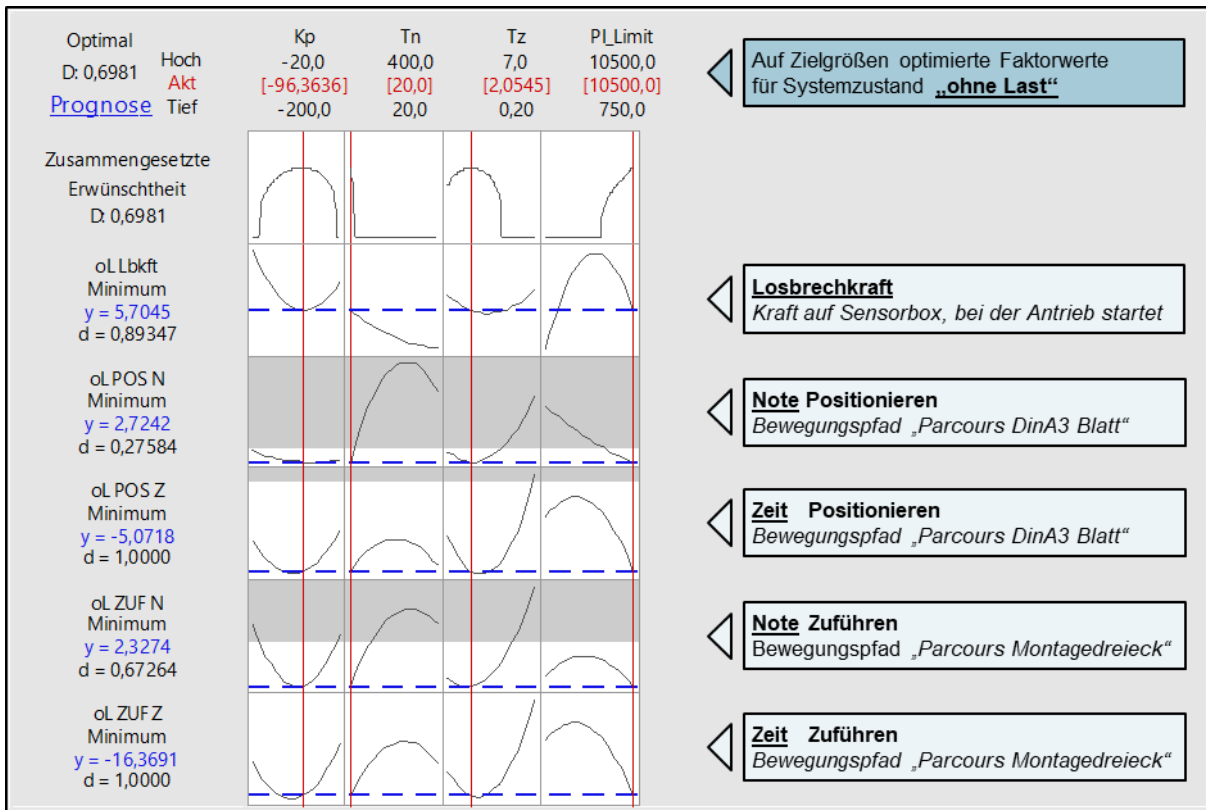


Bild 5.18: Zielgrößenoptimierung für Systemzustand „ohne Last“

Response optimizer for system status „without load“

Die Ergebnisse der Zielgrößenoptimierung wurden als Teil der Inbetriebnahme des Demonstrators als Parameterwerte für den PI-Regler in der Steuerung hinterlegt. Die Übersicht der Werte ist in **Tabelle 5.4** dargestellt.

Tabelle 5.4: Übersicht optimierte Reglerparameter für spezifische Lastart

Overview optimized control parameters for specific load types

Lastart	Optimierte Parameter			
	K_p	T_N	TZ	PI_{Limit}
Ohne Last	-96,5	20,0	2,1	10.500
Pendelnde Last	-101,8	20,0	6,9	750
Starre Last	-200,0	400,0	7,0	750

Die im Anschluss durchgeführten praktischen Tests unter Verwendung der Parameter zeigten ein sehr gutes und anwendbares Bedienverhalten und bestätigen den Ansatz der gewählten Vorgehensweise zur Parametrierung.

Die Werte und Erfahrungen können weiterhin für mögliche weitere Optimierungsansätze oder Neuauslegungen von abgewandelten oder skalierten Systemen genutzt werden.

5.2.4 Zusatz- und Sicherheitsfunktionen

Additional and Safety Functions

Zuvor wurde der vollständige Aufbau des Demonstrators mit integriertem Vertikalseilbalancer und exemplarischen Lastaufnahmemittel für die Experimentallast ATS-Box durchgeführt. Die darauffolgende Inbetriebnahme und Parametrierung der Sensorbox und Positionierkinematik kann als Basisfunktionalität des IAD angesehen werden. In diesem Kapitel wird nun die beispielhafte Implementierung notwendiger Zusatzfunktionen behandelt. Die Zusatzfunktionen verbessern die Bedienbarkeit und folgen wichtigen Feedbacks von Experten aus der Produktionsplanung, um einen sicheren Betrieb des IAD zu ermöglichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Zusatzfunktionen entwickelt und im Demonstrator implementiert:

Virtuelle Wand und servomotorisch gebremste Endlagen:

Die sog. „virtuellen Wände“ sind einstellbare Endlagen der Positionierkinematik, bei denen die Kranbrücke mit Hubachse in ihrer Bewegung in x- und y-Richtung bei Überfahren eines bestimmten Punkts über die Servoantriebe kontrolliert abgebremst und in den Stillstand versetzt werden. Somit kann die Positionierkinematik nicht ungebremst in die mechanischen Endlagen des Schienensystems fahren. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die virtuellen Begrenzungen auch der Realsituation anzupassen, um mögliche Kollisionen mit festen Hindernissen zu vermeiden.

Im aufgebautem Demonstrator wurde die Funktion beispielhaft mit Kreuzschaltern umgesetzt, die im Schienensystem verbaut wurden. Bei Überfahren einer an den Endlagen angebrachten Schalterfahne bremsen die Servoantriebe über eine Rampenfunktion die Geschwindigkeit der Kranbrücke. Allerdings nur in Richtung der Wand und gegebenenfalls bis zum Stillstand. Das System wird somit sanft gestoppt und ein Aufschwingen der Last verhindert. Der Bediener nimmt nach dem Überfahren der Schaltfahne einen spürbaren und ansteigenden Widerstand wahr. Ein Reversieren ist jedoch sofort möglich.

Die Funktion lässt sich auch ohne Schalterfahnen anhand der Position des Systems umsetzen. Hierfür ist allerdings ein redundant ausgelegtes Positions- bzw. Wegmesssystem im Kransystem notwendig, was im Demonstrator aus Kostengründen nicht implementiert wurde. Damit lässt sich flexibel einstellen, an welchen Layoutbereichen virtuelle Wände hinterlegt werden.

Übergangsloses Teleskopieren:

Der Demonstrator beinhaltet als Besonderheit und aufgrund der konkreten Anforderungen aus der Praxis eine teleskopierbare Kranbrücke (vgl. Kap. 5.1.1). Aufgrund der Kombination mit den Servoantrieben und der Steuerung durch die Sensorbox im IAD-Aufbau wird eine einfache Lösung zur Steuerung der Teleskopierbewegung implementiert.

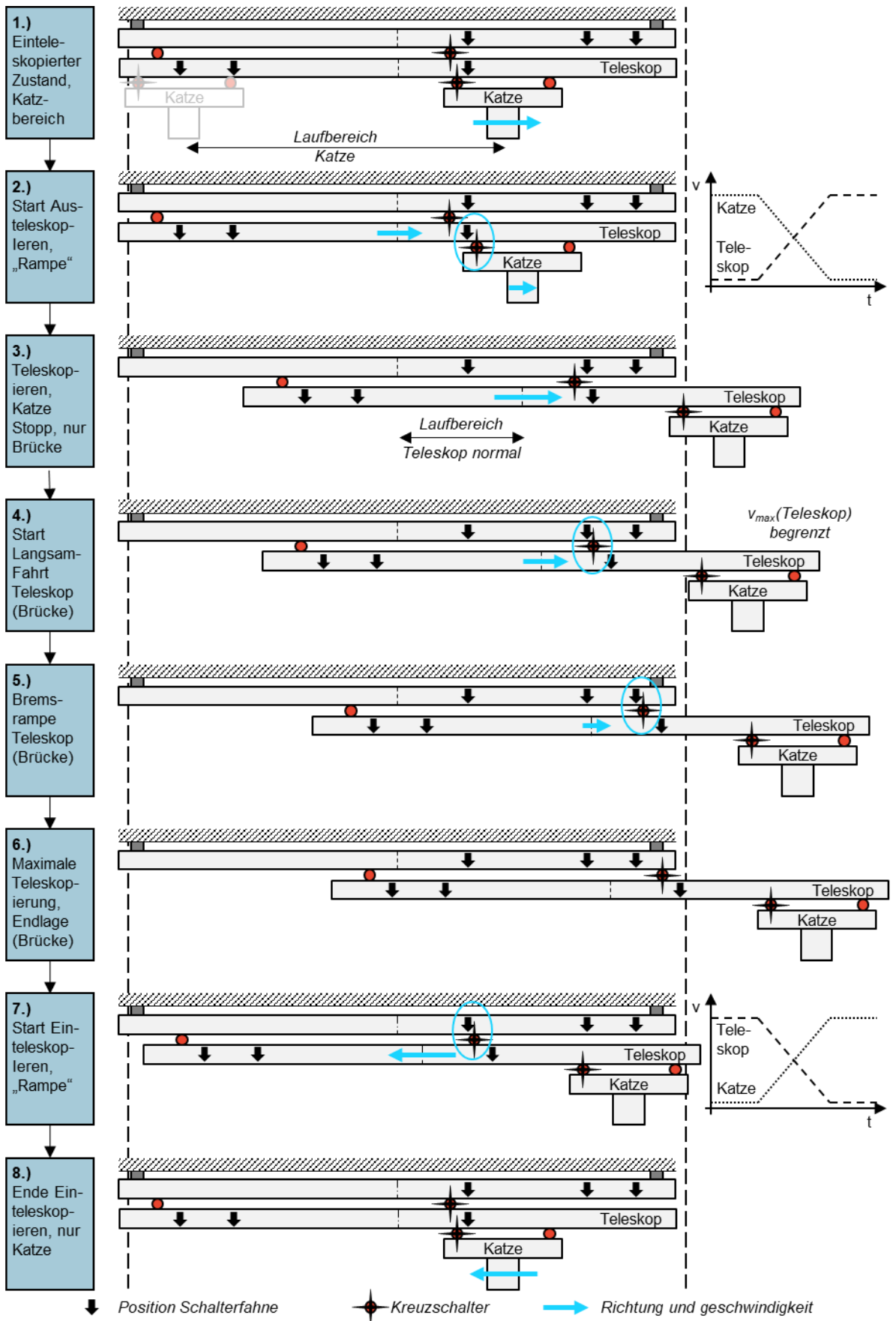


Bild 5.19: Funktionsweise „Übergangslose Teleskopierfunktion“, (schematisch)
Operating principle „Seamless telescope function“, (schematic)

Hauptziel ist es, den Übergang von Katzrahmenbewegung und Kranbrückenteleskopbewegung für den Bediener möglichst gleichmäßig zu gestalten. Wird der Übergang vom Bediener kaum wahrgenommen, handelt es sich um eine gute Benutzererfahrung. Die umgesetzte Teleskopierfunktion der Kranbrücke ist in **Bild 5.19** dargestellt. Sie basiert auf der Verwendung sicherer und kostengünstiger Kreuzschalter. Die zugehörigen Schalterfahnen können variabel installiert werden und bieten somit eine kostengünstige und einfache Möglichkeit das System auf unterschiedliche Layoutmaße anzupassen. Die Kreuzschalter sind mit der Antriebssteuerung verbunden und geben die Signale zur Verwendung von Brems- oder Beschleunigungsrampen der beiden Antriebe von Kranbrücke und Katzrahmen. Darüber hinaus wurde eine Verringerung der Geschwindigkeit nahe der Endlage im austeleskopierten Zustand installiert. In diesem Bereich finden die Montagetätigkeiten statt. Im Falle des Demonstrators muss bspw. ein Schraubwerkzeug genau positioniert werden. Die sich reduzierende Geschwindigkeit unterstützt den Bediener beim Erreichen des Zielbereichs, sodass er selbst weniger Kraft und Koordination zum Abbremsen des Systems aufwenden muss. Er kann sich somit direkt auf die Feinpositionierarbeit konzentrieren, wo seine Fähigkeiten am stärksten zur Geltung kommen.

Anti-Drift-Funktion:

Aufgrund der mechanischen Kinematik der Sensorbox und der Toleranz bei der Rückstellung in die Nulllage (vgl. Kap. 5.2.2, **Bild 5.12**) kann es je nach Parametrierung der Bandbreite der Totzone zu leichten Driftbewegungen der Positionierkinematik kommen. Begründet ist das Verhalten darin, dass bei vereinzelt Handhabungsvorgängen und aufgrund von Reibung oder Stick-Slip-Effekten in der Sensorbox die zurückgestellte Nullstellung bei Systemstillstand nicht innerhalb der Bandbreite der Totzone liegt. Vielmehr kann es zum Teil vorkommen, dass sich die „Nullstellung“ vereinzelt leicht außerhalb der Totzone befindet. Der Regler bekommt somit ein stetiges Eingangssignal und wandelt es in eine sehr langsame Fahrbewegung um, die als Driftbewegung bezeichnet wird. Eine spezielle Funktion überwacht das Verhältnis zwischen Auslenkung und Zeit. Sie verhindert somit die Driftbewegungen. Gewünschte und beabsichtigte konstante Bewegungen, wie sie z.B. bei der Bandsynchronisation vorkommen, sollen allerdings ermöglicht werden. So muss bspw. gewährleistet sein, dass sich die Positionierkinematik bei Verbindung mit einem mit konstanter Geschwindigkeit geförderten Montageobjekt mit gleicher konstanter Geschwindigkeit bewegt. Es darf z.B. keine Stotterbewegung entstehen.

Die Anti-Drift-Funktion wurde basierend auf den o.g. Anforderungen mit Hilfe verschiedener Abfragen der Servoantriebe und der Sensorboxauslenkung umgesetzt. Die Funktionsweise ist im Diagramm in **Bild 5.20** dargestellt.

Die Erkennung einer Driftbewegung erfolgt durch die Überwachung der Ist-Geschwindigkeit der Servoantriebe. Ist die Ist-Geschwindigkeit für mehr als 5 Sek. kleiner als 10 mm/s, wird die Anti-Drift-Funktion (AD-Fkt.) aktiviert. Dabei wird

gleichzeitig die Soll-Geschwindigkeit über eine Bremsrampe auf $v_{\text{soll}} = 0 \text{ mm/s}$ reduziert (Dauer: 1 Sek.) und die Bandbreite der Totzone über eine Rampe auf den Maximalwert von 7 % erhöht (Dauer: 3 Sek.). Sobald $v_{\text{ist}} = 0 \text{ mm/s}$ oder $v_{\text{ist}} \leq 10 \text{ mm/s}$ und $\text{Auslenkung}_{\text{relativ}} = 0 \%$ wird der I-Anteil des Reglers initialisiert bzw. genullt. Im Anschluss muss der Bediener für die Reaktivierung des Systems die Totzone von 7 % einmalig überschreiten. Hierfür ist eine vergleichsweise kräftigere horizontal wirkende Zug- oder Druckkraft auf die Last notwendig. Anschließend arbeitet das System wieder mit den Standardparametern.

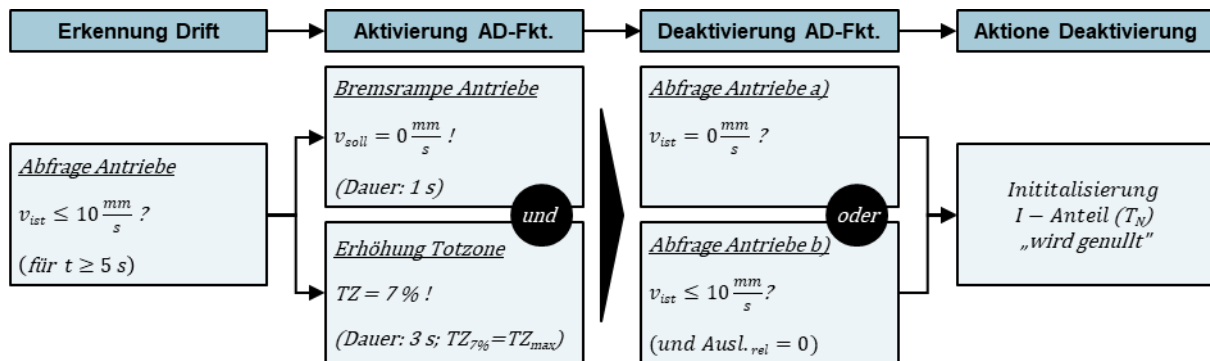


Bild 5.20: Anti-Drift-Funktion – Funktionsdiagramm, (schematisch)

Anti-Drift-Function – Functional diagram, (schematic)

Aufgrund der gewählten geringen Abfragegeschwindigkeit während der Erkennung wird eine Synchronisation mit der Bandgeschwindigkeit nicht als Drift erkannt. Das System arbeitet in diesem Fall auch mit den Standardparametern.

Anti-Pendel-Funktion:

Als Antwort auf die Anforderungen der Experten aus Planung und Produktion werden auch im Demonstrator biegeschlaffe Elemente (z.B. Ketten) im Lastaufnahmemittel verwendet. Dieser Sachverhalt stellt eine weitere wichtige Eigenschaft des IAD dar. Durch die Aufhängung der Last an den Ketten besteht die Möglichkeit, dass die Last in eine schwingende oder pendelnde Bewegung versetzt werden kann. In Zusammenhang mit dem Feder-Dämpfer-System der Sensorbox und den Antrieben der Positionierkinematik kann das z.B. zu einem Aufschwingen bei Erreichung der Eigenfrequenz führen. Darüber hinaus ist z.B. bei abrupten Stopps der Fahrbewegung ein Dämpfen der Schwingbewegung aus Sicherheitsgründen wünschenswert. Die Anti-Pendel-Funktion erkennt unnatürliche und aufschwingende Pendelbewegungen und führt sie mit Hilfe der Servoantriebe schnell zum Stillstand.

Die Funktionsweise der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und im Demonstrator umgesetzten Anti-Pendel-Funktion ist schematisch in **Bild 5.21** abgebildet.

Die Erkennung basiert auf der Auswertung der Auslenkungsbewegungen der Sensorbox. Ein unerwünschtes oder unnatürliches Aufschwingen wird anhand von mindestens drei aufeinanderfolgenden Amplituden erkannt. Die Amplituden müssen dabei über der definierten Schwingungsgrenze liegen und ihre Werte müssen größer

werden (z.B. $A_1 < A_2 < A_3$). Gleichzeitig muss zwischen jeder der Amplituden ein Nulldurchgang (Sensorbox in Nullstellung) stattfinden (z.B. N_{1-2} , N_{2-3}). Die Zeit zwischen zwei Amplituden und einem Nulldurchgang muss kleiner als eine definierte Zeit t sein, um nur Lastschwingungen zu erkennen (z.B. $t_{1-2} < 2\text{ s}$). Wird anhand dieser Abfrage ein Aufschwingen erkannt, folgt die aktive Dämpfung mit Hilfe der Servoantriebe. Hierfür wird der P-Anteil des Reglers für einen definierten Zeitbaustein über eine Rampenfunktion reduziert. Die Schwingung wird in kurzer Zeit abgedämpft und das System beruhigt sich oder kommt zum Stillstand. Im Anschluss erfolgt wieder eine Initialisierung des Reglers.

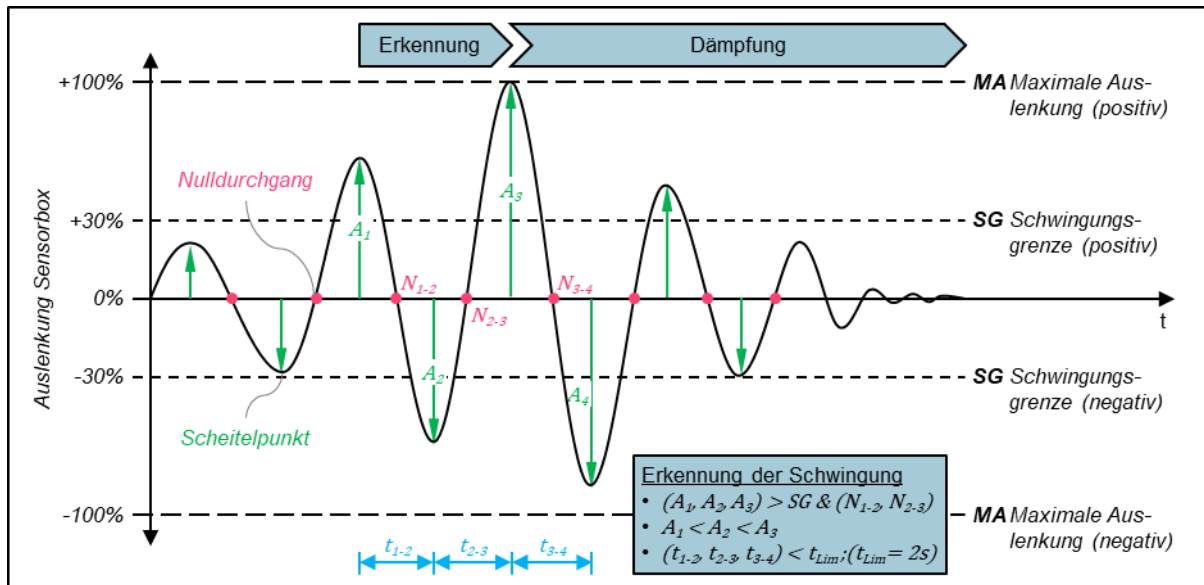


Bild 5.21: Anti-Pendel-Funktion – Erkennung, (schematisch)

Anti-Swing-Function – Detection, (schematic)

Die Auswertungen der Funktion am Demonstrator mit der ATS-Box ergaben, dass selbst synthetisch hervorgerufene Aufschwing-Vorgänge durch den Bediener innerhalb weniger Pendelbewegungen und im Zeitraum von wenigen Sekunden sicher gedämpft werden.

5.3 Validierung der Usability und Ergebnisse

Validation of usability and results

5.3.1 Ergonomievergleich – Kraftmesshandschuh

Ergonomic comparison – Force-Measurement-Glove

Zur Validierung der Ergonomie des IAD wurde ein Vergleich am Demonstrator durchgeführt. Hierfür wurden die ergonomisch wirkenden Kräfte am IAD-Demonstrator gemessen. Zum Vergleich wurde das gleiche Experiment am selben Demonstrator jedoch mit abmontierten Servoantrieben und ohne IAD-Funktionalität gemessen. Der Vergleich entspricht somit dem IAD-System mit dem gleichen rein manuell bedienten

System. Diese Vorgehensweise lässt eine direkte Vergleichbarkeit zu, was bei einem ähnlichen System in der Fabrik nicht möglich wäre. Die Gründe sind in den Unterschieden im Systemaufbau und den ungleichen Rahmenbedingungen zu finden.

Zur Messung der ergonomischen Kräfte wurde ein Kraftmesshandschuhsystem verwendet. Das genutzte Equipment ist in **Bild 5.22** dargestellt und erlaubt eine konstante Kraftverlaufsmessung über mehrere Sensoren, die an Messhandschuhen angebracht sind. An dieser Stelle wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Messergebnisse nur dem Vergleich dienen und das System keine kalibrierten und verifizierten Absolutwerte ausgibt.

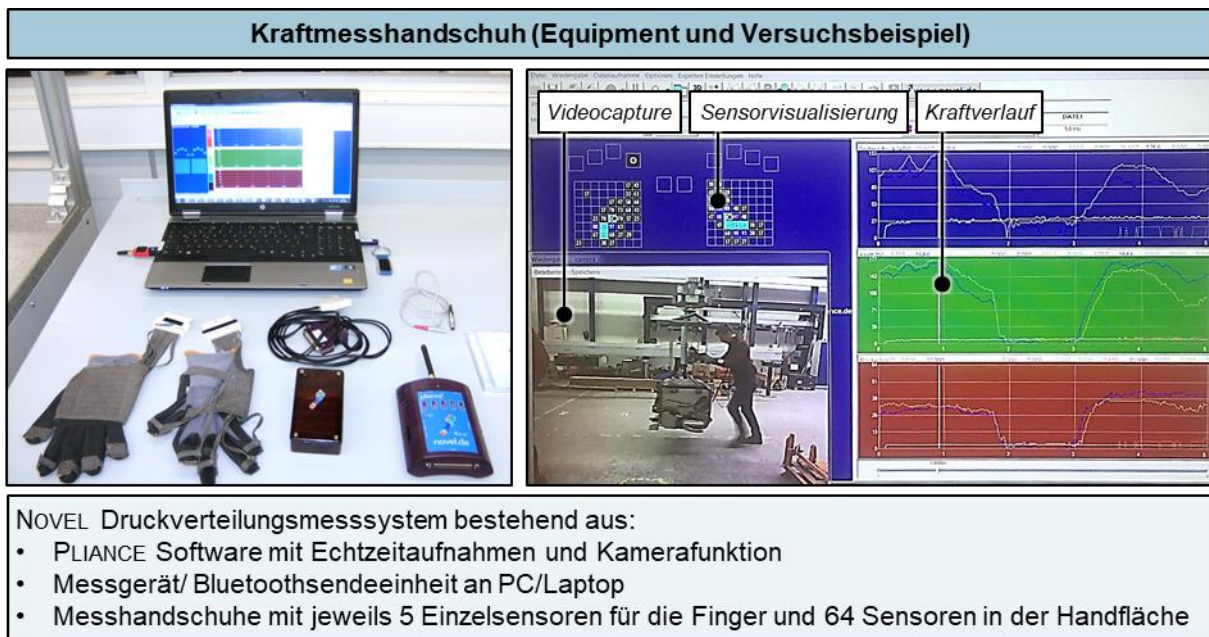


Bild 5.22:Kraftmesshandschuh Equipment

Force-Measurement-Glove equipment

Die permanente Kraftverlaufsmessung mit den Kraftmesshandschuhen bietet im Vergleich zu herkömmlichen Ergonomieanalysen dennoch eine bessere Aussagefähigkeit und Belastbarkeit. Bei herkömmlichen Ergonomieanalysen wird z.B. oft nur mit einfachen Federkraftmessern und mit Schätzwerten gearbeitet. Zugleich liegt der Fokus stark auf der Analyse der Körperhaltungen und der Wiederholhäufigkeiten. Für einen direkten Systemvergleich wird das Augenmerk der Untersuchung daher auf die vorherrschenden Körperhaltungen und Kraftausübungsrichtungen gelegt, die in ein standardisiertes Experiment einfließen.

Das Experiment wird jeweils mit der IAD und mit dem rein manuell betriebenen System durchgeführt. Darin enthalten sind jeweils zwei Versuchsreihen. Die Vorgehensweise und die schematische Versuchsdurchführung sind in **Bild 5.23** abgebildet.

Bei der ersten **Messreihe „B“** werden die Handkräfte gemessen, die beim Drücken/Anschieben und Ziehen/Abbremsen der Last nach vorne auftreten. Die Versuchsreihe „B“ bildet im wesentlichen beispielhafte Belastungen für den Teil „Zuführen“ ab. Bei der zweiten **Messreihe „C“** werden die seitlich nach innen

wirkenden Handkräfte für eine kurze seitliche Positionierbewegung gemessen. Die Versuchsreihe „C“ deckt somit die Messungen der beispielhaften Belastungen für den Teil „Positionieren“ ab.

Mit den Krafthandschuhen wurden bei den Messreihen die Sensoren der Handinnenflächen ausgewertet und jeweils die Maximalwerte beim Beschleunigen am Start und beim Abbremsen der Last im Ziel ausgelesen. Die Probanden hatten die Anweisung, die Bewegung so schnell wie möglich auszuführen.

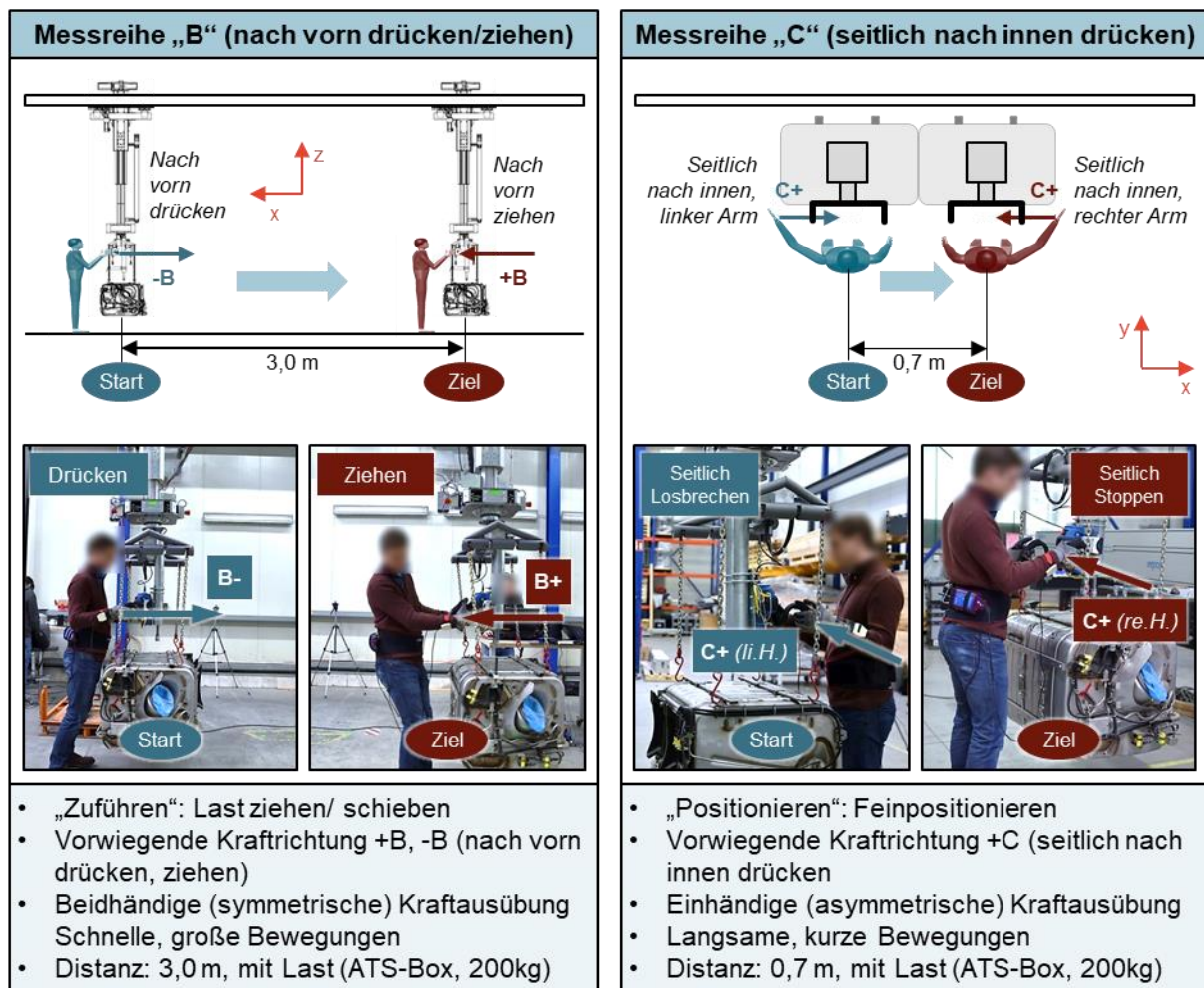


Bild 5.23: Ergonomie-Messreihen Kraftmesshandschuh – Vorgehensweise

Ergonomics test series Force-Measurement-Glove – Procedure

Insgesamt wurden bei jeder der vier Messreihen jeweils zehn Wiederholungen durchgeführt. Bei der Messreihe „B“ wurden die beiden Maximalkräfte von linker und rechter Hand addiert. Bei Messreihe „C“ wurden ebenfalls die Maximalkräfte beider Hände addiert. Hier wurde die Beschleunigung aber hauptsächlich einhändig mit der linken Hand und das Abbremsen einhändig mit der rechten Hand umgesetzt. Aus den einzelnen Messwerten jeder Messreihe wurde der Mittelwert berechnet. Die Ergebnisse sind im Diagramm in **Bild 5.24** visualisiert.

Werden die Mittelwerte des manuellen Systems (HHG) mit dem unterstützenden System (IAD) verglichen, so ist eine Reduktion der aufzubringenden Körperkräfte von

46 % beim Drücken und Ziehen sowie um 48 % bei seitlich nach innen wirkender Kraufausübung zur Steuerung der Bewegungsrichtung erkennbar. Damit existiert ein großes validiertes Verbesserungspotential durch den Einsatz der IAD Technologie, das die ergonomischen Belastungen um knapp die Hälfte reduzieren kann.

In der Praxis kann die Bedienkraftreduktion noch größer ausfallen. Hauptgrund ist die Beschleunigung des IAD-Systems. Aufgrund der Aufgabenstellung, die Last so schnell wie möglich vom Start- zum Zielpunkt zu bringen, werden zum Teil sehr hohe Kräfte gemessen.

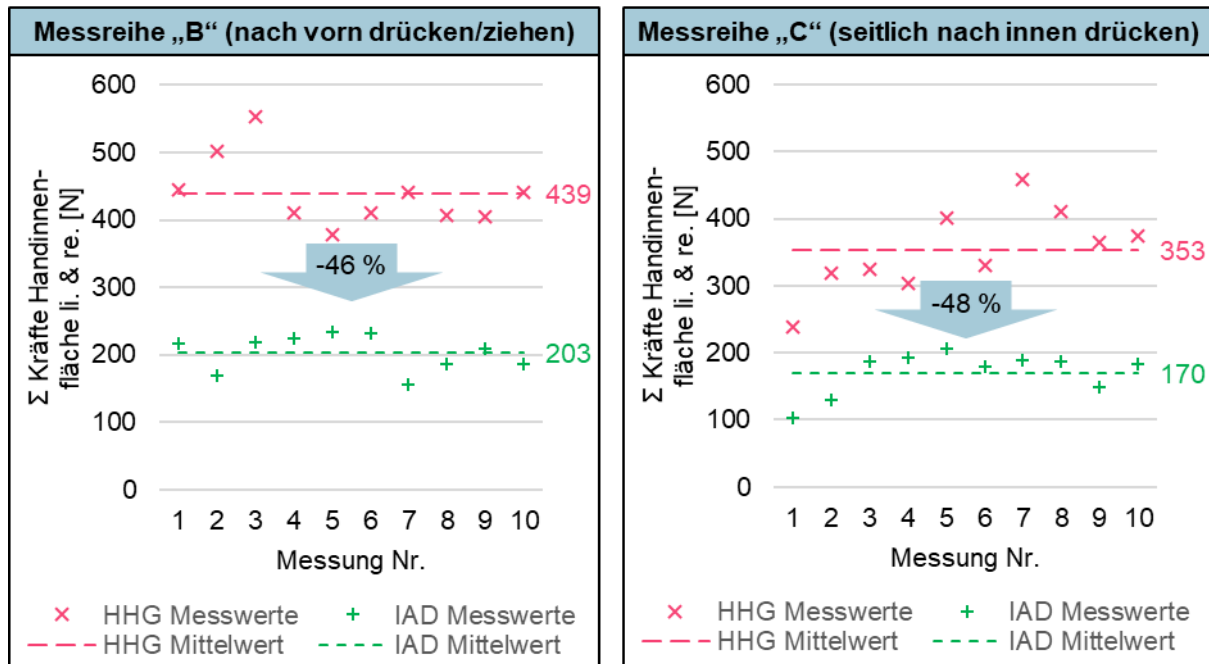


Bild 5.24: Messreihenergebnisse Kraftmesshandschuh

Test series findings Force-Measurement-Glove

Begründet ist dieser Sachverhalt in der Reaktionsgeschwindigkeit des IAD. Würde der Bediener darauf hingewiesen, eine Beschleunigung der Last mit reduzierter Kraft durchzuführen, würde die benötigte Prozesszeit aufgrund der Antriebsregelung genauso schnell erfolgen. Die Antriebe und die Regelung sind hierbei der limitierende Faktor. Bei den IAD Messreihen wurde erkannt, dass der Bediener versucht durch eine höhere Bedienkraft die Beschleunigung zu erhöhen. Diese ist jedoch ab Erreichen der Maximalauslenkung der Sensorbox unabhängig von der manuellen Bedienkraft. Allerdings sind so die Messwerte beider Systeme (HHG und IAD) miteinander vergleichbar. So weisen auch die Prozesszeiten für die Experimente keine erkennbaren Unterschiede auf. Die Messwerttabellen befinden sich im Anhang in **Tabelle 8.11** und **Tabelle 8.12**.

5.3.2 Teilautomatisierbarkeit des IAD

Semi-Automation capacity of IAD

Das im Rahmen der Arbeit konzipierte und als Demonstrator aufgebaute IAD-Konzept mit Sensorbox ist in seiner Grundfunktionalität als servomotorisch angetriebener Manipulator einzuordnen. Durch die speicherprogrammierbare Steuerung in Kombination mit der Sensorbox und den Servoantrieben können jedoch erweiterte Funktionsumfänge und programmierbare Funktionen wie eine Bahnführung implementiert werden. Damit lässt sich das IAD teilautomatisieren (vgl. Kap. 2.5).

Die Teilautomatisierungsfunktion des IAD wird im Vergleich zu den Zusatz- und Sicherheitsfunktionen aus Kapitel 5.2.4 als Komfortfunktion verortet. Sie hat zum Ziel, einfache und nicht wertschöpfende Teilprozessschritte der Handhabungsbewegungen automatisiert durchzuführen. Darunter fallen im Wesentlichen zwei Szenarien.

Teilautomatisierungsszenarien

Das erste Szenario ist die Darstellung einer Fahrt des IAD in eine sog. „**Warte-Position**“. Nach der Vollbringung von arbeitsvorbereitenden Tätigkeiten wird hierbei vorerst die Last am Bereitstellungsort vom Bediener mit der IAD aufgenommen und angehoben. Durch die anschließende Aktivierung der Automatikfunktion wird die Last auf eine zuvor einprogrammierte Warte-Position transportiert.

Das zweite Szenario beinhaltet die Automatikfahrt auf die sog. „**Home-Position**“. Die Home-Position ist eine spezifisch einprogrammierte Position, in der das IAD ohne Last sicher „geparkt“ wird und für den nächsten Einsatz durch die Bedienperson bereitsteht. Im Prozessbeispiel würde der Bediener nach der Handhabung und Montage der Last das IAD ohne Last per Automatikfunktion aus dem Montagebereich auf seine Home-Position im Bereitstellungsbereich zurückschicken. Somit kann er sich direkt einer weiteren wertschöpfenden Tätigkeit widmen.

Zur Umsetzung der Teilautomatisierbarkeit in Bezug auf die o.g. Szenarien gilt es verschiedene Spezifikationen, Richtlinien und Normen zu beachten. Das Ziel dieses Kapitels ist es, eine generelle Aussage zur Umsetzbarkeit der Teilautomatisierbarkeit zu treffen.

Betriebsarten

Wird das IAD in seiner Basisfunktionalität mit der handgeführten Bedienung genutzt, kann das System als Manipulator klassifiziert werden (vgl. Kap. 2.4, Manipulatoren). Hierbei muss es neben den einschlägigen Anforderungen der EG-Maschinenrichtlinie die konkretisierten Anforderungen (vornehmlich Sicherheitsanforderungen) der [DIN EN 14238] erfüllen.

Während einer Automatikfahrt ist das IAD jedoch aufgrund der frei programmierbaren Bewegung als Industrieroboter zu klassifizieren (vgl. Kap. 2.3). In diesem Fall gelten die Normen für Sicherheitsanforderungen der Industrieroboter ([DIN EN ISO 10218-1];

[DIN EN ISO 10218-2]). Basierend auf diesen Normen sieht das Konzept zuerst vor, einen expliziten Betriebsartenwechsel zwischen Manipulator- und Roboterbetrieb des IAD zu implementieren. Der Betriebsartenwechsel ist anhand des exemplarischen Montageprozesses der Katalysatorbox schematisch in **Bild 5.25** beschrieben.

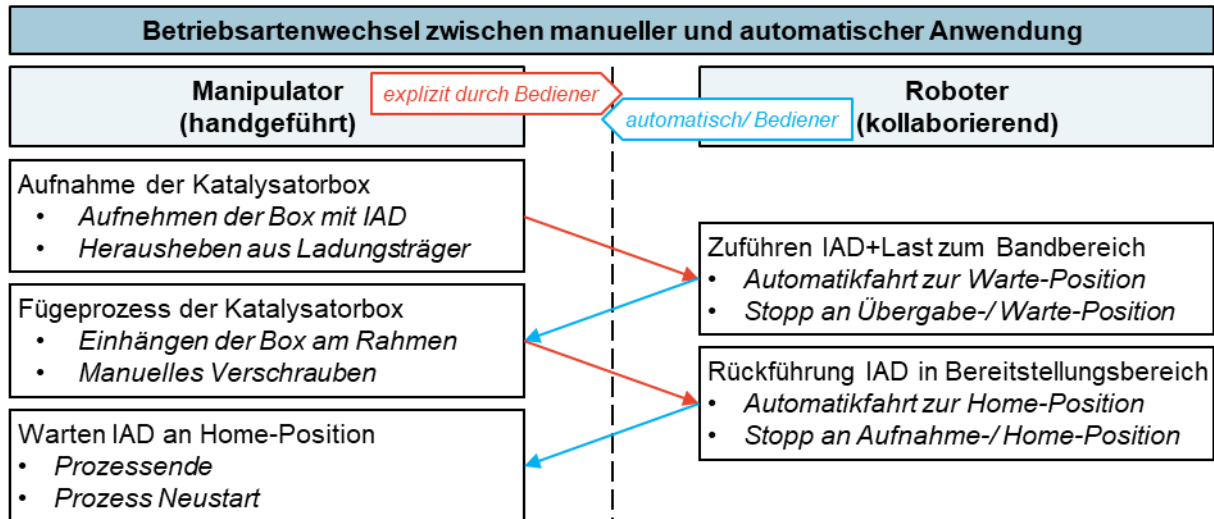


Bild 5.25: Wechsel zwischen Betriebsarten Manipulator und Roboter

Change between operating modes Manipulator and Robot

Ein Wechsel in den Automatikbetrieb ist in jeder Situation nur zu festen Bedingungen in Form einer expliziten Bedienerabsicht möglich. Zwischen den Betriebsarten kommt es zu keiner Abschaltung von Sicherheitsfunktionen des IAD (z.B. Funktionen wie Not-Halt, Sicherheitshalt und sichere Überwachung von Maschinenparametern wie Geschwindigkeit und Drehmoment). Somit ist bei beiden Betriebsarten der volle Umfang der implementierten Sicherheitsfunktionen aktiv.

Grundlegendes Sicherheitskonzept für schutzaunlosen Betrieb

Für den Roboterbetrieb soll aufgrund der Praxisanforderungen ein schutzaunloser Betrieb geprüft werden, was einen kollaborierenden Roboter-Betrieb des IAD impliziert.

Als am besten passender Ansatz wird daher das geforderte Schutzprinzip „Leistungs- und Kraftbegrenzung durch inhärente Konstruktion oder Steuerung“ gewählt (vgl. Kap 2.5, Einordnung der assistierenden Handhabungstechnik). Nach [DIN EN ISO 10218-1, S. 22] ist das IAD als Roboter dabei nur ein Baustein im kollaborierenden Robotergesamtsystem. Für den Einsatz in der Praxis ist somit eine Risikobeurteilung während der Planung und Auslegung des Systems durchzuführen und die Anwendung der Automatikfahrt auf Basis der vorherrschenden Randbedingungen am Einsatzort genau festzulegen.

Abgesehen von den konkreten Randbedingungen eines Gesamtsystems in der tatsächlichen Einsatzumgebung kann ein solches Konzept mögliche Kollisionen zwischen System und Objekten aber auch zwischen System und Menschen, die sich

im Arbeitsraum befinden, nicht ausschließen. Es kann also zu beabsichtigtem und vor allem unbeabsichtigtem physischen Kontakt zwischen der IAD und dem Bediener kommen. Die Norm [DIN ISO/TS 15066] bietet hierbei Informationen zur Gestaltung des kollaborierenden Roboterbetriebs.

Neben den eher üblichen Sicherheitsfunktionen wird daraus für das IAD im Wesentlichen eine Funktionsanforderung abgeleitet, die das System in Bezug auf Leistung und Kraft begrenzt, um mögliche Gefahren bei Körperkontakt zu reduzieren und gegebene Grenzwerte einzuhalten. Im kollaborierenden Betrieb muss somit abgesichert sein, dass bei einem möglichen quasistatischen Kontakt mit der Bedienerperson die Gefährdung unterhalb der Belastungsgrenze gehalten wird. Das bedeutet, dass der mögliche beabsichtigte oder unbeabsichtigte Kontakt zwischen einer Bedienerperson und einem Teil des Robotersystems abgesichert sein muss. Hierzu zählen insbesondere Situationen, bei denen ein Körperteil der Bedienerperson zwischen einem beweglichen Teil des IAD und einem anderen feststehenden oder beweglichen Teil der Umgebung eingeklemmt sein können. Die technische Spezifikation [DIN ISO/TS 15066, S. 29–41] gibt dafür biomechanische Grenzwerte im Rahmen des darin enthaltenen Körpermodells an.

Um quasistatische als auch transiente Kontakte des IAD mit der Bedienerperson abzusichern, sollen Kontaktsituationen im Automatikbetrieb mit Hilfe der Sensorboxauslenkung erkannt werden. Gleichzeitig soll die Kinematik der Sensorbox als sog. Wegverzehreinrichtung dienen. Die Auslenkung der Sensorbox bei einem Kontakt soll damit den zurückzulegenden Weg des IAD für die Ansprech- und Anhaltezeit bis zum sicheren Halt ausgleichen und Kräfte absorbieren. Das für die Teilautomatisierung des IAD entworfene Steuerungs- und Sicherheitskonzept zur Erkennung eines Kontakts ist schematisch in **Bild 5.26** abgebildet.

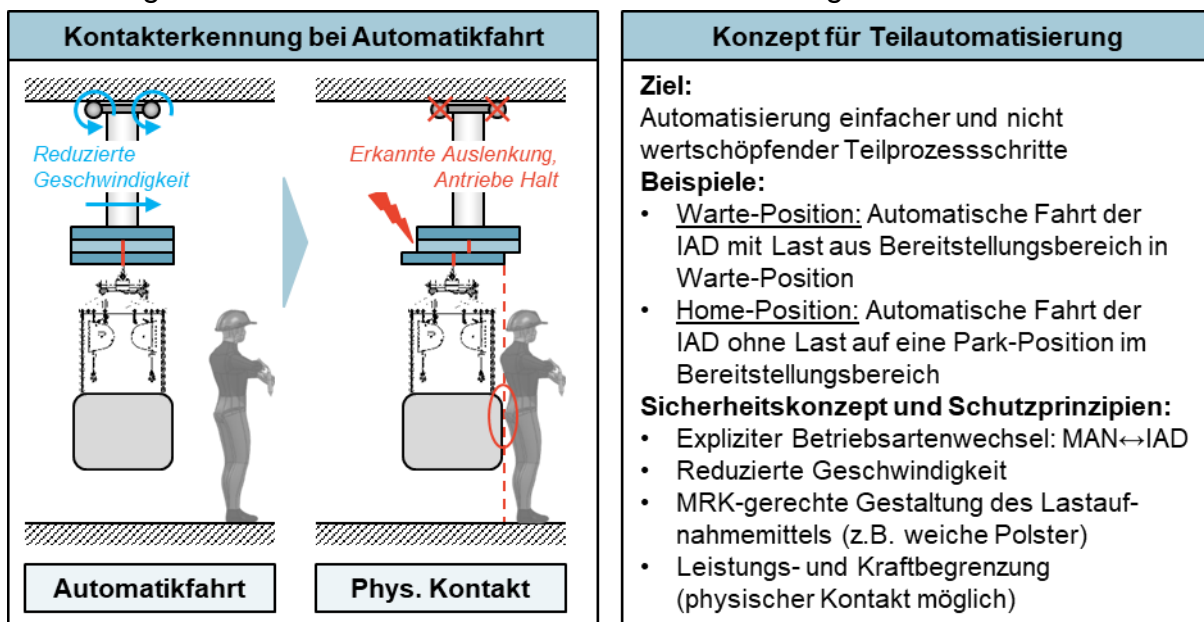


Bild 5.26: Teilautomatisierungs- und Sicherheitskonzept für IAD auf Basis Sensorbox
Semiautomation- and Safety-Concept for IAD based on Sensorbox

Im Rahmen des Demonstrators wurden zur Erhöhung der passiven Sicherheit das Lastaufnahmemittel MRK-gerecht gestaltet und mit dämpfenden Polstern versehen. Das IAD wurde im Automatikbetrieb mit einer sicher überwachten reduzierten Geschwindigkeit des Lastaufnahmemittels betrieben. Die Geschwindigkeit der Automatikfahrt ist abhängig von der Masse und der Fläche, die mit der Bedienperson kollidieren kann. Allgemein liegt sie jedoch unter 250 mm/s. Für den Demonstrator wurde eine Geschwindigkeit von 150 mm/s gewählt. Das entspricht einer natürlichen menschlichen Bewegungsgeschwindigkeit und ermöglicht die Einhaltung der zur Verfügung stehenden Prozesszeit.

Kontakt-/Kollisionsversuche

Um eine generelle Aussage zur Tauglichkeit des zuvor beschriebenen basalen Sicherheitskonzepts treffen zu können, wurde im Rahmen der Arbeit anhand des Demonstrators und unter Begleitung von Experten der DGUV ein Versuch zu Kollisionskräften bei möglichen Kontaktfällen durchgeführt. Hierzu wurde der Demonstrator mit Lastaufnahmemittel und Last in der Versuchsumgebung betrachtet (siehe **Bild 5.27**).

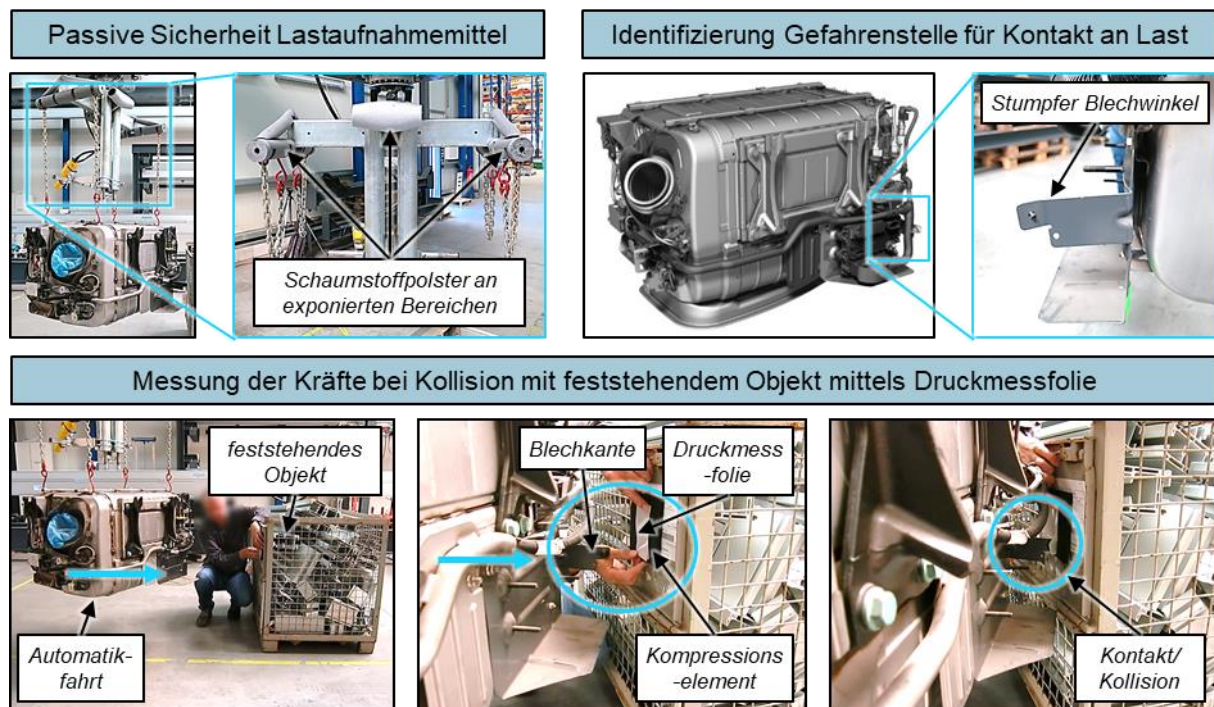


Bild 5.27:Kraftmessung möglicher Kontakt-/Kollisionsfall

Force impact measurement for possible contact-/collision case

Das Lastaufnahmemittel wurde hierzu mit passiven konstruktiven Schutzmaßnahmen ausgestattet. Dazu gehören z.B. abgerundete Kanten und Ecken sowie Polsterung an exponierten Stellen zur Abfederung und Energieaufnahme bzw. zur Reduzierung der Stoßkräfte im Kontaktfall. Das Lastaufnahmemittel inkl. des Schraubwerkzeugs kann daher als unkritisch betrachtet werden. Mögliche zu untersuchende Gefahrenstellen wurden hingegen an der zu handhabenden exemplarischen Last, der Katalysatorbox

erkannt. An ihr wurden verschiedene Störkonturen erkannt. Die exponierteste und als problematisch eingeschätzte Stelle ist ein seitlich hervorragender stumpfer Blechwinkel, da die größte Verletzungsgefahr erfahrungsgemäß von Blechkanten ausgeht. Bei einer möglichen Kollision mit der Bedienperson auf Beinhöhe steht nur eine vergleichsweise geringe Kontaktfläche für die Energieaufnahme zur Verfügung, was zu hohen Stoßkräften führen kann. Zur Ermittlung der entstehenden Druckkräfte wurden Versuche mit Druckmessfolie durchgeführt. **Bild 5.27** zeigt die Messung für den identifizierten hervorstehenden Blechwinkel der Katalysatorbox. Das IAD wurde dabei im Automatikbetrieb betrieben. Die Last bewegte sich dabei auf einer linearen Strecke mit einer Geschwindigkeit von 150 mm/s. Für den Kollisionsversuch wurde ein feststehendes Objekt (Ladungsträger) auf der Bewegungsbahn des IAD platziert.

Bei der Versuchsdurchführung wurde eine statische Messung der Stoßkraft bei Kontakt durchgeführt. Hierzu wurde eine druckempfindliche FUJIFILM Folie (50-250 N/cm²) verwendet, die nach der Kollision gescannt und per Software ausgewertet wird (siehe **Bild 5.28**).

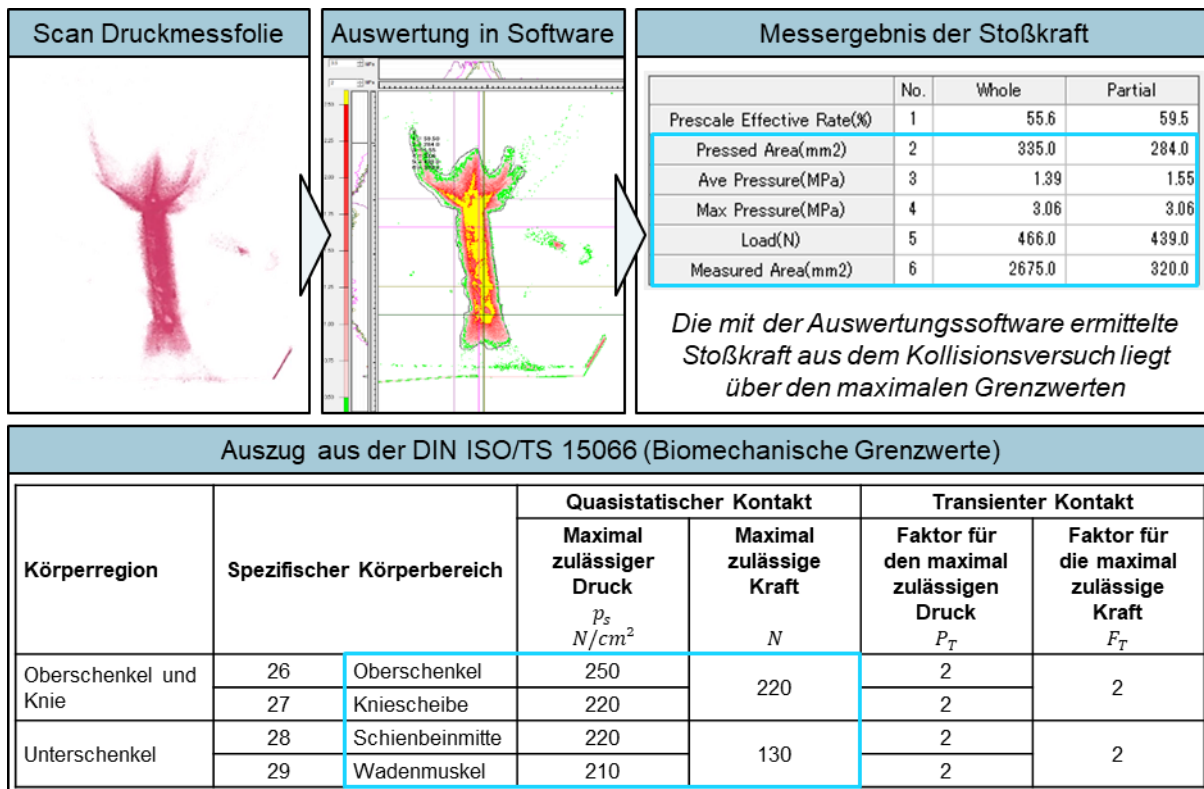


Bild 5.28: Auswertung der Kraftmessung für möglichen Kontakt-/Kollisionsfall

Evaluation of force impact measurement for possible contact-/collision case

Die Folie ist mehrschichtig aufgebaut. Die erste Lage der Druckfolie (A-Film) enthält dabei eine mikroverkapselte Farbschicht, die abhängig vom entstehenden Druck aufplatzt und freigegeben wird. Die zweite Lage der Druckfolie (C-Film) wird dadurch eingefärbt und es entstehen je nach Kraft und Druck unterschiedlichen Farbabstufungen, die die entstehenden Belastungen visualisieren. Bei der Messung wird im Anschluss pro Farbpartikel eine Maximalkraft und somit die Stoßkraft ermittelt

(keine dynamische Messung und keine Flächenkraft). Weiterhin wurde zur Druckmessung an das feststehende Objekt ein standardisiertes Kompressionselement aus Schaumstoff/Hartgummi und darauf die Druckmessfolie angebracht. Das Kompressionselement simuliert dabei das für die Kollision in Frage kommende Körperteil (z.B. Beinbereich). Bei der Kollision der Last mit der exponierten Stelle wird somit ein quasistatischer Kontakt bzw. ein Einklemmen mit dem menschlichen Körper simuliert.

Die Druckmessfolie wird im Anschluss gescannt, um dann mit Hilfe einer speziellen Auswertungssoftware verarbeitet und interpretiert zu werden. Das gescannte sowie interpretierte Bild mitsamt den Messergebnissen für oben beschriebenen Kontaktfall ist in **Bild 5.28** abgebildet. Die ermittelte Druckkraft überschreitet dabei den Messbereich der Folie von max. 250 N/cm² (gelb markierter Bereich auf dem Auswertungsbild). Die bei der Kollision auftretende Überschreitung der Grenzwerte hat zur Folge, dass Automatikfahrten mit eingehängter Last (Katalysator-Box) entsprechend den Grenzwerten und auch laut DGUV nicht zulässig sind. Die maximale Kraft muss laut der DIN ISO TS 15066 bspw. im Bereich „Oberschenkel“ unter 250 N/cm² liegen. Dieser Wert wird bei der Kollision bereits deutlich überschritten und weitere Körperregionen haben noch deutlich geringere Grenzwerte. Auch eine weitere Messung mit reduzierter Geschwindigkeit von 100 mm/s kam zu der gleichen Erkenntnis. Eine weitere Geschwindigkeitsreduzierung wäre aus Prozesszeitgründen nicht mehr sinnvoll.

Kollisionen mit scharfen Blechkanten werden grundsätzlich von der Norm, aufgrund zu großer Verletzungsgefahr, ausgeschlossen. Die Versuche mit der Druckmessfolie bestätigen das und verdeutlichen zudem, dass auch typische stumpfe Blechkanten, die neben der Katalysatorbox ebenfalls bei vielen weiteren Handhabungs- und Montageobjekten in der Nutzfahrzeugindustrie vorkommen, eine Automatikfahrt ohne zusätzliche Sicherheitskonzepte und Schutzprinzipien nicht ermöglichen.

Beurteilung der Teilautomatisierung

Basierend auf dem IAD-Demonstrator wäre daher nur eine Automatikfahrt ohne Last denkbar. Hierfür müssten die verschiedenen Möglichkeiten zur Minimierung der Verletzungsgefahr umgesetzt werden. Dazu gehören im Wesentlichen die Reduktion der Kollisionsgefahr mit dem Lastaufnahmemittel auf Kopfhöhe durch die Verwendung von Polstern. Weiterhin muss das Schraubaggregat, das im Demonstrator nur als Attrappe ausgeführt ist, umhaust werden.

Wird davon ausgegangen, dass ein derartiges teilautomatisiertes IAD-System offiziell in Verkehr gebracht wird, müsste eine Risikobeurteilung aller Systemkomponenten (bspw. der Sensorbox) durchgeführt werden. Darüber hinaus müsste zudem aus Gründen der Produkthaftung eine Zertifizierung der redundanten Ausführung der Sensorik der Geschwindigkeitsüberwachung und der Kraft-Momenten-Überwachung inklusive des sicheren Halts bei Wechsel der Betriebsmodi erfolgen. Das beinhaltet

ferner z.B. die Verwendung sicherer Resolver und referenzierter Absolutwertgeber für die Automatikfahrt sowie sichere Eingänge und Programmbausteine der SPS.

Diese Themen konnten im Rahmen der Arbeit nur in Ansätzen umgesetzt und analysiert werden und überschreiten den Forschungsaspekt. Sie müssten im Falle einer Produktifizierung des IAD durch mögliche Hersteller oder Inverkehrbringer umgesetzt und in Vorbereitung für die Konformitätserklärung dokumentiert werden.

Eine Automatikfahrt mit Lasten mit scharfen Kanten sowie spitzen Formen und Blechen, wie sie grundsätzlich bei der Katalysatorbox oder ähnlichen Lasten vorkommen, ist jedoch mit dem auf der Sensorbox basierten Sicherheitskonzept generell nicht umsetzbar. Der Aufwand zur Integration der Automatikfahrt steht daher nicht dem vollen möglichen Nutzen gegenüber, da nicht alle Szenarien bedient werden können.

5.3.3 Prototyp LCA-Lastaufnahmemittel

Prototype LCA-Load-Attachment-Device

Zur Validierung des in Kapitel 4.4 vorgestellten Konzepts einer Vorgehensweise zur strukturierten Entwicklung eines auf Low-Cost-Automation-Prinzipien basierenden Lastaufnahmemittels wurde im Rahmen der Arbeit ein Prototyp für den exemplarischen Montagefall der ATS-Box entwickelt. Der Schwerpunkt des Entwurfs liegt dabei in der Umsetzung der Orientierbewegungen. Das LAM bildet im Gesamtsystem IAD die kinematische Regionalstruktur ab und soll somit die Rotationsbewegungen der Last führen.

Zur Umsetzung wurden die in Kapitel 4.4.1 definierten Anforderungen weiter detailliert und bezugnehmend auf den konkreten Anwendungsfall der Montage der ATS-Box angepasst (z.B. Anforderungen hinsichtlich dem Grad der Rotationsbewegungen). Im Anschluss wurde basierend auf der in Kapitel 4.4.3 ermittelten Funktionsstruktur eine Lösungsfindung im Rahmen eines interdisziplinären Workshops initiiert und umgesetzt. Als Kreativitätstechnik für die Lösungsfindung der Teilfunktionen wurde hierbei die 6-3-5-Methode „Brainwriting“ angewandt. Die daraus resultierten Ergebnisse der Teillösungen der Gruppe „Last orientieren“ (vgl. **Bild 4.11**) sind in aufbereiteter Form im Anhang abgebildet und stehen als Ideengrundlage zur Verfügung (s. Kap. 8, Anhang, **Bild 8.3** bis **Bild 8.6**).

Die generierten Teillösungen wurden in der Entwurfsphase in einen morphologischen Kasten übertragen, mit dessen Unterstützung durch Kombination Gesamtlösungen ausgearbeitet und anschließend als Entwurfsskizzen dargestellt wurden. Die daraufhin folgende technische Bewertung und ein paarweiser Vergleich identifizierten die Konzeptidee „sphärisches Gelenk“ als am besten passender Entwurf. Der Entwurf wurde weiter detailliert und angepasst. Als wichtiges Merkmal wurden dem Prinzip des sphärischen Gelenks noch biegeschlaffe Elemente als Anschlagmittel zur Lastaufnahme hinzugefügt. Dabei bilden zwei über Kreuz angeordnete verschiebbare kreisbogenförmige Traversenträger den Kern der Lastaufnahmevorrichtung. An ihren

Endpunkten befinden sich jeweils die Anlenkpunkte für die biegeschlaffen Anschlagketten. **Bild 5.29** zeigt exemplarisch die Skizze und eine Entwurfsdetaillierung. Die Vorgehensweise basierend auf den ermittelten Anforderungen und der Funktionsstruktur hat unter Anwendung der Kreativitätstechnik in kurzer Zeit zu einem innovativen Ansatz geführt.

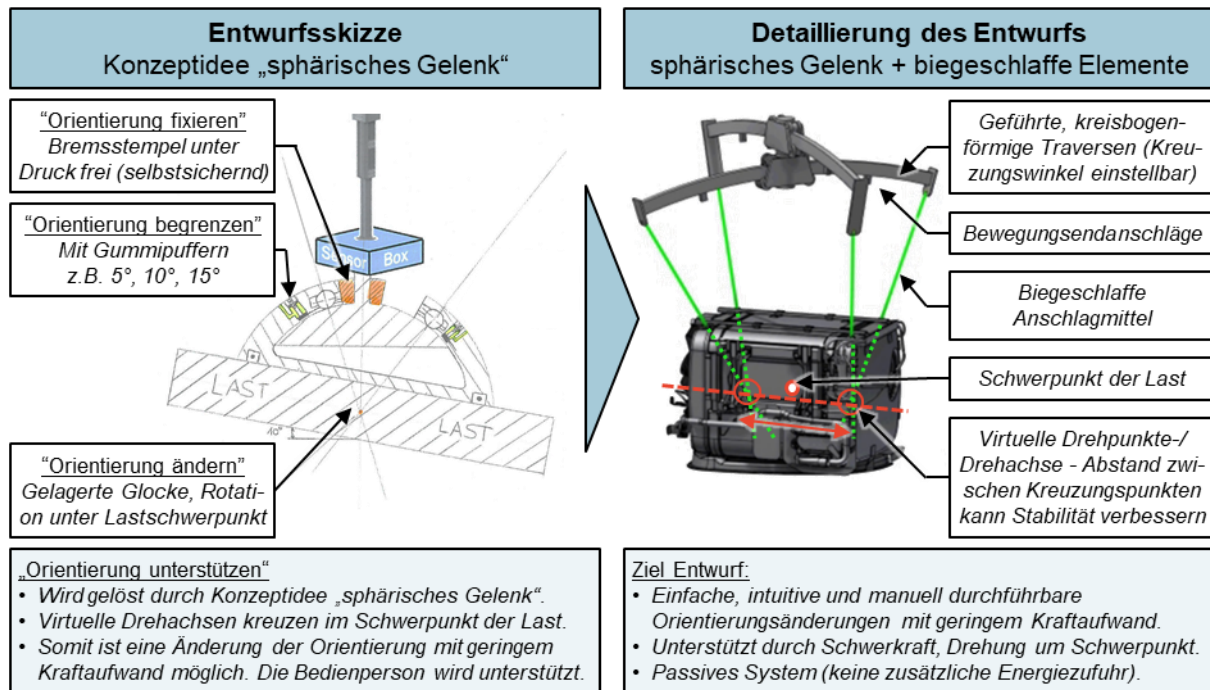


Bild 5.29: Beispiele aus Entwurfsphase Lastaufnahmemittel Konzept „sphärisches Gelenk“

Examples of designphase for load attachment device concept “spherical joint”

Ein Vorteil des Entwurfs ist die passive Ausführung ohne zusätzliche Energiezufuhr. Das ermöglicht der Bedienperson eine manuelle Durchführung der Orientierungsänderung der Last. Durch die Drehung um den Schwerpunkt unterstützt die Schwerkraft und die Bedienperson kann intuitiv und mit geringem Kraftaufwand eine Änderung der Orientierung der Last durchführen und sie somit optimal für den Montage- oder Fügeprozess einstellen.

Der aus der Idee „sphärisches Gelenk“ resultierende Entwurf wurde nach der Detaillierung sowohl als Prototyp aufgebaut als auch in Form einer Patentschrift angemeldet und offengelegt (s. [MATH17]). Der Prototyp ist in **Bild 5.30** abgebildet und zeigt die typischen Orientierbewegungen der Katalysatorbox im Montageprozess. Je nach Neigungswinkel des Lkw-Rahmens orientiert die Bedienperson die Neigung der Katalysatorbox einfach und manuell. Bei dem bestehenden Lastaufnahmemittel ist diese Bewegung nicht möglich.

Das Design der Lastaufnahmevorrichtung ist bereits so ausgelegt, dass einfache Anpassungen an ähnliche Lasten vorgenommen werden können. So kann bspw. der Kreuzungswinkel der Traversen justiert oder die Endanschläge und die Anlenkpunkte über ein Lochmuster in der Traverse konfiguriert werden. Die Verwendung der biegeschlaffen Elemente (Anschlagketten) bietet jedoch die geforderte Flexibilität der

bestehenden Lastaufnahmemittel z.B. beim Absetzen der Last. Dabei bilden zwei über Kreuz angeordnete verschiebbare kreisbogenförmige Traversenträger den Kern der Lastaufnahmevorrichtung. An ihren Endpunkten befinden sich jeweils die Anlenkpunkte für die biegeschlaffen Anschlagmittel.

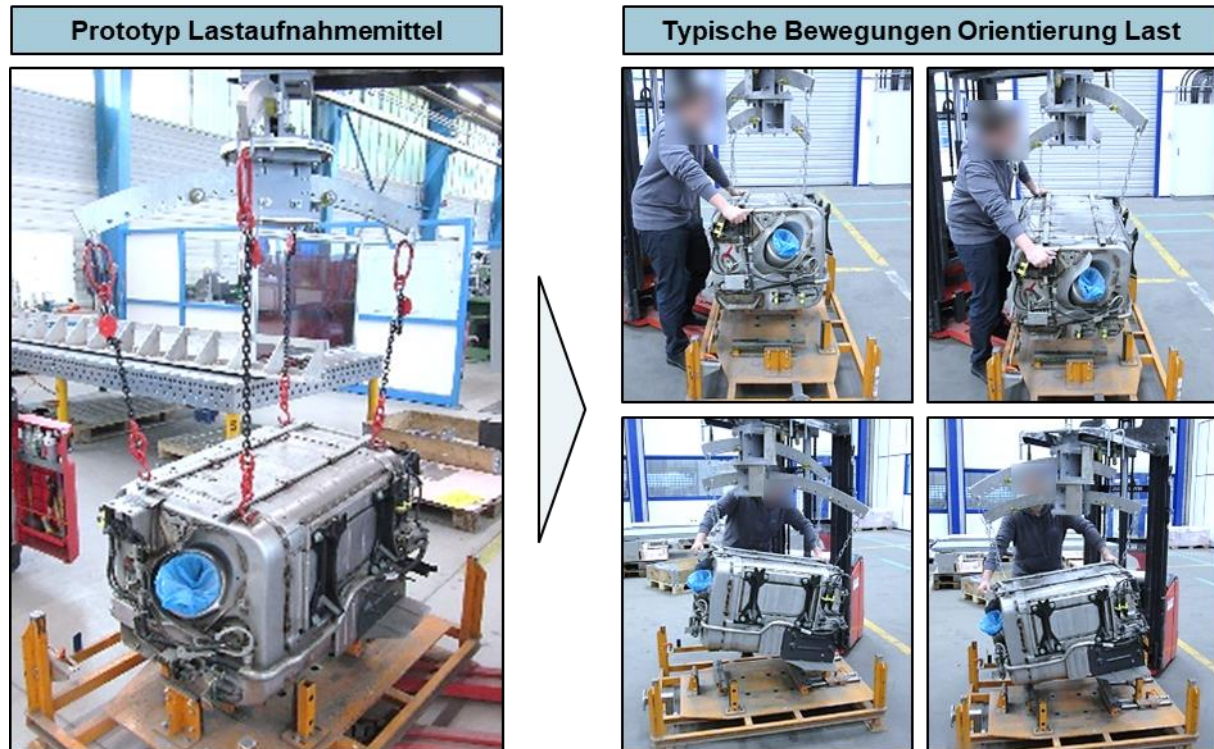


Bild 5.30: Prototyp Lastaufnahmemittel – Orientierkinematik

Prototype of load attachment device – Orientation Kinematic

Der Prototyp zeigt exemplarisch die Vorteile der Möglichkeit der einfachen schwerkraftunterstützten Orientierbewegung der Last mit Hilfe eines neuartigen Designs für Lastaufnahmemittel. Die integrierten Einstellmöglichkeiten ermöglichen jedoch nur eine genaue Anpassung an die Last. Nachteilig ist daher die Anforderung, das Lastaufnahmemittel möglichst eng auf die Last abzustimmen. So können bereits andere Varianten der Handhabungskomponente aufgrund einer abweichenden Schwerpunktlage das Bedienverhalten negativ beeinflussen. Dadurch bestätigt sich die Erkenntnis, dass das im Konzept entwickelte Modul der Orientierkinematik und Lastaufnahme immer eine spezifische Schnittstelle zur Last darstellt. Um die Vorteile der Idee in einer Anwendung im Serieneinsatz zu nutzen, müssten neben der genauen Anpassung an die Last insbesondere noch sicherheitstechnische Aspekte beachtet werden. Es gilt dabei besonders Quetschgefahren und unbeabsichtigtes Auslösen einer Bewegung zu verhindern.

5.3.4 Abschließender Vergleich mit Hauptanforderungen

Conclusive comparison with core requirements

Die vorigen Kapitel befassten sich mit spezifischen Themen der Validierung des realisierten IAD Konzepts. Abschließend wird in diesem Kapitel noch ein der Übersicht dienender Vergleich mit den in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Hauptanforderungen an das Konzept gezogen. Hierzu werden nachfolgend den ermittelten Hauptanforderungen die während den Validierungsversuchen gesammelten Erkenntnisse gegenübergestellt.

Um ferner zu den sog. „weichen“ Anforderungen, wie „Usability“ und „Werkerakzeptanz“, belastbare Aussagen treffen zu können, wird auf eine mit dem ZeMA durchgeführte Usability Studie verwiesen [MAIL17]. Die Studie wurde dabei mit dem Demonstrator am exemplarischen Montageprozess der Katalysatorbox durchgeführt. Dabei wurde das in **Bild 5.5** dargestellte konventionelle Lastaufnahmemittel für die ATS-Box verwendet. Weiterhin beinhaltet der Demonstratoraufbau neben der voll integrierten und parametrisierten Sensorbox den in **Bild 5.6** gezeigten Vertikalseilbalancer für die Vervollständigung der servomotorisch unterstützten Positionierbewegungen. Bei der Studie wurde unter anderem als praktischer Versuch der Handhabungs- und Montageprozess nachgestellt. Hierbei musste sowohl die ATS-Box zugeführt und am konstant geförderten Lkw-Rahmensegment eingehängt werden, als auch das Schraubwerkzeug positioniert und aufgesetzt werden. Die Studie beinhaltete die Teilnahme von zehn Probanden. Es handelt sich dabei um eine Kleinststudie deren Belastbarkeit, Erkenntnisse und Aussagen nur begrenzt ist. Nichtsdestotrotz sollen die Aussagen als grobes Gutachten der Zielerreichung behilflich sein und dienen der Vollständigkeit der Validierung.

Intuitive Bedienung „Usability“

Die intuitive Bedienung wurde durch die Steuerung an der Last umgesetzt. Für Vertikalbewegungen kann zwischen einem dedizierten Bediengriff oder dem Float-Modus gewählt werden. Bei der Befragung im Rahmen der Kleinststudie wurde die Bedienbarkeit des IAD von 40 % der Befragten als „intuitiv“ und von 60 % der Befragten als „sehr intuitiv“ eingeschätzt.

Höhere Werkerakzeptanz

Die Akzeptanz ist von vielen Faktoren abhängig. Generell wird angenommen, dass eine höhere Unterstützung zu einer besseren Akzeptanz führt. Im Rahmen der Befragung in der Kleinststudie wurde bspw. die Unterstützung des Systems bei sieben von zehn Personen als hoch bis sehr hoch angegeben. Darüber hinaus ergaben weitere Einzeltests durch Produktionsmitarbeiter ein positives Feedback zur Bedienung gegenüber den im Einsatz befindlichen Systemen.

Skalierbarkeit (Last/Arbeitsraum)

Die Verwendung von marktüblichen Kranbaukastensystemen für die Positionierkinematik ermöglicht eine einfache Skalierbarkeit hinsichtlich Last und Arbeitsraum. Die Systeme sind in verschiedenen Lastklassen erhältlich und die ZYX 111 Kinematik eignet sich am besten für die freie Konfigurierbarkeit der Größe des Arbeitsraums. Darüber hinaus bietet die Nutzung von Standardkomponenten für Antriebe und Steuerung weitere Skalierungseffekte. Einzig die Sensorbox müsste für verschiedene Lastkategorien ausgelegt werden. Es wird davon ausgegangen, dass eine Abstufung in 500 kg Schritten sinnvoll ist.

Modularität (Kinematik, Aktorik)

Der modulare Aufbau des Konzepts ermöglicht die Unterteilung des Systems in die gut standardisierbare Positionierkinematik und die spezifische Orientierkinematik. Aufgrund der Baukastenbasis der Positionierkinematik sind bspw. Ausführungen wie die Teleskopfunktion einfach umsetzbar. Weiterhin zeugt die Verwendung des konventionellen sowie prototypisch umgesetzten Lastaufnahmemittels von der Wandlungsfähigkeit und flexiblen Anpassbarkeit des Systems auf Basis der Modularität. Weiterhin ist es z.B. möglich die Aktorik der Vertikalbewegung modular und austauschbar zu gestalten. So können anstatt eines Vertikalseilbalancers auch ein kostengünstiger Kettenzug in die passiv ausgeführte Hubachse integriert werden. Somit sind verschiedene Systemkonfigurationen ausführbar.

Teilautomatisierungs-/MRK-Fähigkeit

Die in Kapitel 5.3.2 erläuterten Validierungsversuche gestatten eine grundsätzliche Teilautomatisierbarkeit des IAD. Aufgrund von Sicherheitsanforderungen ist diese Systemerweiterung jedoch in der Ausführung komplex und muss stets für den jeweiligen Einsatzort abgestimmt sein. Der Aufwand kann an dieser Stelle schnell den Nutzen übersteigen, der hauptsächlich in der Einsparung einzelner nicht wertschöpfender Prozesszeitanteile liegt. Sinnvoll kann die Teilautomatisierung bei konkreten und unveränderlichen Lasten wie bspw. Werkzeugen sein. In solchen Fällen ist eine Absicherung des Systems für Kollisionsfälle einfacher umzusetzen.

Kürzere Prozesszeiten und bessere Prozessqualität

Bei der Parametrierung und Optimierung des IAD-Systems wurde stark auf eine natürliche Auslegung des Systems geachtet, was sich bspw. in natürlichen Geschwindigkeiten der Handhabungsbewegung widerspiegelt. Kürzere Prozesszeiten sollen daher vielmehr als Nebeneffekt durch intuitivere Bedienung und bessere Unterstützung entstehen. So kann durch einfaches und genaues Positionieren der Montagekomponente oder des Werkzeugs beim Fügen eine höhere Prozessrobustheit erreicht werden. Das bedeutet weniger Wiederholungen. Ein gutes Beispiel ist die prototypisch umgesetzte Orientierkinematik, die es der Bedienperson

ermöglicht die Neigung der Katalysatorbox an die Rahmenneigung anzupassen. Damit kann intuitiv eine ideale Einfädelbewegung generiert werden.

Ergonomie-Verbesserungen (Körperkräfte/-haltung)

Das übergeordnete Thema Ergonomie ist bei der Handhabung schwerer Lasten stets von Bedeutung. Das IAD Konzept bietet durch die angetriebene und unterstützende Positionierkinematik einen messbaren Vorteil bei den aufzubringenden Körperkräften. Es ist jedoch wichtig die Handhabungsprozesse genau zu analysieren und auch die Orientierbewegungen bestmöglich zu unterstützen. Nur so können die Anforderungen als ergonomische Designelemente in den Aufbau eines IAD auf Basis des modularen Konzepts eingehen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Summary and Outlook

6.1 Zusammenfassung

Summary

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, ein neuartiges Handhabungs- und Montagekonzept für schwere Lasten in der Nutzfahrzeugindustrie zu entwickeln. Gefordert wird ein möglichst flexibles und modulares Konzept zum Aufbau eines intelligenten Unterstützungssystems zur Verbesserung der Ergonomie sowie der Qualität und Robustheit der Handhabungs- und Montageprozesse. Ein modularer und gleichzeitig skalierbarer Aufbau aus möglichst verfügbaren Technikkomponenten soll zu einer einfachen Übertragbarkeit des Forschungsergebnisses in den Fabrikbetrieb beitragen und dort vornehmlich eine zumindest kostenneutrale Alternative zu Kranen, Hebezeugen und einfachen Manipulatoren mit einer gleichzeitigen Prozess- und Ergonomieverbesserung darstellen. Die Usability in Form einer intuitiven und einfachen Bedienung sowie die Werkerakzeptanz standen im Zentrum der Entwicklung. Sie sollen es dem Bediener ermöglichen, die Bewegungen der Lasten möglichst einfach, effizient und intuitiv umzusetzen. Nicht zuletzt war die Teilautomatisierbarkeit einzelner Prozessschritte ein weiterer Punkt zur besseren Unterstützung des Mitarbeiters und zur Effizienzsteigerung am Arbeitsplatz.

Hierfür wurden im Rahmen der Arbeit zuerst die Grundlagen des Betrachtungsbereichs der Aufbaumontage geklärt, da dort die vergleichsweise größten Lasten und die schwierigsten Umgebungsbedingungen bspw. durch die kombinierte Fließmontage bestehen. Ein wichtiger Aspekt war hierbei die grundlegende Betrachtung der Freiheitsgrade der Handhabungsbewegung für das Positionieren und Orientieren des Lastobjekts. Weiterhin lassen sich die betrachteten Handhabungsprozesse in der Montage aus Prozesssicht in die Anteile Zuführen und Montieren unterteilen. Diese Grundlagen dienten im weiteren Verlauf als Fundament für die Ausarbeitung des Konzepts. Ergänzend erfolgte eine Gliederung von Handhabungs- und Bewegungseinrichtungen, um die technischen Grundlagen und den Stand der Technik zu beleuchten. Ein zentrales Unterscheidungsmerkmal der Bewegungseinrichtungen ist dabei die Art der Steuerung. Der aktuelle Stand der Technik in Forschung und Industrie befasst sich vermehrt mit teilautomatisierbaren intelligenten Unterstützungssystemen (IAD), die durch ihre speziellen Funktionen die Grenzen der klassischen programm- oder manuell gesteuerten Bewegungseinrichtungen verschmelzen lassen und den Menschen bei der Durchführung von Handhabungsprozessen assistieren und unterstützen.

Zum Aufbau des Konzepts wurden basierend auf einer umfassenden Analyse der Handhabungsprozesse und Betriebsmittel der Lkw-Montage zuerst generelle Konzeptanforderungen abgeleitet. Hierzu wurden unter anderem die kinematischen

Strukturen der Handhabungsgeräte analysiert und verglichen. Als ideale Regionalstruktur für das Zuführen der Lasten wurde eine kinematische Kette mit drei rechtwinklig zueinander angeordneten Schubgelenken identifiziert. In der Praxis lässt sich diese Regionalstruktur in Form einer Hubachse an Deckenschienen darstellen. Diese Kombination lässt sich in vielen Kranbaukastensystemen wiederfinden und modular und skalierbar konfigurieren. Weiterhin wurde der exemplarische Montageprozess der Katalysatorbox ausgewählt. Er repräsentiert einen Großteil der Konzeptanforderungen und dient der praxisnahen Entwicklung und Validierung.

Als Bilanz der Analyse wurde als Ziel des zu entwickelnden Bewegungsgeräts der neuartige Typ eines intelligenten Unterstützungssystems (IAD) mit der o.g. kinematischen Struktur identifiziert. Dabei soll als wesentliches Element der Bedienung die direkte Steuerung an der Last und eine propriozeptive Wahrnehmung für die Handhabung der Last bei servomotorischer Unterstützung ermöglicht werden. Auf Grundlage dieser Anforderungen wurde ein modular aufgebautes Konzept für ein IAD entwickelt. Hierbei ist die Kinematik in eine aktiv angetriebene Regionalstruktur für das Zuführen der Last (die Positionierkinematik) und eine passiv ausgeführte Lokalstruktur zum Orientieren der Last (Orientier-Kinematik und Lastaufnahme) unterteilt. Aus Gründen der Skalierbarkeit des Arbeitsraums und der zu hebenden Last basiert die Positionier-Kinematik auf marktüblichen KBK-Systemen. Für die last- und prozessspezifische Lokalstruktur wurde hingegen eine Methodik zur Generierung von Lastaufnahmemitteln mit Low-Cost-Automation Ansätzen entworfen. Im Zentrum der Entwicklung stand jedoch vorerst das Sensorik-Modul zwischen Positionier- und Orientier-Kinematik. Das Sensorik-Modul-Konzept der Sensorbox ermöglicht die Messung minimaler Wegauslenkungen von Horizontalbewegungen. Das Design mittels zweier horizontal und über Kreuz angeordneten Axialführungen inklusive Feder-/Dämpfer-System basiert auf einem Patent der Fa. EEPOS. Ein wesentlicher Grund für die Wahl dieses Lösungsansatzes als Sensorik-Modul war der Aufbau, der auf einer Kleinkinematik mit Wegmesssystem fußt. Damit ist es möglich, dem Bediener ein natürliches und sofort erlebbares Reaktionsgefühl für die unterstützte Bewegung zu geben. Gleichzeitig kann das Sensorik-Modul zur Erkennung von Kollisionen und als Wegverzehreinrichtung beim Kontakt mit feststehenden Objekten während Automatikfahrten verwendet werden.

Um das theoretisch entworfene Konzept in die Praxis umzusetzen und an die dort bestehenden Umgebungsbedingungen anzupassen, wurde ein Demonstrator und eine dazugehörige Experimentalumgebung zur Simulation der Handhabungs- und Montageprozesse aufgebaut. Ein erster Schritt der Realisierung des Demonstrators war die Kalibrierung der Sensorbox sowie die Konfiguration und Auslegung der damit verknüpften Antriebssteuerung. Hierzu wurden die Parameter der Regelung mit Hilfe eines statistischen Versuchsplans ermittelt. Im Mittelpunkt stand dabei die Optimierung der ergonomisch wirkenden Bedienkräfte sowie das subjektive Empfinden bzw. die Wahrnehmung der Bewegungskontrolle des Bedieners bei der Handhabung der Last. Durch den strukturierten Versuchsplan war es möglich, die optimierten Parameter der

Reglung mit einem vergleichsweise reduzierten Aufwand und einer kleinen Anzahl an Versuchspersonen zu ermitteln. Das dabei gewonnene Setup ermöglicht es dem Bediener, die Last sicher und einfach zu manövrieren. Es wurden optimierte Parametersettings für jeweils verschiedene Lastarten (starr angebundene Last, pendelnde Last, keine Last) sowie ein globales Setting ermittelt.

Darüber hinaus wurden für eine Serienanwendung notwendige Zusatz- und Sicherheitsfunktionen des IAD entwickelt. Sie basieren auf der Nutzung der Sensorbox-Informationen sowie weiteren einfachen Sensoren und sind über speziell entworfene Regelungen ebenfalls mit den Servoantrieben verknüpft. Eine für das Einsatzprofil charakteristische Funktion stellt dabei die Anti-Pendel Funktion dar, die das mögliche Aufschwingen einer pendelnd aufgenommenen Last erkennt und unterdrückt. Weitere Zusatzfunktionen sind das übergangslose Teleskopieren, das sanfte Abbremsen an sog. virtuellen Wänden sowie eine Anti-Drift Funktion.

Die verbesserte Unterstützung unter Anwendung des globalen Settings als universellster Ansatz konnte im Anschluss mittels einer Usability Studie bestätigt werden. Ein Ergonomievergleich unter Einsatz spezieller Kraftmesshandschuhe bestätigte zudem, dass die ergonomischen Kraftspitzen bei Verwendung des auf der Sensorbox basierenden IAD um bis zu 48 % geringer als beim vergleichbaren rein manuell betätigten Kransystem sind.

Die in der Forschungsfrage zum Ziel gesetzte Teilautomatisierung des IAD wurde für die Teilprozessschritte des Zuführens der Last zum Montageort sowie der Rückführung des IAD vom Montageort zu einer Home-Position umgesetzt und bezogen auf sicherheitstechnische Aspekte bewertet. Begründet ist die Vorgehensweise im nicht wertschöpfenden Anteil dieser Teilprozessschritte. Sie können zum einen einfach automatisiert werden und ermöglichen es dem Mitarbeiter, sich gleichzeitig wertschöpfenden Tätigkeiten zu widmen. Zum anderen erfordern die genannten Teilprozessschritte nicht die speziellen Fähigkeiten des Bediener, wie es z.B. bei feinfühligem Fügeprozessen oder beim Einhaken der Last mit dem Lastaufnahmemittel der Fall wäre. Abschließend wurde festgestellt, dass das IAD-Konzept eine Teilautomatisierung zulässt. Allerdings ist das nur für permanente Lasten, wie Werkzeuge, sinnvoll, da bei Bauteilen ein jeweils erheblicher sicherheitstechnischer Aufwand zur Vermeidung von Kollisions- und Quetschgefahren betrieben werden muss.

Als letzten Schritt der Konzeptrealisierung wurde mit der zuvor entworfenen Methodik ein passiv gestaltetes Lastaufnahmemittel mit Low-Cost-Automation Ansätzen entwickelt und prototypisch umgesetzt. Kern des Konzepts ist die schwerkraftunterstützte Orientierung der Last unter Verwendung charakteristischer biegeschlaffer Lastaufnahmemittel. Es stellt eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Designs dar und kann durch ergonomische Ansatzpunkte den Mitarbeiter besser unterstützen.

6.2 Fazit und Ausblick

Conclusion and Outlook

Das entwickelte Konzept zur Handhabung und Montage schwerer und großer Lasten in der Nutzfahrzeugproduktion zeigt, wie wichtig und elementar das Zusammenspiel zwischen Mensch und Technik am Arbeitsplatz ist und verdeutlicht dessen Nützlichkeit und Notwendigkeit in der Zukunft. Aufgrund des demografischen Wandels und einem stärker werdenden Wettbewerb am Arbeitsmarkt werden Themen wie Ergonomie, Usability, Akzeptanz und damit einhergehend die Effizienz eines Arbeitsplatzes und seiner Betriebsmittel zukünftig noch stärker in den Fokus rücken, als sie es heute schon sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte IAD die strukturiert analysierten und definierten Anforderungen erfüllt. Die Möglichkeit der Handhabung an der Last erzeugt eine sehr gute Usability und ermöglicht eine intuitive Bedienung und Kontrollierbarkeit. Die Usability Studie wurde im Rahmen der Arbeit allerdings nur am Demonstrator durchgeführt, der nicht der Realität in der Fabrik gerecht werden kann. Zudem war die Stichprobenanzahl sehr klein. Dadurch wird deutlich, dass das Ergebnis der Usability Studie nur eine vorerst grobe Richtung der Verbesserung ersichtlich macht. Weitere Tests und Studien an seriennahen Anwendungen sollten die Aussage in Zukunft bestätigen und detaillieren.

Die Sensorbox für Horizontalbewegungen ist zudem der Grundstein für die mögliche ergonomisch optimierte Körperpositionierung und –haltung als Aspekt des entwickelten IAD-Konzepts. Die Analyse der ergonomisch wirkenden Kräfte wurde im Rahmen der Arbeit auf die horizontalen Translationsbewegungen eingeschränkt, da nur diese durch die Sensorbox erkannt und über das entworfene und parametrisierte Regelungskonzept verarbeitet werden. In der Realität und sobald alle Freiheitsgrade des IAD gleichzeitig aktiv nutzbar sind, würden jedoch vielschichtige und dynamische menschliche Körperbewegungen und –kräfte auftreten. Nicht zuletzt hat der Bediener durch sein individuelles Körper- und Bewegungsprofil einen großen Einfluss auf das Ergebnis einer ergonomischen Bewertung. Dieser Herausforderung sollte für die Messung einer Realanwendung in der Fabrik noch stärker nachgegangen werden. Als Ansatz können neben den klassischen Ergonomie-Bewertungsbögen in Zukunft auch Motion-Capture-Assessment-Technologien zur Beurteilung der gesamtheitlichen ergonomischen Belastungen angewendet werden.

Hinsichtlich der ausgewählten und im Demonstrator umgesetzten ZYX-Positionier-Kinematik, bildet der Einsatz eines KBK-Systems mit Hubachse das Grundgerüst für Modularität und Skalierbarkeit. Jedes Modul des Konzepts kann hinsichtlich Last und Arbeitsraum skalierbar dargestellt und modular aufgebaut werden. Der abschließende Teil des Modulkonzepts und gleichzeitig die jeweilige Verbindung von IAD und Last bildet dabei die Methodik zum Design eines Low-Cost-Automation Lastaufnahmemittels. Die Methodik ermöglicht es dem Anwender das IAD jeweils final an den spezifischen Prozess anzupassen, sodass es universell und flexibel einsetzbar

sowie wandelbar ist. Die Methodik sowie der in der Arbeit enthaltene Katalog mit Teillösungen bietet dem Anwender jedoch nur eine strukturierte Handlungsempfehlung und grundlegende Ideen. Eine Implementierung wird heute wie morgen ein spezifisch angepasstes Lastaufnahmemittel benötigen. Eine generelle Lösung konnte daher im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgezeigt werden.

Im Bereich der Teilautomatisierungsfähigkeit bietet das IAD-Konzept einen weiteren Vorteil zur effizienteren Arbeitsplatzgestaltung. Gerade die nicht wertschöpfenden und einfachen Bewegungen der Positionier-Kinematik lassen sich automatisieren. Hierbei sollten jedoch auf dem Weg vom Prototyp zur Serienreife des IAD noch sicherheitstechnische Aspekte wie Klemm- und Quetschgefahren betrachtet und gelöst werden. Im Rahmen der Arbeit konnte dies nur am exemplarischen Prozess der ATS-Box Montage in einem Laborumfeld erforscht werden. Weitere Lösungskonzepte wurden dabei aufgezeigt. Eine genaue Bewertung der MRK-gerechten Teilautomatisierung ist allerdings erst bei einer seriennahen Produktreife des IAD absehbar, da erst zu diesem Zeitpunkt die entsprechende Zusatzsensorik mit redundanter Auslegung integriert ist.

Die Validierung hat gezeigt, dass sich das IAD-Konzept bereits für einen komplexen Montageprozess einsetzen lässt. Ausgehend von diesen Erkenntnissen und Ergebnissen lassen sich verschiedene Potentiale sowie Anknüpfungspunkte für weiterführende Entwicklungen benennen. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf die Produktifizierung des Konzepts. Die Punkte sind somit notwendig, um ein Produkt basierend auf dem Konzept in Verkehr und zum Produktiveinsatz bringen zu können. So sollten weiterführende Entwicklungen zuerst die Serienfähigkeit des IAD im reinen Manipulatorbetrieb verfolgen. Hierzu ist es hilfreich, einen möglicherweise weniger komplexen und vor allem nicht notwendigerweise hochverfügbaren Arbeitsplatz für die Erstanwendung auszuwählen. Eine Möglichkeit sind z.B. Arbeitsplätze in der Vormontage.

Als weiterer Ausblick auf die Themen der Produktentwicklung kommt eine zukünftige Modularisierung im Rahmen eines IAD-Baukastensystems in Betracht. So lässt sich das Sensorbox-Konzept z.B. auch auf nur einen Freiheitsgrad reduzieren und sich für den Einsatz in einer Einschienenbahn mit Hebezeugen nutzen. Weiterhin gilt es das Konzept für weitere Lastarten und deren individueller Attribute zu optimieren. Hierzu wird die Entwicklung einer automatischen und sicheren Lasterkennung als sinnvoll erachtet. Mit dieser Information können Zusatzfunktionen und lastabhängige Profile automatisiert ausgewählt und genutzt werden. Die Teilautomatisierung kann aufgrund der erhöhten technischen Komplexität möglicherweise nur bei Spezialanwendung wirtschaftlich einsetzbar sein. Ein mögliches Szenario könnte hierbei der Transport eines taktilen Leichtbauroboters zu verschiedenen Arbeitsplätzen sein. Anstatt eines Lastaufnahmemittels mit Last würde die Positionierkinematik in diesem Fall den Roboter sicher und automatisiert zu seinem Arbeitsplatz transportieren. Der Arbeitsraum könnte dadurch stark vergrößert werden, was neue Tätigkeitsfelder ermöglicht. Während des Transports kann die Sensorbox wiederum mit ihren

ursprünglichen Eigenschaften zur Kollisionserkennung und als Wegverzeheinrichtung dienen und zu einem MRK-gerechten Sicherheitskonzept beitragen.

7 Literaturverzeichnis

References

- [ABEL11] ABELE, Eberhard ; REINHART, Gunther: *Zukunft der Produktion : Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München : Hanser Verlag, 2011
- [AKEL99] AKELLA, P. ; PESHKIN, M. ; COLGATE, E. ; WANNASUPHOPRASIT, W. ; NAGESH, N. ; WELLS, J. ; HOLLAND, S. ; PEARSON, T. ; PEACOCK, B.: Cobots for the automobile assembly line. In: IEEE (Hrsg.): *International Conference on Robotics and Automation // 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, S. 728–733
- [BAUA19] BAUA/ASER/ARBMEDERGO/EBUS: *Leitmerkmalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen beim manuellen Heben, Halten und Tragen von Lasten ≥ 3 kg LMM-HHT : Formblatt inklusive Kurzanleitung*. Entwurf zur Praxiserprobung – Version 12.5. URL https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Leitmerkmalmethode/pdf/LMM-Heben-Halten-Tragen.pdf?__blob=publicationFile&v=4 – Überprüfungsdatum 2020-04-03
- [BECK08] BECKER, Torsten: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [BERN07] BERNHARDT, Rolf ; SURDILOVIC, Dragoljub ; KATSCHINSKI, Volker ; SCHRÖER, Klaus: *Flexible Assembly Systems through Workplace-Sharing and Time-Sharing Human-Machine Cooperation – PiSA*. In: *IFAC Proceedings Volumes 40* (2007), Nr. 3, S. 247–251. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701540357X>
- [BERT18] BERTAGNOLLI, Frank: *Lean Management : Einführung und Vertiefung in die japanische Management-Philosophie*. Wiesbaden : Springer Gabler, 2018 (Lehrbuch)
- [BICC08] BICCHI, A. ; PESHKIN, M. ; COLGATE, J. E.: Safety for Physical Human-Robot Interaction. In: SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg : Springer Science+Business Media, 2008, S. 1335–1348
- [BINA19a] BINAR QUICK-LIFT SYSTEMS AB: *Quick-Lift Driven : QLD 300i*. URL <https://www.binarquicklift.com/wp-content/uploads/2018/01/Product-sheet-QLD-300i.pdf> – Überprüfungsdatum 2019-12-10

- [BINA19b] BINAR HANDLING SÜD GMBH: *Steuerbediengriff : für mechanische Lastaufnahmemittel*.
<https://www.binarhandling.com/de/produkte/bedieneinheiten/>, 1.11.2019
- [BINA20a] BINAR HANDLING SÜD GMBH: *Steuereinheit*.
<https://www.binarhandling.com/de/produkte/bedieneinheiten/>, 25.2.2020
- [BINA20b] BINAR HANDLING SÜD GMBH: *External Handle*.
<https://www.binarhandling.com/de/produkte/bedieneinheiten/>, 11.2.2020
- [BMAS96] BMAS - BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALES:
Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten bei der Arbeit (Lastenhandhabungsverordnung - LasthandhabV) (in Kraft getr. am 4. 12. 1996) (1996), S. 1–2. URL
<http://www.gesetze-im-internet.de/lasthandhabv/LasthandhabV.pdf> –
Überprüfungsdatum 2020-04-02
- [COLG03] COLGATE, J. E. ; PESHKIN, M. ; KLOSTERMEYER, S. H.:
Intelligent assist devices in industrial applications: a review.
In: IEEE/RSJ (Hrsg.): *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems : (IROS 2003) : proceedings : October 27-31, 2003, Las Vegas, Nevada, 2003*, S. 2516–2521
- [DIN 8593-0] DIN 8593-0. 2003. *Fertigungsverfahren Fügen Teil 0: Allgemeine Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
- [DIN EN ISO 10218-2] DIN EN ISO 10218-2. Juni 2012. *Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration (ISO 10218-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-2:2011*
- [DIN EN ISO 10218-1] DIN EN ISO 10218-1. Januar 2012. *Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter*
- [DIN ISO/TS 15066] DIN ISO/TS 15066. April 2017. *Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter (ISO/TS 15066:2016)*
- [DIN 15003] DIN 15003. 02.1970. *Hebezeuge - Lastaufnahmeeinrichtungen, Lasten und Kräfte - Begriffe*
- [DICK14] DICK, Matthias ; KOCH, Timo ; DICK, Paul: *Kransystemeepos GmbH*, 51674 Wiehl, DE. Anmeldenr. 102014109146, Deutschland. 31.12.2015. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102014109146A1
- [DICK15a] DICK, Matthias ; DICK, Paul ; KOCH, Timo: *CRANE SYSTEME EPOS GMBH*, DE. Anmeldenr. 201514744391, US. 31.12.2015. US. Veröffentlichungsnr. US020150375969A1

- [DICK15b] DICK, Matthias ; DICK, Paul ; KOCH, Timo: *KRANSYSTEMEPOS GMBH, DE. Anmeldenr. 15171007, EP. 06.01.2016. EP. Veröffentlichungsnr. EP000002962976A1*
- [DICK15c] DICK, Matthias ; DICK, Paul ; KOCH, Timo: *KRANSYSTEMEPOS GMBH, DE. Anmeldenr. 15171007, EP. 13.09.2017. EP. Veröffentlichungsnr. EP000002962976B1*
- [DOLE65] DOLEZALEK, C. M. (Hrsg.): *Grundsatzprobleme der Werkstückhandhabung bei Fertigung und Montage*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1965
- [DUCH12] DUCHAINE, V. ; MAYER ST-ONGE, Boris ; DALONG GAO ; GOSSELIN, C.: *Stable and Intuitive Control of an Intelligent Assist Device*. In: *IEEE transactions on haptics* 5 (2012), Nr. 2, S. 148–159
- [EHRL13] EHRENSPIEL, Klaus ; MEERKAMM, Harald: *Integrierte Produktentwicklung : Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 1., überarbeitete und erweiterte Auflage, neue Ausg // 5., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource], 2013 (Hanser eLibrary)
- [EILE15] EILERS, Jan: *Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme*. 1. Aufl. Aachen : Apprimus-Verl., 2015 (Fertigungsmesstechnik & Qualitätsmanagement Band 9/2015)
- [EMOT14] EMOTION HANDLINGSYSTEME GMBH: *Antrieb für balancierende Z-Achsen*. Informationsbroschüre. Klingelbach, 2014. – Informationsbroschüre
- [ENGE06] ENGELN, Werner: *Methoden der Produktentwicklung : Skripten Automatisierungstechnik*. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2006 (Skripten Automatisierungstechnik)
- [EURO90] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 90/269/EWG des Rates vom 29. Mai 1990 über die Mindestvorschriften bezüglich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der manuellen Handhabung von Lasten, die für die Arbeitnehmer insbesondere eine Gefährdung der Lendenwirbelsäule mit sich bringt (Vierte Einzelrichtlinie im Sinne von Artikel 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG) : 90/269/EWG*. Richtlinie des Rates. In: *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften* (1990), L 156 / 9, S. 9–13. URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31990L0269&from=DE> – Überprüfungsdatum 2020-04-03
- [EVER89] EVERSHEIM, Walter: *Organisation in der Produktionstechnik Band 4 : Fertigung und Montage*. 2. Aufl. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1989 (VDI-Buch)

- [FELD13] FELDHUSEN, Jörg ; GROTE, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre : Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollst. überarb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg : Imprint: Springer Vieweg, 2013 (SpringerLink : Bücher)
- [FELD14] FELDMANN, Klaus ; SCHÖPPNER, Volker ; SPUR, Günter: *Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren*. München : Carl Hanser Verlag, 2014
- [FRAU13] FRAUNHOFER IPK INSTITUT FÜR PRODUKTIONSANLAGEN UND KONSTRUKTIONSTECHNIK: *Kobots in der Industrie*. URL https://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK_FHG/publikationen/futur/Futur_1_2013/Futur_1_201330.pdf – Überprüfungsdatum 2019-12-10
- [GERM10] GERMAN CONFERENCE ON ROBOTICS: *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK) : Date, 7-9 June 2010*. [Berlin] : [VDE Verlag], 2010
- [GÖPF98] GÖPFERT, Jan: *Modulare Produktentwicklung : Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation*. Wiesbaden : Deutscher Universitätsverlag, 1998 (Gabler Edition Wissenschaft)
- [GORB20] GORBEL INC.: *G-Force Brochure : Force Sensing Handles gor G-Force*. <https://www.gorbel.com/>, 2020
- [HERR08] HERRMANN, Norbert: *Erfolgspotenzial ältere Mitarbeiter : Den demographischen Wandel souverän meistern*. München : Carl Hanser Verlag, 2008
- [HESS01] HESSE, Stefan ; SCHMIDT, Heinz ; SCHMIDT, Uwe: *Manipulatorpraxis : Manuell geführte Handhabungssysteme*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2001
- [HESS16a] HESSE, Stefan: *Grundlagen der Handhabungstechnik : Mit 23 Übungsaufgaben und 123 Kontrollfragen*. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2016 (Hanser eLibrary)
- [HESS16b] HESSE, Stefan ; MALISA, Viktorio: *Taschenbuch Robotik : Montage, Handhabung*. 2., neu bearbeitete Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2016
- [HESS92] HESSE, Stefan: *Atlas der modernen Handhabungstechnik*. Darmstadt : Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, 1992 (Fachbuch Konstruktion)
- [HESS93] HESSE, Stefan: *Handhabungsmaschinen : Grundlagen und Prinzipien in Aufbau, Funktion, Baugruppen, Programmierung und Steuerung*. 1. Aufl. Würzburg : Vogel, 1993 (Kamprath-Reihe)

- [HESS95] HESSE, Stefan: *Lexikon Handhabungseinrichtungen und Industrierobotik : 1800 Begriffe von A-Z zur handhabungstechnischen Automatisierung für Lehre, Studium und Beruf*. Renningen-Malmsheim : Expert-Verl., op. 1995
- [HESS98] HESSE, Stefan ; SCHMIDT, Heinz: *Rationalisieren mit Balancern und Hubeinheiten : Grundlagen und praktische Anwendung*. Renningen-Malmsheim : Expert-Verl., 1998
- [HETT81] HETTINGER, Theodor (Hrsg.): *Gewichtsgrenzen für das höchstzulässige Heben und Tragen von Lasten durch männliche und weibliche sowie jugendliche Arbeitnehmer : Gutachten über Gewichtsgrenzen für Männer, Frauen und Jugendliche*. Bonn : Bundesminister für Arbeit u. Sozialordnung, 1981 (Forschungsbericht)
- [IEEE03] IEEE/RSJ (Hrsg.): *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems : (IROS 2003) : proceedings : October 27-31, 2003, Las Vegas, Nevada, 2003*
- [IEEE11a] IEEE/SICE (Hrsg.): *2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2011) // IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2011 : 20 - 22 Dec. 2011, Kyoto, Japan, 2011*
- [IEEE11b] IEEE/ASME (Hrsg.): *2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) // 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2011) : Budapest, Hungary, 3 - 7 July 2011, 2011*
- [IHS19] IHS: *INDUSTRIE HANDLING + FÖRDERTECHNIK GMBH*. URL <https://www.ihs-handling.de/>. – Aktualisierungsdatum: 2019-12-20
- [JONA00] JONAS, Christian: *Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen*. München : Utz, 2000 (Forschungsberichte / IWB Bd. 145)
- [KAZE02] KAZEROONI, H.: *Intelligent Assist Devices : Progress in Material Handling Research: 2002*. URL <http://bleex.me.berkeley.edu/wp-content/uploads/hel-media/Publication/materialhandling2002.pdf> – Überprüfungsdatum 2015-09-29
- [KÖHL81] KÖHLER, Gerhard W.: *Typenbuch der Manipulatoren : Manipulator type book*. München : Thiemig, 1981 (Thiemig-Taschenbücher 25)
- [LÖHR77] LÖHR, H.-G.: *Eine Planungsmethode für automatische Montagesysteme*. Mainz : Otto Krausskopf-Verlag GmbH, 1977

- [LOTT12] LOTTER, Bruno: *Montage in der industriellen Produktion : Ein Handbuch für die Praxis ; mit ... 18 Tabellen*. Berlin : Springer Vieweg, 2012 (VDI)
- [LOTT82] LOTTER, Bruno: *Arbeitsbuch der Montagetechnik : Feinwerktechnik, Elektromechnik, Armaturen, Gerätebau, Kraftfahrzeugelemente, Zubehör*. Mainz : Vereinigte Fachverlage Krausskopf - Ingenieur Digest, 1982
- [MAIL17] MAILAHN, Ortwin ; MASIAK, Tobias: *Usability Studie - Benutzerempfinden bei der Verwendung eines „Intelligent Assist Device“*. Saarbrücken, 01.02.2017
- [MATH16a] MATHEIS, Mathias: Modulares Handhabungs- und Montagekonzept für schwere Lasten in der Lkw Produktion. In: MÜLLER, Rainer (Hrsg.): *8. Montage-Tagung : Montagetechnik und Montageorganisation*, 2016, S. 12/1-12/17
- [MATH16b] MATHEIS, Mathias ; MÜLLER, Rainer: *Innovative Handhabungskonzepte für die Lkw-Montage : Entwicklung eines modularen Handhabungs- und Unterstützungssystems für die Lkw-Produktion*. In: *wt Werkstattstechnik online* 106 (2016), Nr. 9, S. 588–594
- [MATH16c] MATHEIS, Mathias ; MAILAHN, Ortwin: Innovative Handling- & Assembly Concept for heavy parts. In: Vincentz Network GmbH & Co. KG (Hrsg.): *Automotive Circle Conference : Assembly Engineering intensive 2016 @ Škoda*, 2016, S. 15/1-15/14
- [MATH17] MATHEIS, Mathias ; MAILAHN, Ortwin ; MÜLLER, Rainer: *Lastaufnahmevorrichtung, Kran mit Lastaufnahmevorrichtung*Daimler AG, 70327 Stuttgart, DE, Deutschland. 25.01.2018. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102017005525A1
- [MORR16] MORRIS, Amanda: *20 Years Later: Cobots Co-opt Assembly Lines : Northwestern team collaborated with GM to create a new type of robot*. URL <https://www.mccormick.northwestern.edu/news/articles/2016/08/twenty-years-later-cobots-co-opt-assembly-lines.html>. – Aktualisierungsdatum: 2019-12-10
- [MÜCH20] MÜCHER, Armin ; MÜCHER, Friedhelm ; MÜCHER, Volkhardt ; KOCH, Timo: *eepos - Der Aluminium-Systembaukasten mit der größten Vielfalt*. URL <https://www.eepos.de/>. – Aktualisierungsdatum: 2020-05-24 – Überprüfungsdatum 2020-05-24
- [MÜLL11] MÜLLER, Rainer ; ESSER, Martin ; EILERS, Jan: Design method for reconfigurable assembly processes and equipment. In: SPATH, Dieter; ILG, Rolf; KRAUSE, Tobias (Hrsg.): *Innovation in product and production : Conference proceedings ; July 31 - August 4, 2011 in Stuttgart, Germany*. Stuttgart : Fraunhofer-Verlag, 2011, S. 1–6

- [DIN EN 14238] DIN EN 14238. 02.2010. *Krane – Handgeführte Manipulatoren; Deutsche Fassung EN 14238:2004+A1:2009*
- [PITT16] PITTMAN, Kagan: *A History of Collaborative Robots: From Intelligent Lift Assists to Cobots : The evolution of cobots from prototypes at General Motors to a growing market of industrial robots*. URL <https://new.engineering.com/story/a-history-of-collaborative-robots-from-intelligent-lift-assists-to-cobots> – Überprüfungsdatum 2019-12-16
- [RAPP99] RAPP, Thomas: *Produktstrukturierung : Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen*. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden : Deutscher Universitätsverlag, 1999 (Gabler Edition Wissenschaft)
- [SCHO87] SCHOPEN, Michael: *Die Auswahl von Handhabungsgeräten aufgrund der charakteristischen Merkmale ihrer kinematischen Strukturen*. Düsseldorf : VDI Verlag, 1987 (Fortschrittberichte VDI : Reihe 2, Fertigungstechnik Nr. 127)
- [SCHU08] SCHUH, Günther ; STÖLZLE, Wolfgang ; STRAUBE, Frank: *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen : Ein Leitfaden für die Praxis*. 1. Aufl. Berlin : Springer Berlin, 2008 (VDI-Buch)
- [SHIM97] SHIMOKAWA, Koichi ; JÜRGENS, Ulrich ; FUJIMOTO, Takahiro: *Transforming Automobile Assembly : Experience in Automation and Work Organization*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1997
- [SPOR11] SPORKET, Mirko: *Organisationen im demographischen Wandel : Alternsmanagement in der betrieblichen Praxis*. 1. Aufl. Wiesbaden : VS, Verl. für Sozialwiss., 2011 (Dortmunder Beiträge zur Sozialforschung)
- [SPUR86] SPUR, G. ; HELWIG, H.-J.: Einführung in die Montagetechnik. In: SPUR, Günter (Hrsg.): *Handbuch der Fertigungstechnik : Fügen, Handhaben und Montieren*. Band 5. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1986, S. 591–606
- [STEI20] STEINBERG, U. ; CAFFIER, G. ; LIEBERS, F. ; TSCHÖCKE, E.: *Gefährdungsfaktoren: Ein Ratgeber : 9 Physische Belastung /Arbeitsschwere*. URL www.baua.de/gefaehrdungsfaktoren – Überprüfungsdatum 2020-04-03

- [SURD09] SURDILOVIC, D. ; SCHRECK, G. ; KATSCHINSKI, V. ; SCHMIDT, U.: *Interaktive Roboter und fortgeschrittene Handling-Systeme – Neueste Entwicklungen und Erfahrungen aus dem prototypischen Einsatz in der Industrie : Interactive Robots and Advanced Handling Systems – Recent Developments and Experiments from the Prototypical Applications in Industry*. VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik -GMA-, Fachausschuß 4.13 Steuerung und Regelung von Robotern (Sitzung) <42, 2009. URL https://his-projects.webarchiv.kit.edu/Projects/germrob/FA4.13-Protokolle/Sitzung42/FA413-42_Sitzung-folien_1_IPK_Surdilovic.pdf – Überprüfungsdatum 2019-12-09
- [SURD12] SURDILOVIC, Dragoljub: *Kooperative Roboter- gemeinsam sind wir stärker*. In: *Futur: Vision, Innovation, Realisierung. Mitteilungen aus dem Produktionstechnischen Zentrum (PTZ)* (2012), Nr. 2, S. 10–11
- [VDI 2411] VDI 2411. 06.1970. *Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen*
- [VDI 2860] VDI 2860. 05.1990. *Montage- und Handhabungstechnik Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*
- [VDI 2221] VDI 2221. 05.1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*
- [VDI 2803 Blatt 1] VDI 2803 Blatt 1. 10.1996. *Funktionsanalyse - Grundlagen und Methode*
- [VDI 2222 Blatt 1] VDI 2222 Blatt 1. 06.1997. *Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*
- [WANN10] WANNER, Martin-Christoph: *Automatisierung in Fertigung und Montage : Handhabungstechnik*. URL http://www.hro.ipa.fraunhofer.de/content/dam/agp/de/documents/Lehre/Skripte/Automatisierung/7_HH_Stand_20101214_cc_tcm101-175757.pdf – Überprüfungsdatum 2014-08-06
- [WANN13] WANNER, Martin-Christoph: *Jahresbericht 2012/2013 : Lehrstuhl Fertigungstechnik an der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik Universität Rostock Fraunhofer Anwendungszentrum Großstrukturen in der Produktionstechnik*. 2013
- [WANN98] WANNASUPHOPRASIT, W. ; AKELLA, P. ; PESHKIN, M. ; COLGATE, J. E.: *Cobots: A novel material handling technology*. In: *Proceedings of IMECE 2* (1998)
- [WANN99] WANNASUPHOPRASIT, W.: *Cobots: Collaborative Robots : A Dissertation*. URL https://peshkin.mech.northwestern.edu/publications/_1999_Thesis_WitayaWannasuphoprasit.pdf

- [WARN75] WARNECKE, H.-J. ; LÖHR, H.-G. ; KIENER, W.:
Montagetechnik : Schwerpunkt der Rationalisierung. Mainz :
Otto Krausskopf-Verlag GmbH, 1975
- [WARN93] WARNECKE, Hans-Jürgen: *Der Produktionsbetrieb 2 :
Produktion, Produktionssicherung*. Zweite, völlig
neubearbeitete Auflage. Berlin : Springer-Verlag, 1993
(Springer-Lehrbuch)
- [WEST06] WESTKÄMPER, Engelbert: *Einführung in die Organisation der
Produktion*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006
(Springer-Lehrbuch)
- [WIRT08] WIRTH, Konrad: *Motorfügen : Halbautomatisierte Montage
Powerpack-Einbau*. 2008

8 Anhang

Tabelle 8.1: Variationen dreiachsiger Regionalstrukturen [SCHO87, S. 36]

Variations of triaxial regional structures

		Kinematische Regionalstrukturen von Handhabungsgeräten									
Achsen- strukturen	Grund- strukturen Achsan- ordnungen	TTT	TTR	TRT	RTT	TRR	RTR	RRT	RRR		
		Drei Achsen parallel zueinander	WWW	ZZZ	ZZC	ZCZ	CZZ	<u>ZCC</u>	<u>CZC</u>	<u>CCZ</u>	CCC
	VVV	YYY	YYB	YBY	BYY	YBB	BYB	BBY	BBB	2	
	UUU	XXX	XXA	XAX	AXX	XAA	AXA	AAX	AAA	3	
Erste und zweite Achse parallel zueinander	WVW	ZZY	ZZB	<u>ZCY</u>	<u>CZY</u>	<u>ZCB</u>	<u>CZB</u>	CCY	<u>CCB</u>	4	Grundstellungen
	WVU	ZZX	ZZA	ZCX	CZX	ZCA	CZA	CCX	CCA	5	
	VVW	YYZ	YYC	YBZ	<u>BYZ</u>	YBC	BYC	BßZ	BBC	6	
	VVU	YYX	YYA	YBX	BYX	YBA	BYA	BBX	BBA	7	
	UUV	XXZ	XXC	XAZ	AXZ	XAC	AXC	AAZ	AAC	8	
	UUV	XXY	XXB	XAY	AXY	XAB	AXB	AAZ	AAB	9	
Erste und dritte Achse parallel zueinander	WVW	ZYZ	<u>ZYC</u>	ZBZ	<u>CYZ</u>	<u>ZBC</u>	CYC	<u>CBZ</u>	<u>CBC</u>	10	Grundstellungen
	WVU	ZXZ	ZXC	ZAZ	CXZ	ZAC	CXC	CAZ	CAC	11	
	VVW	YZY	YZB	YCY	BZY	YCB	BZB	BCY	BCB	12	
	VVU	YXY	YXB	YAY	BXY	YAB	BXB	BAY	BAB	13	
	UUV	XZX	XZA	XCX	AZX	XCA	AZA	ACX	ACA	14	
	UUV	XYX	XYA	XBX	AYX	XBA	AYA	ABX	ABA	15	
Zweite und dritte Achse parallel zueinander	WVW	ZYY	<u>ZYB</u>	<u>ZBY</u>	CYY	ZBB	<u>CYB</u>	<u>CBY</u>	<u>CBB</u>	16	Grundstellungen
	WVU	ZXX	ZXA	ZAX	CXX	ZAA	CXA	CAX	CAA	17	
	VVW	YZZ	YZC	YCZ	BZZ	YCC	BZC	BCZ	BCC	18	
	VVU	YXX	YXA	YAX	BXX	YAA	BXA	BAX	BAA	19	
	UUV	XZZ	XZC	XCZ	AZZ	XCC	AZC	ACZ	ACC	20	
	UUV	XYX	XYB	XBY	AYX	XBB	AYB	ABY	ABB	21	
Alle drei Achsen senkrecht zueinander	WVU	<u>ZYX</u>	ZYA	ZBX	CYX	ZBA	<u>CYA</u>	CBX	CBA	22	Grundstellungen
	WVU	ZXY	ZXB	ZAY	CXY	ZAB	CXB	CAY	CAB	23	
	VWU	YZX	YZA	YCX	BZX	YCA	BZA	BCX	BCA	24	
	VUW	YXZ	YXC	YAZ	BXZ	YAC	BXC	BAZ	BAC	25	
	UWV	XZY	XZB	XCY	AZY	XCB	AZB	ACY	ACB	26	
	UVW	XYZ	XYC	XBZ	AYZ	XBC	AYC	ABZ	ABC	27	

Tabelle 8.2: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Eintelekopiert, ohne Last“*Calibration Sensorbox – measurement series „Retracted, without load“*

Hubachse im Zentrum Kranbrücke					
Eintelekopiert: Ohne Last (nur Lenkergriff)					
Bediener	Messung Nr.	Absolutwerte Sensor Dezimal		Umrechnung in mm (0...100)	
		Sensor X	Sensor Y	Sensor X	Sensor Y
A	1	13661	14377	49,4 mm	52,0 mm
A	2	13732	14375	49,7 mm	52,0 mm
A	3	13456	14468	48,7 mm	52,3 mm
A	4	13587	14154	49,1 mm	51,2 mm
A	5	13594	14606	49,2 mm	52,8 mm
A	6	13796	14182	49,9 mm	51,3 mm
A	7	13782	14398	49,8 mm	52,1 mm
A	8	13614	14196	49,2 mm	51,3 mm
A	9	13566	14106	49,1 mm	51,0 mm
A	10	13802	14105	49,9 mm	51,0 mm
A	11	13580	14196	49,1 mm	51,3 mm
A	12	13680	14655	49,5 mm	53,0 mm
A	13	13628	14001	49,3 mm	50,6 mm
A	14	13579	14230	49,1 mm	51,5 mm
A	15	13520	13890	48,9 mm	50,2 mm
A	16	13558	14105	49,0 mm	51,0 mm
A	17	13558	14370	49,0 mm	52,0 mm
A	18	13617	14377	49,3 mm	52,0 mm
A	19	13843	13685	50,1 mm	49,5 mm
A	20	13810	13546	49,9 mm	49,0 mm
A	21	13690	13768	49,5 mm	49,8 mm
A	22	13557	14092	49,0 mm	51,0 mm
A	23	13545	14210	49,0 mm	51,4 mm
A	24	13495	14657	48,8 mm	53,0 mm
A	25	13997	13750	50,6 mm	49,7 mm
B	26	13941	14323	50,4 mm	51,8 mm
B	27	13930	14406	50,4 mm	52,1 mm
B	28	13763	14210	49,8 mm	51,4 mm
B	29	13551	14106	49,0 mm	51,0 mm
B	30	13809	13863	49,9 mm	50,1 mm
B	31	13788	14127	49,9 mm	51,1 mm
B	32	13579	13779	49,1 mm	49,8 mm
B	33	13704	14614	49,6 mm	52,9 mm
B	34	13592	14627	49,2 mm	52,9 mm
B	35	13537	14384	49,0 mm	52,0 mm
B	36	13537	14203	49,0 mm	51,4 mm
B	37	13704	14628	49,6 mm	52,9 mm
B	38	13732	14322	49,7 mm	51,8 mm
B	39	13732	14365	49,7 mm	52,0 mm
B	40	13482	13981	48,8 mm	50,6 mm
B	41	13697	14070	49,5 mm	50,9 mm
B	42	13750	13737	49,7 mm	49,7 mm
B	43	13551	14224	49,0 mm	51,4 mm
B	44	13665	14375	49,4 mm	52,0 mm
B	45	13551	14370	49,0 mm	52,0 mm
B	46	13544	14329	49,0 mm	51,8 mm
B	47	13600	14384	49,2 mm	52,0 mm
B	48	13837	14641	50,0 mm	53,0 mm
B	49	13648	14252	49,4 mm	51,5 mm
B	50	13650	14335	49,4 mm	51,8 mm
MW Eintelekopiert: Ohne Last (nur Lenkergriff)		13662	14223	49,4 mm	51,4 mm

Tabelle 8.3: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Austeleskopiert, ohne Last“*Calibration Sensorbox – measurement series „telescoped, without load“*

Hubachse voll austeleskopiert					
Austeleskopiert: Ohne Last (nur Lenkergriff)					
Bediener	Messung Nr.	Absolutwerte Sensor Dezimal		Umrechnung in mm (0...100)	
		Sensor X	Sensor Y	Sensor X	Sensor Y
A	1	13343	14669	48,3 mm	53,1 mm
A	2	13662	14190	49,4 mm	51,3 mm
A	3	13933	14544	50,4 mm	52,6 mm
A	4	13250	13814	47,9 mm	50,0 mm
A	5	13899	14739	50,3 mm	53,3 mm
A	6	13565	13806	49,1 mm	49,9 mm
A	7	13559	14844	49,0 mm	53,7 mm
A	8	13767	13810	49,8 mm	49,9 mm
A	9	13252	14850	47,9 mm	53,7 mm
A	10	13913	13736	50,3 mm	49,7 mm
A	11	13252	13736	47,9 mm	49,7 mm
A	12	13239	13771	47,9 mm	49,8 mm
A	13	13891	14731	50,2 mm	53,3 mm
A	14	13419	13841	48,5 mm	50,1 mm
A	15	13420	14730	48,5 mm	53,3 mm
A	16	13906	13729	50,3 mm	49,7 mm
A	17	13699	14007	49,5 mm	50,7 mm
A	18	13586	14077	49,1 mm	50,9 mm
A	19	13645	14509	49,4 mm	52,5 mm
A	20	13669	14516	49,4 mm	52,5 mm
A	21	13556	14203	49,0 mm	51,4 mm
A	22	13664	14343	49,4 mm	51,9 mm
A	23	13558	14259	49,0 mm	51,6 mm
A	24	13655	14503	49,4 mm	52,5 mm
A	25	13593	14405	49,2 mm	52,1 mm
B	26	13656	14127	49,4 mm	51,1 mm
B	27	13551	14161	49,0 mm	51,2 mm
B	28	13655	14503	49,4 mm	52,5 mm
B	29	13572	14279	49,1 mm	51,6 mm
B	30	13767	14627	49,8 mm	52,9 mm
B	31	13760	13841	49,8 mm	50,1 mm
B	32	13767	14094	49,8 mm	51,0 mm
B	33	13774	13939	49,8 mm	50,4 mm
B	34	13582	14349	49,1 mm	51,9 mm
B	35	13572	14077	49,1 mm	50,9 mm
B	36	13654	14337	49,4 mm	51,9 mm
B	37	13571	14342	49,1 mm	51,9 mm
B	38	13668	14474	49,4 mm	52,4 mm
B	39	13636	14342	49,3 mm	51,9 mm
B	40	13538	14328	49,0 mm	51,8 mm
B	41	13620	14350	49,3 mm	51,9 mm
B	42	13592	14202	49,2 mm	51,4 mm
B	43	13543	14063	49,0 mm	50,9 mm
B	44	13599	14356	49,2 mm	51,9 mm
B	45	13628	14154	49,3 mm	51,2 mm
B	46	13647	14342	49,4 mm	51,9 mm
B	47	13670	14364	49,4 mm	52,0 mm
B	48	13614	14378	49,2 mm	52,0 mm
B	49	13800	14308	49,9 mm	51,8 mm
B	50	13677	14406	49,5 mm	52,1 mm
MW Austeleskopiert: Ohne Last (nur Lenkergriff)		13620	14262	49,3 mm	51,6 mm

Tabelle 8.4: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Einteleskopiert, Pendelnde Last“
Calibration Sensorbox – measurement series „retracted, swinging load“

Hubachse im Zentrum Kranbrücke					
Einteleskopiert: Pendelnde Last (LAM + GATS-Box)					
Bediener	Messung Nr.	Absolutwerte Sensor Dezimal		Umrechnung in mm (0...100)	
		Sensor X	Sensor Y	Sensor X	Sensor Y
A	1	13504	14728	48,8 mm	53,3 mm
A	2	13587	14565	49,1 mm	52,7 mm
A	3	13768	14426	49,8 mm	52,2 mm
A	4	13775	14809	49,8 mm	53,6 mm
A	5	13865	14551	50,1 mm	52,6 mm
A	6	13782	14805	49,8 mm	53,5 mm
A	7	13608	14579	49,2 mm	52,7 mm
A	8	13476	14413	48,7 mm	52,1 mm
A	9	13600	14419	49,2 mm	52,2 mm
A	10	13607	14412	49,2 mm	52,1 mm
A	11	13614	14392	49,2 mm	52,1 mm
A	12	13663	15219	49,4 mm	55,0 mm
A	13	13607	14947	49,2 mm	54,1 mm
A	14	13295	14936	48,1 mm	54,0 mm
A	15	13274	14802	48,0 mm	53,5 mm
A	16	14100	14927	51,0 mm	54,0 mm
A	17	13774	15212	49,8 mm	55,0 mm
A	18	13761	15199	49,8 mm	55,0 mm
A	19	13552	14809	49,0 mm	53,6 mm
A	20	13503	14830	48,8 mm	53,6 mm
A	21	13580	14822	49,1 mm	53,6 mm
A	22	13585	14800	49,1 mm	53,5 mm
A	23	13587	14810	49,1 mm	53,6 mm
A	24	13775	14942	49,8 mm	54,0 mm
A	25	13594	14820	49,2 mm	53,6 mm
B	26	13754	14809	49,7 mm	53,6 mm
B	27	13835	14820	50,0 mm	53,6 mm
B	28	13844	14816	50,1 mm	53,6 mm
B	29	13845	14814	50,1 mm	53,6 mm
B	30	13837	14808	50,0 mm	53,6 mm
B	31	13752	14788	49,7 mm	53,5 mm
B	32	13580	14788	49,1 mm	53,5 mm
B	33	13740	14788	49,7 mm	53,5 mm
B	34	13562	14795	49,1 mm	53,5 mm
B	35	13528	14802	48,9 mm	53,5 mm
B	36	13552	14795	49,0 mm	53,5 mm
B	37	13662	14795	49,4 mm	53,5 mm
B	38	13655	14809	49,4 mm	53,6 mm
B	39	13701	14761	49,6 mm	53,4 mm
B	40	13679	14738	49,5 mm	53,3 mm
B	41	13692	14851	49,5 mm	53,7 mm
B	42	13683	14866	49,5 mm	53,8 mm
B	43	13886	14852	50,2 mm	53,7 mm
B	44	13906	14823	50,3 mm	53,6 mm
B	45	13920	14816	50,3 mm	53,6 mm
B	46	13885	14683	50,2 mm	53,1 mm
B	47	13749	14655	49,7 mm	53,0 mm
B	48	13711	14676	49,6 mm	53,1 mm
B	49	13642	14655	49,3 mm	53,0 mm
B	50	13398	14683	48,5 mm	53,1 mm
MW Einteleskopiert: Pendelnde Last (LAM + GATS-Box)		13677	14773	49,5 mm	53,4 mm

Tabelle 8.5: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Austeleskopiert, Pendelnde Last“
Calibration Sensorbox – measurement series „telescoped, swinging load“

Hubachse voll austeleskopiert					
Austeleskopiert: Pendelnde Last (LAM + GATS-Box)					
Bediener	Messung Nr.	Absolutwerte Sensor Dezimal		Umrechnung in mm (0...100)	
		Sensor X	Sensor Y	Sensor X	Sensor Y
A	1	13698	14865	49,5 mm	53,8 mm
A	2	13372	14697	48,4 mm	53,2 mm
A	3	13580	14714	49,1 mm	53,2 mm
A	4	13351	14692	48,3 mm	53,1 mm
A	5	13455	15567	48,7 mm	56,3 mm
A	6	13607	15701	49,2 mm	56,8 mm
A	7	13378	15707	48,4 mm	56,8 mm
A	8	13580	15707	49,1 mm	56,8 mm
A	9	13690	15714	49,5 mm	56,8 mm
A	10	13927	15693	50,4 mm	56,8 mm
A	11	13642	16195	49,3 mm	58,6 mm
A	12	13775	16209	49,8 mm	58,6 mm
A	13	13725	15415	49,6 mm	55,8 mm
A	14	13719	14837	49,6 mm	53,7 mm
A	15	13837	14851	50,0 mm	53,7 mm
A	16	13740	15004	49,7 mm	54,3 mm
A	17	13691	14823	49,5 mm	53,6 mm
A	18	13610	15880	49,2 mm	57,4 mm
A	19	13882	15456	50,2 mm	55,9 mm
A	20	13848	15458	50,1 mm	55,9 mm
A	21	13795	15456	49,9 mm	55,9 mm
A	22	13796	15266	49,9 mm	55,2 mm
A	23	13955	15268	50,5 mm	55,2 mm
A	24	13821	15249	50,0 mm	55,2 mm
A	25	13800	15241	49,9 mm	55,1 mm
B	26	13715	15235	49,6 mm	55,1 mm
B	27	13710	15094	49,6 mm	54,6 mm
B	28	13649	15253	49,4 mm	55,2 mm
B	29	13515	15252	48,9 mm	55,2 mm
B	30	13515	15255	48,9 mm	55,2 mm
B	31	13531	15242	48,9 mm	55,1 mm
B	32	13643	15442	49,3 mm	55,9 mm
B	33	13630	15415	49,3 mm	55,8 mm
B	34	13664	15418	49,4 mm	55,8 mm
B	35	13733	15567	49,7 mm	56,3 mm
B	36	13780	15458	49,8 mm	55,9 mm
B	37	13760	15580	49,8 mm	56,4 mm
B	38	13814	15476	50,0 mm	56,0 mm
B	39	13807	15510	49,9 mm	56,1 mm
B	40	13860	15295	50,1 mm	55,3 mm
B	41	14075	15473	50,9 mm	56,0 mm
B	42	13918	15275	50,3 mm	55,2 mm
B	43	13825	15255	50,0 mm	55,2 mm
B	44	13712	15273	49,6 mm	55,2 mm
B	45	13476	15278	48,7 mm	55,3 mm
B	46	13469	15252	48,7 mm	55,2 mm
B	47	13492	15480	48,8 mm	56,0 mm
B	48	13578	15503	49,1 mm	56,1 mm
B	49	13573	15623	49,1 mm	56,5 mm
B	50	13677	15510	49,5 mm	56,1 mm
MW Austeleskopiert: Pendelnde Last (LAM + GATS-Box)		13688	15362	49,5 mm	55,6 mm

Tabelle 8.6: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Einteleskopiert, Starre Last“*Calibration Sensorbox – measurement series „retracted, rigidly mounted load“*

Hubachse im Zentrum Kranbrücke					
Einteleskopiert: Starr verbundene Last (200 kg)					
Bediener	Messung Nr.	Absolutwerte Sensor Dezimal		Umrechnung in mm (0...100)	
		Sensor X	Sensor Y	Sensor X	Sensor Y
A	1	13899	15030	50,3 mm	54,4 mm
A	2	13787	15031	49,9 mm	54,4 mm
A	3	13940	14675	50,4 mm	53,1 mm
A	4	13954	14275	50,5 mm	51,6 mm
A	5	13176	15288	47,7 mm	55,3 mm
A	6	13892	14287	50,2 mm	51,7 mm
A	7	13578	14193	49,1 mm	51,3 mm
A	8	13460	14321	48,7 mm	51,8 mm
A	9	14000	15170	50,6 mm	54,9 mm
A	10	13676	14418	49,5 mm	52,1 mm
A	11	13906	14314	50,3 mm	51,8 mm
A	12	13522	15107	48,9 mm	54,6 mm
A	13	13934	14662	50,4 mm	53,0 mm
A	14	13570	15163	49,1 mm	54,8 mm
A	15	13558	14307	49,0 mm	51,7 mm
A	16	13382	14335	48,4 mm	51,8 mm
A	17	13572	14668	49,1 mm	53,1 mm
A	18	13590	14753	49,2 mm	53,4 mm
A	19	13585	14480	49,1 mm	52,4 mm
A	20	13662	14508	49,4 mm	52,5 mm
A	21	13592	14670	49,2 mm	53,1 mm
A	22	13725	14787	49,6 mm	53,5 mm
A	23	13762	14864	49,8 mm	53,8 mm
A	24	13780	14855	49,8 mm	53,7 mm
A	25	13774	14822	49,8 mm	53,6 mm
B	26	13774	14794	49,8 mm	53,5 mm
B	27	13857	14856	50,1 mm	53,7 mm
B	28	13767	14522	49,8 mm	52,5 mm
B	29	13760	14842	49,8 mm	53,7 mm
B	30	13747	14688	49,7 mm	53,1 mm
B	31	13760	14682	49,8 mm	53,1 mm
B	32	13585	14863	49,1 mm	53,8 mm
B	33	13584	14830	49,1 mm	53,6 mm
B	34	13586	14676	49,1 mm	53,1 mm
B	35	13585	14835	49,1 mm	53,7 mm
B	36	13592	14858	49,2 mm	53,7 mm
B	37	13606	14647	49,2 mm	53,0 mm
B	38	13627	14787	49,3 mm	53,5 mm
B	39	13690	14822	49,5 mm	53,6 mm
B	40	13843	14773	50,1 mm	53,4 mm
B	41	13723	14815	49,6 mm	53,6 mm
B	42	13856	14703	50,1 mm	53,2 mm
B	43	13850	14856	50,1 mm	53,7 mm
B	44	13843	14557	50,1 mm	52,7 mm
B	45	13843	14661	50,1 mm	53,0 mm
B	46	13683	14640	49,5 mm	53,0 mm
B	47	13885	14557	50,2 mm	52,7 mm
B	48	13732	14446	49,7 mm	52,2 mm
B	49	13774	14596	49,8 mm	52,8 mm
B	50	13621	14550	49,3 mm	52,6 mm
MW Einteleskopiert: Starr verbundene Last (200 kg)		13709	14697	49,6 mm	53,2 mm

Tabelle 8.7: Kalibrierung Sensorbox – Messreihe „Austeleskopiert, Starre Last“*Calibration Sensorbox – measurement series „telescoped, rigidly mounted load“*

Hubachse voll austeleskopiert					
Austeleskopiert: Starr verbundene Last (200 kg)					
Bediener	Messung Nr.	Absolutwerte Sensor Dezimal		Umrechnung in mm (0...100)	
		Sensor X	Sensor Y	Sensor X	Sensor Y
A	1	13648	14926	49,4 mm	54,0 mm
A	2	13540	15440	49,0 mm	55,8 mm
A	3	13392	14702	48,4 mm	53,2 mm
A	4	13669	15488	49,4 mm	56,0 mm
A	5	13358	14690	48,3 mm	53,1 mm
A	6	13844	15734	50,1 mm	56,9 mm
A	7	13170	15608	47,6 mm	56,5 mm
A	8	13635	14697	49,3 mm	53,2 mm
A	9	13370	15288	48,4 mm	55,3 mm
A	10	13816	14683	50,0 mm	53,1 mm
A	11	13809	15742	49,9 mm	56,9 mm
A	12	13390	15079	48,4 mm	54,5 mm
A	13	13837	15741	50,0 mm	56,9 mm
A	14	13385	14850	48,4 mm	53,7 mm
A	15	13614	14837	49,2 mm	53,7 mm
A	16	13614	15073	49,2 mm	54,5 mm
A	17	13614	15295	49,2 mm	55,3 mm
A	18	13614	15225	49,2 mm	55,1 mm
A	19	13523	15420	48,9 mm	55,8 mm
A	20	13520	15228	48,9 mm	55,1 mm
A	21	13434	15424	48,6 mm	55,8 mm
A	22	13427	15108	48,6 mm	54,6 mm
A	23	13416	15273	48,5 mm	55,2 mm
A	24	13427	15101	48,6 mm	54,6 mm
A	25	13496	15252	48,8 mm	55,2 mm
B	26	13508	15310	48,9 mm	55,4 mm
B	27	13614	15441	49,2 mm	55,8 mm
B	28	13613	15483	49,2 mm	56,0 mm
B	29	13620	15462	49,3 mm	55,9 mm
B	30	13621	15455	49,3 mm	55,9 mm
B	31	13614	15406	49,2 mm	55,7 mm
B	32	13604	15427	49,2 mm	55,8 mm
B	33	13607	15254	49,2 mm	55,2 mm
B	34	13600	15240	49,2 mm	55,1 mm
B	35	13525	15399	48,9 mm	55,7 mm
B	36	13558	15100	49,0 mm	54,6 mm
B	37	13509	15262	48,9 mm	55,2 mm
B	38	13370	15281	48,4 mm	55,3 mm
B	39	13270	15111	48,0 mm	54,7 mm
B	40	13370	15220	48,4 mm	55,0 mm
B	41	13482	15101	48,8 mm	54,6 mm
B	42	13482	15268	48,8 mm	55,2 mm
B	43	13572	15427	49,1 mm	55,8 mm
B	44	13510	15330	48,9 mm	55,4 mm
B	45	13595	15447	49,2 mm	55,9 mm
B	46	13618	15566	49,3 mm	56,3 mm
B	47	13503	15502	48,8 mm	56,1 mm
B	48	13607	15142	49,2 mm	54,8 mm
B	49	13615	15469	49,2 mm	55,9 mm
B	50	13510	15302	48,9 mm	55,3 mm
MW Austeleskopiert: Starr verbundene Last (200 kg)		13541	15266	49,0 mm	55,2 mm

Tabelle 8.8: Messreihe mechanische Losbrechkraft Sensorbox
Measurement mechanic breakaway force Sensorbox

	Aufgebrachte Zugkraft [N]	Relative Auslenkung Sensorbox ohne Last [%]	Relative Auslenkung Sensorbox pendelnde Last [%]
Sensorbox: Kraft und Auslenkung in -x	-40 N	-16,7 %	-18,2 %
	-38 N	-16,4 %	-16,2 %
	-36 N	-14,5 %	-14,9 %
	-34 N	-14,2 %	-14,6 %
	-32 N	-12,6 %	-12,6 %
	-30 N	-11,7 %	-11,8 %
	-28 N	-10,8 %	-10,5 %
	-26 N	-10,6 %	-10,2 %
	-24 N	-8,8 %	-9,1 %
	-22 N	-8,5 %	-8,0 %
	-20 N	-6,4 %	-6,9 %
	-18 N	-6,0 %	-6,5 %
	-16 N	-5,2 %	-5,3 %
	-14 N	-3,7 %	-3,7 %
	-12 N	-3,0 %	-2,9 %
	-10 N	-2,7 %	-1,3 %
	-8 N	-1,5 %	-0,2 %
	-6 N	-1,3 %	0,0 %
	-4 N	-0,6 %	0,0 %
-2 N	0,0 %	0,0 %	
0	0 N	0,0 %	0,0 %
Sensorbox: Kraft und Auslenkung in +x	2 N	0,0 %	0,0 %
	4 N	1,6 %	0,0 %
	6 N	2,2 %	0,0 %
	8 N	2,5 %	0,4 %
	10 N	2,7 %	1,2 %
	12 N	2,9 %	2,0 %
	14 N	4,9 %	2,8 %
	16 N	5,8 %	4,1 %
	18 N	6,1 %	4,8 %
	20 N	7,9 %	5,7 %
	22 N	8,2 %	7,2 %
	24 N	9,6 %	7,9 %
	26 N	9,9 %	10,0 %
	28 N	12,0 %	11,2 %
	30 N	12,7 %	12,3 %
	32 N	13,0 %	13,2 %
	34 N	13,1 %	14,3 %
	36 N	14,5 %	15,4 %
	38 N	16,4 %	16,2 %
40 N	18,1 %	18,2 %	

Tabelle 8.9: Wirkungsflächenversuchsplan

Response Surface Analysis

Ver- suchs- paar	Pro- band	Std- Rfolge	Durchlauf- reihen- folge	Punkt- typ	Blöcke	Proportional- wert Kp	Nachstell- zeit Tn	Bndbreite Totzone Tz	Übersteuer- ung PI_Limit
1	A	1	1	1	1	-200	20	0,2	750
6	A	2	2	1	1	-20	20	0,2	750
3	A	3	3	1	1	-200	400	0,2	750
8	A	4	4	1	1	-20	400	0,2	750
2	A	5	5	1	1	-200	20	7	750
7	A	6	6	1	1	-20	20	7	750
4	A	7	7	1	1	-200	400	7	750
9	A	8	8	1	1	-20	400	7	750
23	A	9	9	1	1	-200	20	0,2	10500
28	A	10	10	1	1	-20	20	0,2	10500
25	A	11	11	1	1	-200	400	0,2	10500
30	A	12	12	1	1	-20	400	0,2	10500
24	A	13	13	1	1	-200	20	7	10500
29	A	14	14	1	1	-20	20	7	10500
26	A	15	15	1	1	-200	400	7	10500
31	A	16	16	1	1	-20	400	7	10500
10	A	17	17	-1	1	-200	210	3,6	5625
22	A	18	18	-1	1	-20	210	3,6	5625
11	A	19	19	-1	1	-110	20	3,6	5625
21	A	20	20	-1	1	-110	400	3,6	5625
12	A	21	21	-1	1	-110	210	0,2	5625
20	A	22	22	-1	1	-110	210	7	5625
5	A	23	23	-1	1	-110	210	3,6	750
27	A	24	24	-1	1	-110	210	3,6	10500
13	A	25	25	0	1	-110	210	3,6	5625
13	B	26	26	0	1	-110	210	3,6	5625
14	A	27	27	0	1	-110	210	3,6	5625
14	B	28	28	0	1	-110	210	3,6	5625
15	A	29	29	0	1	-110	210	3,6	5625
15	B	30	30	0	1	-110	210	3,6	5625
16	A	31	31	0	1	-110	210	3,6	5625
1	B	32	32	1	1	-200	20	0,2	750
6	B	33	33	1	1	-20	20	0,2	750
3	B	34	34	1	1	-200	400	0,2	750
8	B	35	35	1	1	-20	400	0,2	750
2	B	36	36	1	1	-200	20	7	750
7	B	37	37	1	1	-20	20	7	750
4	B	38	38	1	1	-200	400	7	750
9	B	39	39	1	1	-20	400	7	750
23	B	40	40	1	1	-200	20	0,2	10500
28	B	41	41	1	1	-20	20	0,2	10500
25	B	42	42	1	1	-200	400	0,2	10500
30	B	43	43	1	1	-20	400	0,2	10500
24	B	44	44	1	1	-200	20	7	10500
29	B	45	45	1	1	-20	20	7	10500
26	B	46	46	1	1	-200	400	7	10500
31	B	47	47	1	1	-20	400	7	10500
10	B	48	48	-1	1	-200	210	3,6	5625
22	B	49	49	-1	1	-20	210	3,6	5625
11	B	50	50	-1	1	-110	20	3,6	5625
21	B	51	51	-1	1	-110	400	3,6	5625
12	B	52	52	-1	1	-110	210	0,2	5625
20	B	53	53	-1	1	-110	210	7	5625
5	B	54	54	-1	1	-110	210	3,6	750
27	B	55	55	-1	1	-110	210	3,6	10500
16	B	56	56	0	1	-110	210	3,6	5625
17	A	57	57	0	1	-110	210	3,6	5625
17	B	58	58	0	1	-110	210	3,6	5625
18	A	59	59	0	1	-110	210	3,6	5625
18	B	60	60	0	1	-110	210	3,6	5625
19	A	61	61	0	1	-110	210	3,6	5625
19	B	62	62	0	1	-110	210	3,6	5625

Tabelle 8.10: Messwerte Experimente Wirkungsflächenversuchsplan

Measured values experiments response surface analysis

Std-Rfolge	Experiment 1: ohne Last					Experiment 2: pendelnde Last					Experiment 3: starre Last				
	oL Zeit Zuf.	oL Note Zuf.	oL Zeit Pos.	oL Note Pos.	oL Lsbr-kraft	pL Zeit Zuf.	pL Note Zuf.	pL Zeit Pos.	pL Note Pos.	pL Lsbr-kraft	sL Zeit Zuf.	sL Note Zuf.	sL Zeit Pos.	sL Note Pos.	sL Lsbr-kraft
1	180 s	6	180 s	6	5,5 N	180 s	6	180 s	6	4,0 N	180 s	6	180 s	6	1,0 N
2	41 s	4	45 s	5	0,5 N	50 s	4	32 s	3	5,0 N	180 s	6	180 s	6	4,0 N
3	40 s	4	40 s	2	7,0 N	49 s	3	28 s	2	7,5 N	59 s	5	41 s	5	4,5 N
4	75 s	5	54 s	5	9,0 N	88 s	6	44 s	6	16,0 N	108 s	5	56 s	5	5,5 N
5	180 s	6	180 s	6	20,5 N	180 s	6	180 s	6	24,5 N	180 s	6	180 s	6	24,0 N
6	40 s	4	50 s	2	17,5 N	52 s	4	32 s	3	28,5 N	180 s	6	180 s	6	20,0 N
7	44 s	5	57 s	3	20,5 N	50 s	4	30 s	4	24,5 N	61 s	5	38 s	5	20,0 N
8	87 s	5	76 s	5	25,5 N	95 s	6	51 s	6	30,0 N	109 s	5	65 s	5	24,0 N
9	180 s	6	180 s	6	5,0 N	180 s	6	180 s	6	3,0 N	180 s	6	180 s	6	3,0 N
10	37 s	5	29 s	6	0,5 N	61 s	6	30 s	6	11,0 N	180 s	6	180 s	6	8,0 N
11	30 s	2	35 s	2	2,0 N	36 s	2	30 s	1	10,5 N	180 s	6	180 s	6	2,0 N
12	73 s	5	62 s	5	6,0 N	111 s	6	65 s	6	11,0 N	101 s	5	61 s	4	14,0 N
13	180 s	6	180 s	6	20,0 N	180 s	6	180 s	6	23,5 N	180 s	6	180 s	6	27,0 N
14	44 s	4	39 s	5	18,5 N	48 s	6	39 s	6	27,5 N	180 s	6	180 s	6	29,0 N
15	37 s	4	50 s	4	20,0 N	40 s	2	28 s	2	30,0 N	180 s	6	180 s	6	23,0 N
16	93 s	5	57 s	5	21,0 N	112 s	6	65 s	6	30,0 N	106 s	5	59 s	5	28,0 N
17	42 s	3	43 s	3	15,0 N	42 s	1	29 s	2	18,0 N	180 s	6	180 s	6	8,0 N
18	71 s	5	45 s	5	16,0 N	85 s	5	45 s	5	14,0 N	71 s	5	49 s	4	20,0 N
19	180 s	6	180 s	6	14,5 N	180 s	6	180 s	6	13,0 N	180 s	6	180 s	6	6,5 N
20	39 s	3	45 s	2	11,5 N	46 s	4	33 s	3	15,0 N	54 s	3	37 s	4	15,0 N
21	35 s	3	41 s	5	1,5 N	46 s	2	29 s	3	6,5 N	48 s	2	44 s	5	6,5 N
22	32 s	2	52 s	4	18,0 N	42 s	4	35 s	4	24,5 N	51 s	3	36 s	3	27,0 N
23	39 s	4	58 s	3	12,5 N	48 s	4	31 s	3	11,5 N	59 s	4	33 s	1	11,0 N
24	29 s	3	46 s	4	11,5 N	44 s	3	31 s	2	22,5 N	50 s	2	35 s	4	19,0 N
25	32 s	3	48 s	4	11,0 N	42 s	2	34 s	4	18,0 N	70 s	5	43 s	4	17,0 N
26	33 s	2	39 s	4	12,0 N	41 s	3	28 s	3	13,0 N	54 s	4	43 s	5	16,0 N
27	31 s	2	47 s	4	11,0 N	46 s	3	31 s	3	11,5 N	60 s	4	39 s	3	16,5 N
28	32 s	3	48 s	4	12,0 N	37 s	3	30 s	3	12,0 N	44 s	3	39 s	2	16,0 N
29	32 s	3	44 s	4	11,0 N	41 s	2	33 s	4	13,5 N	61 s	5	36 s	5	15,5 N
30	31 s	2	42 s	3	12,0 N	38 s	2	30 s	3	13,0 N	56 s	5	48 s	4	15,5 N
31	31 s	2	60 s	4	11,0 N	45 s	3	35 s	4	11,5 N	70 s	5	40 s	4	15,5 N
32	180 s	6	180 s	6	5,0 N	180 s	6	180 s	6	4,5 N	180 s	6	180 s	6	1,0 N
33	42 s	4	30 s	5	0,5 N	49 s	5	26 s	3	3,5 N	180 s	6	180 s	6	4,0 N
34	42 s	4	45 s	2	4,0 N	52 s	3	27 s	2	7,0 N	66 s	5	39 s	5	3,0 N
35	95 s	5	57 s	5	7,0 N	95 s	6	50 s	6	15,0 N	99 s	5	57 s	5	7,5 N
36	180 s	6	180 s	6	20,0 N	180 s	6	180 s	6	23,0 N	180 s	6	180 s	6	26,0 N
37	39 s	4	59 s	3	19,5 N	51 s	4	28 s	4	24,5 N	180 s	6	180 s	6	19,0 N
38	39 s	4	69 s	3	21,0 N	39 s	4	25 s	3	21,0 N	67 s	5	41 s	5	19,5 N
39	95 s	5	81 s	5	22,0 N	96 s	6	51 s	6	30,0 N	103 s	5	63 s	5	25,0 N
40	180 s	6	180 s	6	4,5 N	180 s	6	180 s	6	7,0 N	180 s	6	180 s	6	2,5 N
41	37 s	5	28 s	6	0,5 N	63 s	6	35 s	6	7,0 N	180 s	6	180 s	6	7,5 N
42	33 s	2	45 s	3	3,0 N	40 s	2	26 s	1	9,0 N	180 s	6	180 s	6	1,0 N
43	82 s	5	65 s	5	6,0 N	118 s	6	58 s	6	9,0 N	107 s	5	54 s	5	13,0 N
44	180 s	6	180 s	6	20,5 N	180 s	6	180 s	6	23,0 N	180 s	6	180 s	6	25,5 N
45	43 s	3	37 s	5	18,5 N	51 s	6	36 s	6	27,5 N	180 s	6	180 s	6	28,0 N
46	35 s	2	50 s	4	19,0 N	42 s	3	30 s	1	26,0 N	180 s	6	180 s	6	22,5 N
47	99 s	5	59 s	5	22,0 N	121 s	6	64 s	6	29,0 N	106 s	5	75 s	5	28,0 N
48	36 s	3	39 s	3	15,0 N	37 s	1	27 s	2	16,5 N	180 s	6	180 s	6	7,0 N
49	64 s	5	58 s	5	16,0 N	78 s	5	50 s	5	13,0 N	83 s	5	53 s	4	19,0 N
50	180 s	6	180 s	6	14,5 N	180 s	6	180 s	6	13,0 N	180 s	6	180 s	6	8,5 N
51	41 s	4	46 s	2	11,5 N	50 s	3	30 s	3	11,0 N	64 s	4	38 s	3	14,5 N
52	33 s	3	31 s	4	0,5 N	43 s	3	30 s	3	2,5 N	64 s	3	50 s	5	7,0 N
53	35 s	3	36 s	4	16,5 N	41 s	3	31 s	4	23,0 N	52 s	3	38 s	4	26,0 N
54	37 s	3	56 s	3	12,0 N	39 s	4	29 s	3	14,5 N	57 s	5	37 s	3	10,0 N
55	29 s	2	35 s	3	11,0 N	50 s	3	27 s	2	24,0 N	64 s	2	45 s	3	17,5 N
56	32 s	3	71 s	4	12,0 N	43 s	3	38 s	4	12,0 N	54 s	4	45 s	3	17,0 N
57	33 s	2	38 s	4	11,0 N	44 s	2	26 s	3	13,5 N	60 s	4	43 s	4	16,0 N
58	30 s	2	33 s	4	12,0 N	37 s	3	33 s	3	16,5 N	44 s	3	43 s	5	16,5 N
59	34 s	2	47 s	4	11,0 N	44 s	3	35 s	4	12,5 N	61 s	5	36 s	5	16,0 N
60	31 s	2	48 s	4	12,0 N	34 s	2	28 s	3	13,0 N	56 s	5	48 s	4	15,5 N
61	35 s	3	44 s	4	11,0 N	41 s	2	26 s	3	11,5 N	52 s	4	40 s	4	15,5 N
62	31 s	2	42 s	3	12,0 N	40 s	3	30 s	3	14,0 N	50 s	4	45 s	3	15,5 N

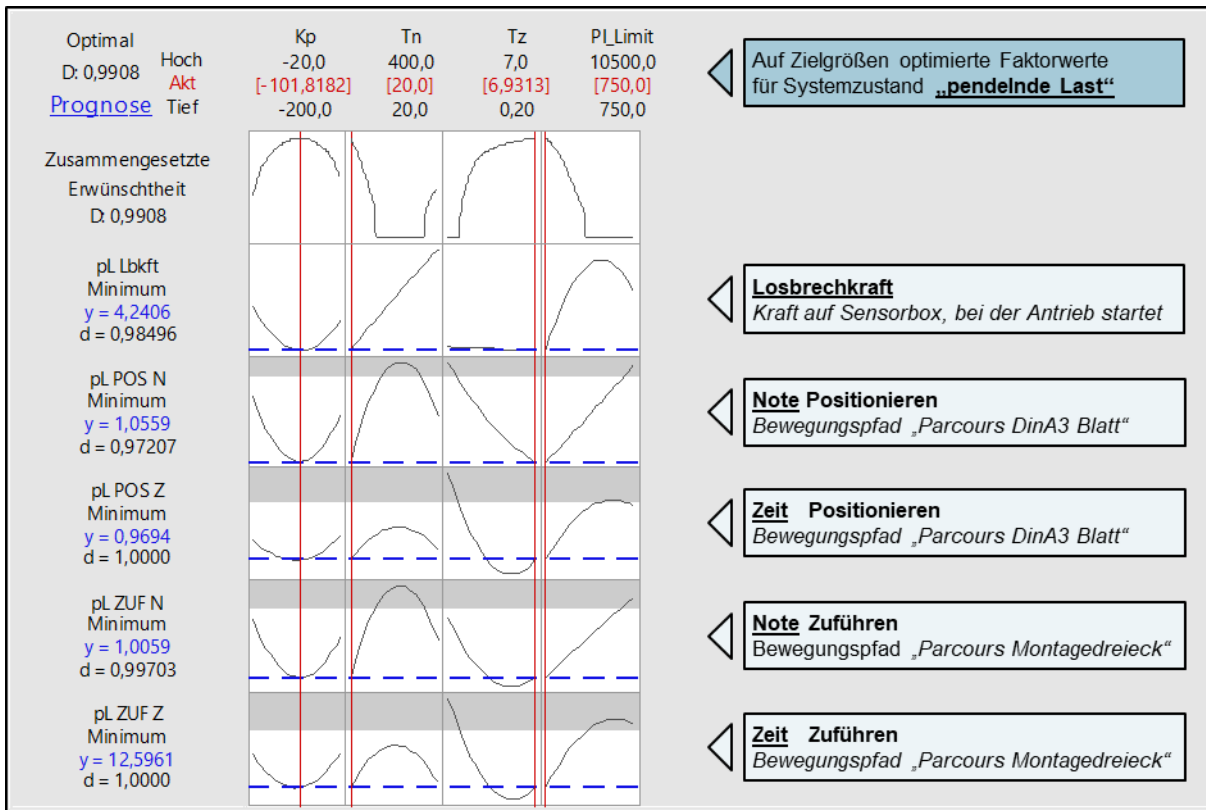


Bild 8.1: Zielgrößenoptimierung für Systemzustand „pendelnde Last“

Response optimizer for system status „swaying load“

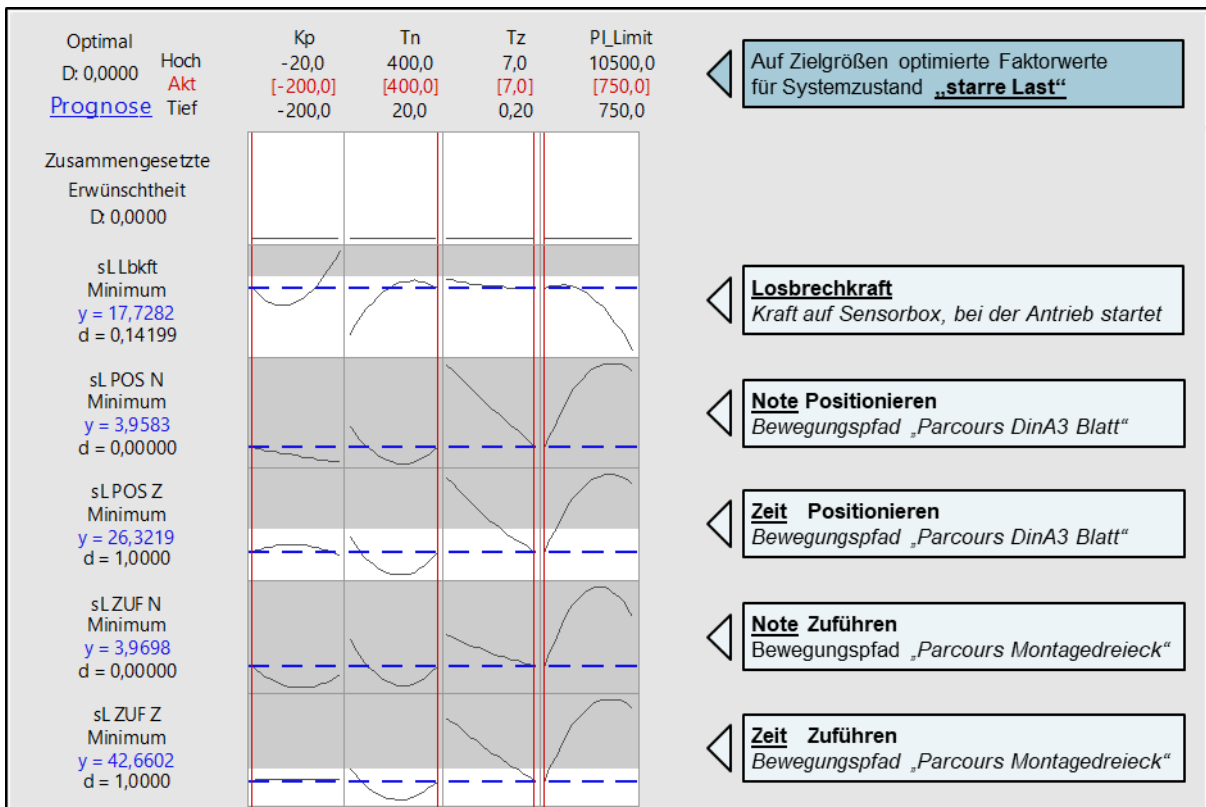


Bild 8.2: Zielgrößenoptimierung für Systemzustand „starre Last“

Response optimizer for system status „rigidly mounted load“

Tabelle 8.11: Messwerttabelle Kraftmesshandschuh Messreihe „B“*Measurement value table Force-Measurement-Glove – Test series “B”*

Test-Nr.	Messreihe	Zeit [s]	Steuerung	Handinnenfläche li. [N]	Handinnenfläche re. [N]	Σ Handinnenfläche li./re. [N]	Differenz re./li. [N]
MAN_01	B	6,7	manuell	227	218	445	-9
MAN_02	B	6,0	manuell	236	265	501	29
MAN_03	B	6,0	manuell	278	275	553	-3
MAN_04	B	6,8	manuell	229	181	410	-48
MAN_05	B	6,2	manuell	193	186	379	-7
MAN_06	B	7,0	manuell	227	184	411	-43
MAN_07	B	6,4	manuell	241	199	440	-42
MAN_08	B	7,2	manuell	221	186	407	-35
MAN_09	B	7,4	manuell	214	191	405	-23
MAN_10	B	7,2	manuell	243	198	441	-45
IAD_01	B	6,7	IAD	82	134	216	52
IAD_02	B	7,7	IAD	64	105	169	41
IAD_03	B	6,6	IAD	87	132	219	45
IAD_04	B	6,2	IAD	107	118	225	11
IAD_05	B	6,8	IAD	111	123	234	12
IAD_06	B	6,3	IAD	115	116	231	1
IAD_07	B	7,0	IAD	80	76	156	-4
IAD_08	B	7,0	IAD	88	98	186	10
IAD_09	B	7,2	IAD	110	99	209	-11
IAD_10	B	6,5	IAD	75	112	187	37

Tabelle 8.12: Messwerttabelle Kraftmesshandschuh Messreihe „C“*Measurement value table Force-Measurement-Glove – Test series “C”*

Test-Nr.	Messreihe	Zeit [s]	Steuerung	Handinnenfläche li. [N]	Handinnenfläche re. [N]	Differenz re. - li.	Σ re+li	0,5*Σ re+li
MAN_11	C	6,0	manuell	147	92	-55	239	120
MAN_12	C	6,0	manuell	178	141	-37	319	160
MAN_13	C	6,0	manuell	163	161	-2	324	162
MAN_14	C	5,8	manuell	132	171	39	303	152
MAN_15	C	5,8	manuell	164	237	73	401	201
MAN_16	C	5,2	manuell	198	133	-65	331	166
MAN_17	C	5,5	manuell	233	225	-8	458	229
MAN_18	C	5,1	manuell	251	160	-91	411	206
MAN_19	C	5,2	manuell	186	179	-7	365	183
MAN_20	C	4,9	manuell	183	192	9	375	188
IAD_11	C	7,0	IAD	55	48	-7	103	52
IAD_12	C	5,7	IAD	76	53	-23	129	65
IAD_13	C	5,8	IAD	90	96	6	186	93
IAD_14	C	6,3	IAD	92	101	9	193	97
IAD_15	C	6,7	IAD	82	125	43	207	104
IAD_16	C	5,7	IAD	79	100	21	179	90
IAD_17	C	6,4	IAD	82	106	24	188	94
IAD_18	C	6,1	IAD	75	111	36	186	93
IAD_19	C	6,3	IAD	67	82	15	149	75
IAD_20	C	5,6	IAD	90	93	3	183	92

<p>1.1</p> <p>Kugellager / Magnetlager für Rot(z)</p>	<p>1.2</p> <p>Kugelgelenk</p>	<p>1.3</p> <p>Kardangelenk + Rot(z)</p>	<p>1.4</p> <p>Zwei Kniegelenke für Rot(x) und Rot(y)</p>	<p>1.5</p> <p>Wirbel für Rot(z)</p>	<p>1.6</p> <p>X-Pode (Tripod...)</p>
<p>1.7</p> <p>Gewölbte Platte</p>	<p>1.8</p> <p>Zugbrücke</p>	<p>1.9</p> <p>Feder + Kumpenscheibengetriebe</p>	<p>1.10</p> <p>Einfaches Kniegelenk</p>	<p>1.11</p> <p>Hebezeuge</p>	<p>1.12</p> <p>Fluidkissen</p>
<p>1.13</p> <p>Über Rollen verbundenes, einachsiges Hebezeug</p>	<p>1.14</p> <p>FESTO-Muskel</p>	<p>1.15</p> <p>Zweiachs-Drehung über Rollen</p>	<p>1.16</p> <p>Schiefe Ebene</p>	<p>1.17</p> <p>Drehbare Traverse mit Ketten</p>	<p>1.18</p> <p>Drehbare Traverse mit steifer Verbindung zur Last</p>
<p>1.19</p> <p>axial Biegung FESTO-Rüssel</p>	<p>1.20</p> <p>Virtuelle Drehachse</p>	<p>1.21</p> <p>Metallbalg für Rot(VY)</p>	<p>1.22</p> <p>Zweiachs-Drehung über Rollen</p>	<p>1.23</p> <p>Zonen-Luftkissen</p>	

Bild 8.3: Teillösungen für Funktion „Orientierung ändern“
Partial solutions for function „Changing orientation“

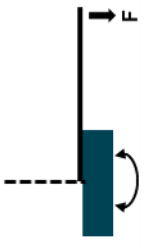
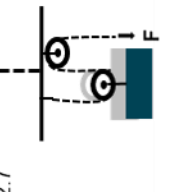
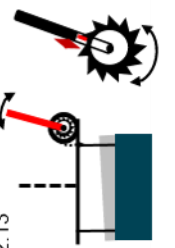
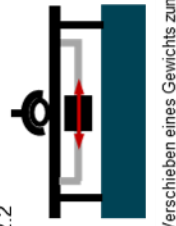
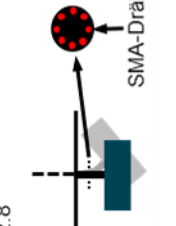

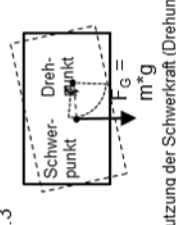
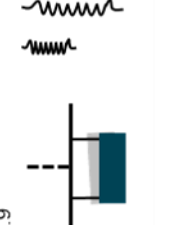
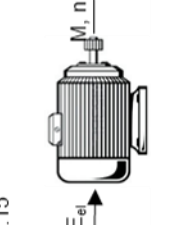
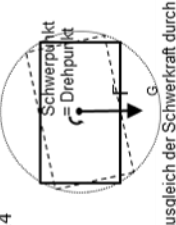
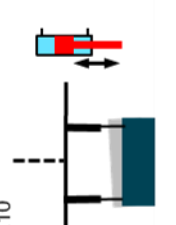

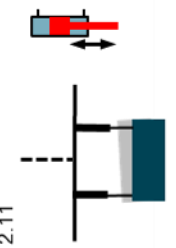
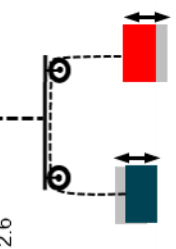
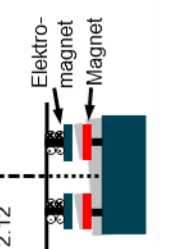
<p>2.1</p>  <p>Einfacher Hebel</p>	<p>2.7</p>  <p>Flaschenzugprinzip</p>	<p>2.13</p>  <p>Ratsche als Hebel</p>	<p>2.2</p>  <p>Verschieben eines Gewichts zum Massenausgleich → Waageprinzip</p>	<p>2.8</p>  <p>SMA-Drähte</p>	<p>2.14</p>  <p>Untersetzendes Getriebe</p>	<p>2.3</p>  <p>Nutzung der Schwerkraft (Drehung außerhalb Lastschwerpunkt)</p>	<p>2.9</p>  <p>Federn und Kompressible Stoffe</p>	<p>2.15</p>  <p>Elektromotor</p>	<p>2.4</p>  <p>Ausgleich der Schwerkraft durch Drehung um Last-SP</p>	<p>2.10</p>  <p>Pneumatik</p>	<p>2.5</p>  <p>Kurbel Gewinde/ Untersetzung</p> <p>Wagenheberprinzip</p>	<p>2.11</p>  <p>Hydraulik</p>	<p>2.6</p>  <p>Gegengewicht</p>	<p>2.12</p>  <p>Elektromagnet Magnet</p> <p>Magnetismus</p>		
Bedienkraft unterstützen																

Bild 8.4: Teillösungen für Funktion „Bedienkraft unterstützen“
Partial solutions for function „Supporting operating-force“

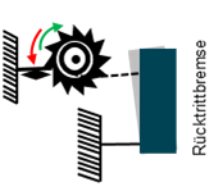
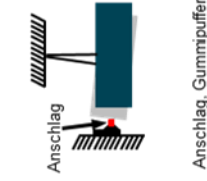
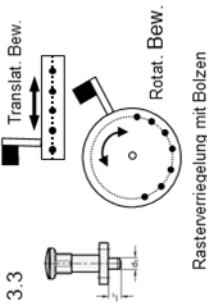
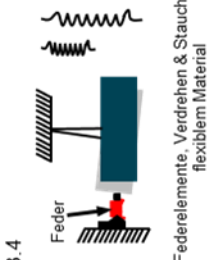
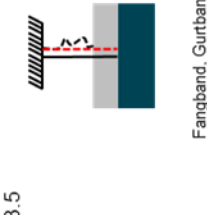
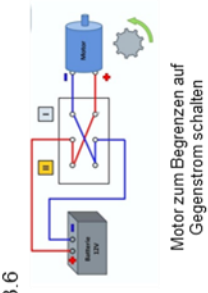
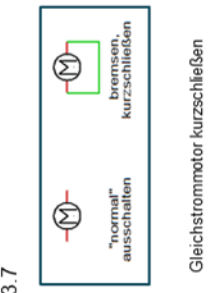
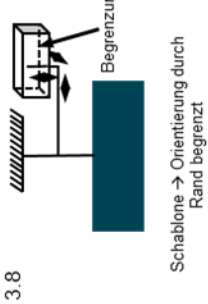
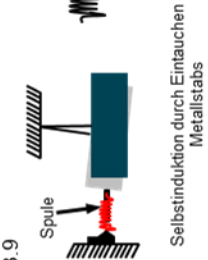
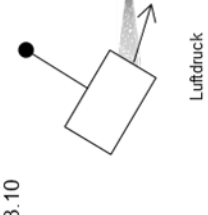
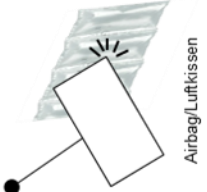
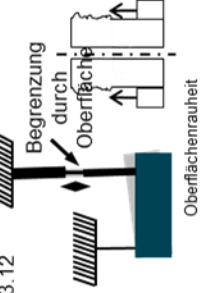
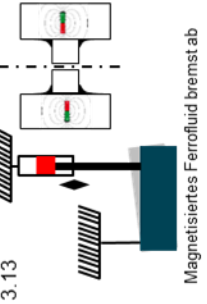
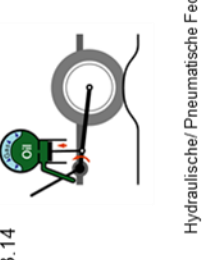
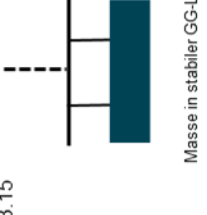
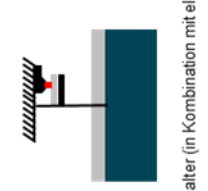
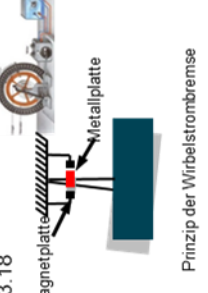
<p>3.1</p>  <p>Rücktrittbremse</p>	<p>3.2</p>  <p>Anschlag</p>	<p>3.3</p>  <p>Translat. Bew. Rotat. Bew. Rasterverriegelung mit Bolzen</p>	<p>3.4</p>  <p>Feder</p> <p>Federelemente, Verdrehen & Stauchen von flexiblem Material</p>	<p>3.5</p>  <p>Fangband, Gurtband</p>
<p>3.6</p>  <p>Motor zum Begrenzen auf Gegenstrom schalten</p>	<p>3.7</p>  <p>Gleichstrommotor kurzschließen "normal" ausschalten bremsen, kurzschließen</p>	<p>3.8</p>  <p>Begrenzung Schablone → Orientierung durch Rand begrenzt</p>	<p>3.9</p>  <p>Spule Selbstinduktion durch Eintauchen eines Metallstabs</p>	<p>3.10</p>  <p>Luftdruck</p>
<p>3.11</p>  <p>Airbag/Luftkissen</p>	<p>3.12</p>  <p>Begrenzung durch Oberflächen Oberflächenrauheit</p>	<p>3.13</p>  <p>Magnetisiertes Ferrofluid brems ab</p>	<p>3.14</p>  <p>Hydraulische/ Pneumatische Feder</p>	<p>3.15</p>  <p>Masse in stabiler GG-Lage</p>
<p>3.16</p>  <p>Endschalter (in Kombination mit ei. Antrieb)</p>	<p>3.18</p>  <p>Magnetplatte Metallplatte Prinzip der Wirbelstrombremse</p>			

Bild 8.5: Teillösungen für Funktion „Orientierung begrenzen“
Partial solutions for function „Limiting orientation”

<p>4.1</p> <p>Rücklaufsperrung</p>	<p>4.2</p> <p>Federschnapper</p>	<p>4.3</p> <p>Rastverriegelung mit Bolzen</p>	<p>4.4</p> <p>Feststellschraube</p>	<p>4.5</p> <p>Verkeilen, Klemmkraft</p>	<p>4.6</p> <p>Loch/Haken Bolzen-Kombination</p>	<p>4.7</p> <p>Klemmen/Anpressen</p>	<p>4.8</p> <p>Klettverschluss/Klettband</p>	<p>4.9</p> <p>Gelenk Feststellen</p>	<p>4.10</p> <p>Elektromagnet</p>	<p>4.11</p> <p>Motor mit Haltemoment (Schrittmotor)</p>	<p>4.12</p> <p>Magnetische Rasterplatte</p>	<p>4.13</p> <p>Magnetisiertes Ferrofluid</p>	<p>4.14</p> <p>Selbsthemmendes Getriebe</p>	<p>4.15</p> <p>Magnetsismus</p>	<p>4.16</p> <p>Endschalter (in Kombination mit el. Antrieb)</p>	<p>4.17</p> <p>Einrasten bei fehlendem Druck (Pneumatik/Hydraulik)</p>	<p>4.18</p> <p>Einrasten bei fehlender Energiezufuhr (Transrapid)</p>
Orientierung fixieren																	

Bild 8.6: Teillösungen für Funktion „Orientierung fixieren“
Partial solutions for function „Setting orientation“

Zugehörige studentische Arbeiten

In Zusammenhang mit den Analysetätigkeiten, der Ermittlung von Anforderungen sowie den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Erstellung und Validierung des IAD-Konzepts entstanden studentische Abschlussarbeiten, deren Ergebnisse partiell in die vorliegende Dissertation eingeflossen sind. Die Arbeiten entstanden unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors und werden im Folgenden aufgelistet. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung der vorliegenden Arbeit.

- **Denis Hessel:** „Anforderungen an ein modulares Handhabungs- und Montagekonzept in der LKW-Produktion“, Masterarbeit, 2015.
- **Isabell Mencher:** „Handhabungseinrichtungen für die Lkw-Endmontage – Marktanalyse und Versuchsaufbau“, Masterarbeit, 2015.
- **Sören Roman Marko:** „Entwicklung eines Konzepts für teilautomatisierte Handhabungsaufgaben in der Lkw-Produktion“, Bachelorarbeit, 2016.
- **Christian Riemer:** „Anwendung von Low Cost Automatisierung in einem Unternehmen am Beispiel von Daimler Truck“, Masterarbeit, 2016.