

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage

Yi Shen

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter,
Ruhr-Universität Bochum

Die Dissertation wurde am 17.03.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 30.06.2015 angenommen.

Yi Shen

**System für die Mensch-Roboter-Koexistenz
in der Fließmontage**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 305

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4520-6

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Ich bedanke mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme der Ruhr-Universität Bochum, für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner, dem Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München, bedanke ich mich herzlich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Mein ausdrücklicher Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Rüdiger Spillner für die enge, konstruktive Zusammenarbeit und die spannenden gemeinsamen Diskussionen. Besonderer Dank gilt an dieser Stelle dem Leiter der mechanischen Werkstatt am *iwb* Anwenderzentrum Augsburg, Herrn Kurt Hartmann, der mich tatkräftig unterstützt und begleitet hat. Herrn Dr.-Ing. Gerhard Straßer, Herrn Dominik Simon und Frau Bettina Schwarz danke ich für die kritische Begutachtung des Manuskripts und die wertvollen Anregungen. Hervorheben möchte ich meine ehemaligen Kollegen Herrn Christian Thiemann und Herrn Fabian Riß aus dem Büro 22 und mich für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken.

Nicht zuletzt gilt mein aufrichtiger Dank meinen Eltern, die mich in meinem Handeln stets unterstützt und gefördert haben und mir diesen spannenden Weg ermöglicht haben. In ganz besonderem Maße danke ich Dir, Ronit, für Deine unermüdliche Unterstützung, den notwendigen Rückhalt, Deine Geduld und Dein Verständnis, die mich während der Erstellung dieser Arbeit stets begleitet haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	xi
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Flexibilitätssteigerung durch Arbeitsraumteilung	2
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Industrieroboter.....	7
2.1.1 Grundkomponenten und -begriffe	7
2.1.2 Entwicklung und Einsatzfeld.....	8
2.1.3 Programmierverfahren und Robotersteuerung	10
2.2 Mensch-Roboter-Kooperation	12
2.2.1 Einführung	12
2.2.2 Formen der Kooperation.....	15
2.3 Sicherheit in der Kooperation.....	17
2.3.1 Allgemeines	17
2.3.2 Einsatzvoraussetzungen.....	19
2.3.3 Sicherheitsmaßnahmen	21
2.3.4 Normative Rahmenbedingungen	22
2.4 Sicherheitsstrategien	26

2.4.1	Einführung.....	26
2.4.2	Energieabsorption.....	27
2.4.3	Kontaktdetektion und -reaktion.....	30
2.4.4	Kontaktprädiktion und -reaktion	32
2.4.5	Lokalisierung.....	36
2.4.6	Bewertung bestehender Ansätze	38
2.5	Konkretisierung des Handlungsbedarfs	42
3	Anforderungen an eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage	45
3.1	Allgemeines.....	45
3.2	Montageprozess.....	46
3.3	Arbeitsraumüberwachung	47
3.4	Roboterbahnplanung	49
3.5	Ökonomische Effizienz	52
3.6	Systemaufbau	53
3.7	Fazit.....	53
4	Konzeption und Systementwurf	55
4.1	Übersicht und Vorgehen.....	55
4.2	Entwurf des Synchronisationskonzepts.....	57
4.2.1	Systemgrenzen und Synchronisationskaskade	57
4.2.2	Synchronisationsprinzip	58
4.2.3	System I: Montagehauptkörper – Roboter	59
4.2.4	System II: Roboter – Überwachungsraum	61
4.3	Statechart-Modell	62

4.3.1	Allgemeines	62
4.3.2	Industrieroboter als Statechart	63
4.4	Robotermodell	64
4.4.1	Allgemeines	64
4.4.2	Modellierungsräume	65
4.4.3	Koordinatentransformation	66
4.4.4	Systemtheoretische Betrachtung	68
4.4.5	Auswahl Identifikationsverfahren	70
4.4.6	Systemidentifikation	73
4.4.7	Prädiktion	78
4.5	Arbeitsraumüberwachung und -synchronisation	80
4.5.1	Allgemeines	80
4.5.2	Positionserkennung	82
4.5.3	Ablaufmodellierung	83
4.5.4	Arbeitsraumsynchronisation	95
4.5.5	Zwischenfazit	101
4.6	Umgebungsmodell	102
4.6.1	Allgemeines	102
4.6.2	Konkretisierung der Aufgabe	103
4.6.3	Mapping	105
4.6.4	Simplifizierung	110
4.7	Roboterbahnplanung	113
4.7.1	Allgemeines	113
4.7.2	Bahnplanung – Montageprozess	114
4.7.3	Bahnregelung – Re-Synchronisation	115

4.7.4	Bahnanpassung – Kollisionsvermeidung	117
4.8	Zusammenfassung des Konzepts.....	129
5	Systemaufbau und -erprobung.....	131
5.1	Einführung.....	131
5.2	Systemaufbau	131
5.2.1	Übersicht.....	131
5.2.2	Elektrohängebahn mit PKW-Karosse	132
5.2.3	Vertikalknickarmroboter mit Endeffektor.....	132
5.2.4	Kamerasystem	134
5.2.5	Laserscanner	134
5.2.6	Robotersteuerung und Echtzeitsystem	134
5.3	Kommunikationsarchitektur	135
5.3.1	Übersicht.....	135
5.3.2	Schnittstellen	136
5.4	Anwendungsbeispiel	138
5.4.1	Einführung.....	138
5.4.2	Förderbandsynchrone Montage	138
5.4.3	Koexistenz	139
5.5	Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbetrachtung.....	142
5.5.1	Allgemeines.....	142
5.5.2	Erforderliche Sicherheit.....	143
5.5.3	Entwicklungsmaßnahmen.....	143
5.5.4	Auslegung.....	143
5.5.5	Testroutinen.....	145

5.6	Fazit	146
6	Bewertung.....	147
6.1	Allgemeines	147
6.2	Technische Bewertung.....	148
6.2.1	Funktionsbewertung	148
6.2.2	Flexibilitätsbewertung	150
6.3	Wirtschaftliche Bewertung	152
6.3.1	Kostenstruktur.....	152
6.3.2	Kostenvergleichsrechnung.....	154
6.3.3	Kosteneinfluss Personal.....	155
6.3.4	Kosteneinfluss Hardware.....	157
6.3.5	Kosteneinfluss Verfügbarkeit	158
6.4	Fazit	161
7	Schlussbetrachtung.....	163
7.1	Zusammenfassung	163
7.2	Ausblick.....	165
8	Literaturverzeichnis	167
9	Studienarbeiten	193

Abkürzungsverzeichnis

2D, 3D	zweidimensional, dreidimensional
APAS	Automatischer Produktions-Assistent
ASCII	American Standard Code for Information Inter- change
ASEAN	Association of Southeast Asian Nations
BA	Bahnanpassung
BioRob	Bionic Robotics
BK	Betriebskosten
BP	Bahnplanung
BR	Bahnregelung
BRIC	Brasilien, Russland, Indien und China
BROMMI	Bionische Rüsselkinematik für sichere Roboteran- wendungen in der Mensch-Maschine-Interaktion
CAD	Computer-Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CCF	Common Cause Failure
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CP	Collision Point
DC	Diagnostic Coverage
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
EHB	Elektrohängbahn
EN	Europäische Norm

FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FSM	Finite State Machine
FTP	File Transfer Protocol
HK	Hardwarekosten
HMM	Hidden Markov Modell
IAD	Intelligent Automation Device
IAS	Intelligent Assist Systems
ICP	Iterative Closest Points
IEC	International Electrotechnical Commission
IFF	Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung
IFR	International Federation of Robotics
I/O	Input/Output
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
IPK	Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik
IPOC	Input-Process-Output-Counter
ISO	International Organization for Standardization
KCP	KUKA Control Panel
KMS	Kraft-Momenten-Sensor
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
KNN	künstliche neuronale Netze
KOS	Koordinatensystem
KRC	KUKA Robot Control

KRL	KUKA Robot Language
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LBR iiwa	KUKA Leichtbauroboter intelligent industrial work assistant
MA	Mitarbeiter
MATLAB	MATrix LABoratory
MG	Modellgütewert
MIMO	Multiple-Input-Multiple-Output
MPC	Model Predictive Control
MTTF	Mean Time To Failure
MRK	Mensch-Roboter-Koexistenz
MRMMK	Multi-Roboter-Multi-Mensch-Koexistenz
NI	National Instruments
PKW	Personenkraftwagen
PL	Performance Level
PL _r	Performance Level required
PN	Petri-Netz
PRM	Probabilistic Roadmaps
RAMP	Real-Time Adaptive Motion
RK	Realisierungskosten
RMS	Root Mean Square
RRT	Rapidly-Exploring Random Trees
RSI	Robot Sensor Interface
RT	Real-Time

RWT	Rückwärtstransformation
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SISO	Single-Input- Single-Output
SK	Stillstandskosten
STL	Surface Tessellation Language
TCP	Tool Center Point
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TOTE	Test- Operate-Test-Exit
TS	Technical Specification
UR®	Universal Robot
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VWT	Vorwärtstransformation
XML	Extensible Markup Language

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
A_{Rob}	Roboter Systemmatrix
A_{HMM}	Hidden Markov Transitionsmatrix
B_{Rob}	Roboter Eingangsmatrix
B_{HMM}	Hidden Markov Emissionsmatrix
C_{Rob}	Roboter Ausgangsmatrix
D_{Rob}	Roboter Durchgangsmatrix
F_{BA}	virtuelle Ablenkungskraft
F_H	Haftkraft
F_N	Normalkraft
G	Gütemaß für die Bahnanpassung
I	Eingabeeinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
J_{TCP}	Jakobimatrix des Roboter-TCP
K	Kostenwert
L	Logikeinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
L_{Rob}	Roboter Kalman Verstärkungsfaktor
MG	Modellgütwert
N_c	Kamera Steuerungshorizont
N_p	Kamera Prädiktionshorizont
O	Ausgabeeinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
O_T	Beobachtungssequenz des Hidden Markov Modells
O_{TE}	Ausgang der Testeinrichtung

Verzeichnis der Formelzeichen

$P_{i,j}$	Punktefolge für einen Montageprozess
P_{Rob}	Roboter Kovarianzmatrix des Schätzfehlers
Q	Gewichtungsmatrix für die Optimierung der Bahnanpassung
R_{Rob}	Roboter Kovarianzmatrix des Messrauschens
T	DH-Transformationsmatrix
TE	Testeinrichtung einer Sicherheitsarchitektur
T_R	rotatorische Transformationsmatrix
T_T	translatorische Transformationsmatrix
$\dot{V}$	Volumenstrom
X_{TCP}	kartesische Roboterpose des TCP

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
c	Kreuzvergleichseinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
d_r	Reaktionsabstand für die Bahnanpassung
d_s	kürzester Abstand zwischen Roboter und Umgebungsobjekten
e	Anzahl der Kanten bei Polygonen
e_{BA}	Richtung der virtuellen Ablenkungskraft F_{BA}
e_s	Richtung des Oberflächenabstands d_s
f	Anzahl der Flächen bei Polygonen
i	Verbindung innerhalb einer Sicherheitsarchitektur
k_{BA}	Verstärkungsfaktor für die Bahnanpassung
k_P	Verstärkungsfaktor für den achssynchronen Positionsregler
m	Überwachungseinheit innerhalb einer Sicherheitsarchitektur

n_{red}	Grad der Netzvereinfachung
p_i	virtuelle Punktwolke
q_i	abgetastete Punktwolke
r_A	Ortsvektor zum Punkt A eines Kugelzylinders
r_B	Ortsvektor zum Punkt B eines Kugelzylinders
r_{cp}	Ortsvektor des Collision Point im Basis-Koordinatensystem
r_{TCP}	Ortsvektor des TCP im Basis-Koordinatensystem
r_{Werker}	Ortsvektor der Werkerposition im Basis-Koordinatensystem
$u_{Rob,k}$	Roboter Eingang
v	Anzahl der Ecken bei Polygonen
$\bar{v}$	Zusammengefasster Knotenpunkt
v_{BR}	TCP-Sollgeschwindigkeit des Bahnreglers
$v_{BR,trans}$	translatorische TCP-Sollgeschwindigkeit des Bahnreglers
$v_{Rob,k}$	Roboter Messrauschen
v'_{BA}	Sollgeschwindigkeit mit virtueller Ablenkungskraft
$v_{BA,Final}$	finale translatorische Sollgeschwindigkeit
$w_{Rob,k}$	Roboter Systemrauschen
x	kartesische Koordinate im Basis-Koordinatensystem
x_{Rob}	realer Zustandsvektor für einen Roboter Freiheitsgrad
$\hat{x}_{Rob}$	geschätzter Zustandsvektor für einen Roboter Freiheitsgrad
y	kartesische Koordinate im Basis-Koordinatensystem
y_c	Kamera Ausgang
y_{Rob}	Ausgang Roboter für einen Freiheitsgrad
$\hat{y}_{Rob}$	geschätzter Roboter Ausgang für einen Freiheitsgrad

Verzeichnis der Formelzeichen

z kartesische Koordinate

Große griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
Φ_{Grenze}	Grenzbereich für die Arbeitsbereichslimitierung

Kleine griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
α	Rotation um z-Achse
β	Rotation um y-Achse
δ_{BA}	Entscheidungsfaktor für die Bahnanpassung
γ	Rotation um x-Achse
ε	quadratische Optimierungsfunktion für den ICP
θ	Roboterachswinkel
θ_{min}	untere Schranke für Gelenkwinkelstellungen
θ_{max}	obere Schranke für Gelenkwinkelstellungen
$\dot{\theta}_{max}$	obere Schranke für Gelenkwinkelgeschwindigkeiten
π_{HMM}	Hidden Markov Startwahrscheinlichkeit
φ_{TCP}	Orientierung des Roboter-TCP
$\omega_{BA,rot}$	rotatorische Sollgelenkgeschwindigkeit aus der Bahnanpassung

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die industrielle Produktion ist der zentrale Treiber für Wertschöpfung und Beschäftigung und unterliegt einem kontinuierlichen Wandel (ABELE & REINHART 2011). Neben Globalisierungseffekten infolge entscheidender Lohnvorteile in den BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien und China) (O'NEILL 2001) stellen insbesondere soziale und rechtliche Treiber eine bedeutende Herausforderung dar. Diese langfristigen Entwicklungen, sogenannte Megatrends, haben einen signifikant nachhaltigen Einfluss. So führen die zunehmende Urbanisierung (FRAUNHOFER GESELLSCHAFT 2012), die gesetzliche Regulierung von Ressourcen (EUROPÄISCHE UNION 2006) und der demographische Wandel (EUROPEAN COMMISSION 2011) zu einem Paradigmenwechsel in der Produktionstechnik.

Ein besonderer Fokus wird in diesem turbulenten Umfeld auf die Montage als letzten Schritt der Wertschöpfungskette gelegt. Nach LOTTER & WIENDAHL (2012) verantwortet die Montage einen Lohnkostenanteil zwischen 55 % und 75 % der Herstellkosten. Typischerweise liegt der Anteil manueller Tätigkeiten innerhalb der Automobilmontage bei über 95 % (HOLWEG & PIL 2004). Dies zeigt die hohe Relevanz manueller Arbeitsanteile in der Montage. Im Hinblick auf die weltweite demographische Entwicklung einer alternden Gesellschaft (DELLER ET AL. 2008) lässt sich prognostizieren, dass sich die existierenden Rahmenbedingungen für die industrielle Montage langfristig signifikant verändern werden. Insgesamt stehen somit in Zukunft im Verhältnis zur Gesamtbevölkerung weniger junge Arbeitskräfte zur Verfügung, bei gleichzeitig längerer Lebensarbeitszeit und späterem Renteneintrittsalter. Unterstellt man einen direkten Zusammenhang zwischen dem steigenden Bevölkerungsalter und einer durchschnittlich alternden Firmenbelegschaft, ergeben sich für die Montage vielfältige Konsequenzen. So stellen Veränderungen menschlicher Leistungsparameter innerhalb der mitarbeiterintensiven Montage eine große Herausforderung dar.

Als Montageoperation wird nach VDI 2860 die Kombination aus Füge-, Handhabungs-, Justier- und Kontrollfunktion verstanden, deren Ausführung zwar unterschiedliche Komplexitäten annehmen kann, überwiegend jedoch einen hohen physischen Leistungsanteil einnimmt (LOTTER & WIENDHAL 2012, ZÄH ET AL. 2005). Dies hat zur Folge, dass der durch manuelle Leistungsanteile do-

minierten Serienmontage eine hohe Relevanz zukommt (EGBERS ET AL. 2012, LOTTER & WIENDAHL 2012, NYHUIS ET AL. 2004, PRASCH 2010, REINHART ET AL. 2012A, SCHLICK ET AL. 2010).

Neben existierenden organisatorischen und technischen Wirkungsfeldern haben vor allem die Planung sowie die Ausgestaltung flexibler Montagesysteme im Hinblick auf die Limitierung und Minimierung physischer sowie kognitiver Belastungen eine besondere Relevanz und erfordern den Einsatz flexibler Automationslösungen (SPILLNER 2014). Dieser ist nicht nur aus ergonomischen, sondern auch aus qualitativen und wirtschaftlichen Gründen erforderlich (ROSCHER 2008, LAY & SCHIRRMEISTER 2001).

Zur Festigung der globalen Wettbewerbsfähigkeit stellt die Reduktion von Produktions- und Montagekosten eine prägende Rolle dar und erfordert nach BARBEY ET AL. (1992):

- die Steigerung von flexiblen Automatisierungslösungen in der Montage und
- einen produktiven und zielgerichteten Einsatz der menschlichen Arbeitskraft.

Dies verändert maßgeblich die Rahmenbedingungen für Automationslösungen. Ein zentrales Element der industriellen Automatisierung stellen in diesem Kontext Industrieroboter dar – mit den wesentlichen Vorteilen Produktivitätssteigerung, Kostensenkung sowie einer erhöhten Produkt- und Prozessqualität (SCHUH ET AL. 2005, THE BOSTON CONSULTING GROUP 2005). Der anhaltende Trend von Großserien mit hohen Stückzahlen hinzu kleinen bis mittelgroßen Losgrößen und die zunehmenden Flexibilitätsanforderungen an Produktionssysteme durch die sukzessiv steigende Variantenvielfalt stellen in diesem Kontext große Herausforderungen dar (ABELE & REINHART 2011).

1.2 Flexibilitätssteigerung durch Arbeitsraumteilung

Kontinuierliche Fließmontagesysteme bieten hinsichtlich der Flexibilität Vorteile gegenüber Standmontagesystemen oder getakteten Montagesystemen. Die wesentlichen montage- und arbeitsrelevanten Flexibilitätsarten nach TIDD (1997) sind:

- *Volumenflexibilität* – Fähigkeit unter den grundlegenden Profitabilitätskennzahlen wirtschaftlich variierende Stückzahlen fertigen zu können.
- *Variantenflexibilität* – Fähigkeit eines Produktionssystems verschiedene Varianten oder Produkte fertigen zu können.
- *Produkt-Mix-Flexibilität* – Fähigkeit variierende Produkt-Mix-Verhältnisse produzieren zu können. Diese beinhaltet automatisch die Möglichkeit die Tätigkeiten unterschiedlicher Komplexitätsgrade der verschiedenen Produktvarianten untereinander zu kombinieren.
- *Nachfolgeflexibilität* – Fähigkeit des Produktionssystems partiell für Nachfolgeprodukte wiederverwertbar zu sein und somit Investitionen zu vermeiden bzw. zu minimieren.

In diesem Zusammenhang wird die Fließmontage als Schlüsseltechnologie angesehen (TIDD 1997, KRATZSCH 2000). Offene Stationsgrenzen ermöglichen dem Werker sich mit dem bewegten Montageobjekt über geplante Stationsgrenzen hinweg zu bewegen und zugewiesene Tätigkeiten auszuführen, die über die Taktzeit hinausgehen. Dies erlaubt einen Montagestart vor Erreichen einer Station (GANS 2009). Somit wirken die offenen Stationsgrenzen als Puffer für Arbeitszeitschwankungen.

Neben dem Einsatz von Automationslösungen in der förderbandsynchronen Fließmontage (DIRNDORFER 1993) ist der Stellenwert der menschlichen Flexibilität nach wie vor unübertroffen bzw. lässt sich durch Automationslösungen nur unwirtschaftlich substituieren (REINHART ET AL. 2011, SPATH ET AL. 2013). Hybride Automatisierung, basierend auf einer Arbeitsraumteilung zwischen Mensch und Roboter, wie z. B. in der Mensch-Roboter-Koexistenz, stellt sowohl aus technischer als auch wirtschaftlicher Perspektive eine vielversprechende Möglichkeit dar, den zukünftigen Anforderungen zu begegnen (HAAS 2012, KRÜGER ET AL. 2009). Der Einsatz trennender Schutzeinrichtungen führt jedoch dazu, dass ein Verweilen des Werkers auf dem Förderband, zum Beispiel aufgrund von Nacharbeit oder bei variierenden Arbeitsinhalten, nicht möglich ist (WERNER 2009). Daher können die Vorteile der Fließmontage nicht vollständig ausgeschöpft werden.

Die Möglichkeit manuelle Tätigkeiten mit automatisierten Montageprozessen am sich bewegenden Montagebasisteil, dem Montagehauptideal (WERNER 2009), zu kombinieren würde zu signifikanten Effizienz- und Flexibilitätssteigerungen führen. Primäre Voraussetzung hierfür ist eine sensorische Erfassung des Men-

schen zur Vermeidung von Kollisionen. Im Falle ortsflexibler Montagepositionen, wie in der Fließmontage üblich, dominieren dynamische Einflussfaktoren, die neben der Sicherheit ebenfalls die Systemverfügbarkeit adressieren.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Steigerung der Flexibilität von Fließmontagesystemen durch eine Arbeitsraumteilung von Mensch und Roboter und umfasst die methodische Konzeption sowie technische Lösungsentwicklung, um manuelle Tätigkeiten am Montagehauptkörper bei gleichzeitig automatisierter Montage durch den Roboter zu ermöglichen. Die ortsflexible Bereichsüberwachung und Roboterbahnadaption innerhalb der kontinuierlichen Fließmontage stellen im Rahmen dieser Arbeit die wesentlichen Kernpunkte dar.

Die vorliegende Arbeit umfasst sieben Kapitel, deren Aufbau und Struktur aus Abbildung 1-1 entnommen werden kann. Im ersten Kapitel werden die Ausgangssituation, die Herausforderungen für zukünftige Montagesysteme und die daraus abgeleitete Zielsetzung beschrieben und hierfür der erforderliche Betrachtungsraum eingegrenzt.

Kapitel 2 fokussiert die Aufarbeitung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik. Hier werden zunächst die allgemeinen Grundlagen zum Themenverständnis umrissen und dargestellt. Neben Begriffsdefinitionen und thematischen Eingliederungen werden primäre technische Aspekte der Robotik sowie der Mensch-Roboter-Kooperation im Umfeld der Montage erläutert und die resultierenden Herausforderungen abgeleitet. Neben einer Klassifikation der in der Literatur vorhandenen Ansätze zur Kollisionsvermeidung von Industrierobotern werden im Wesentlichen Arbeiten zu Sicherheitsstrategien für die Arbeitsraumteilung sowie deren Flexibilitätspotenzial vorgestellt und erläutert. Auf dieser Basis erfolgen die Konkretisierung sowie die Präzisierung des Handlungsbedarfs.

Ausgehend von Kapitel 2 stellt der Schwerpunkt des dritten Kapitels die Analyse von allgemeinen Anforderungen in Bezug auf Montageprozess, Arbeitsraumüberwachung und Roboterbahnplanung für die Fließmontage dar. Diese umfassen neben technischen Prozessanforderungen ebenfalls wirtschaftliche Randbedingungen.

Ein Vorgehen für den Entwurf einer ortsflexiblen Arbeitsraumüberwachung und der damit verbundenen Kollisionsvermeidung für die Mensch-Roboter-

Koexistenz ist Inhalt von Kapitel 4. Anhand der vorliegenden Problemstellungen erfolgt die Spezifikation relevanter Teilfunktionen und -verfahren und der methodische Entwurf einzelner Systemmodule sowie deren Einbettung in das Gesamtsystem.

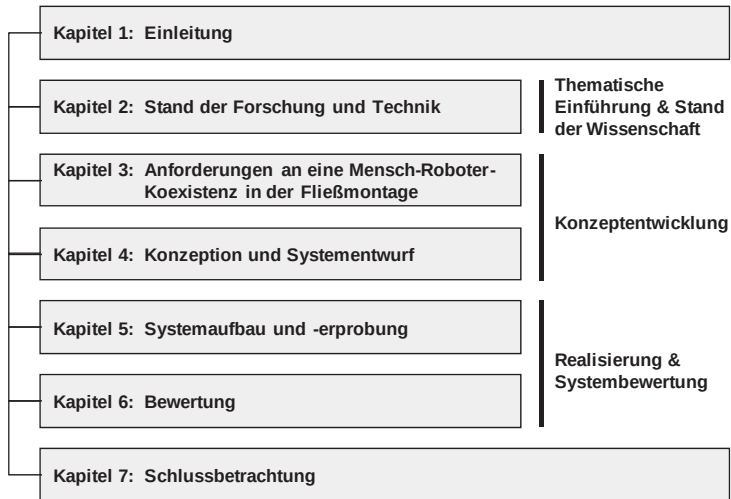


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

Die Beschreibung eines industriellen Anwendungsbeispiels und die Umsetzung einer Pilotanlage stellen die Schwerpunkte des fünften Kapitels dar. In diesem werden die vorgestellten Systemmodule prototypisch umgesetzt und näher erläutert.

Die Bewertung des Systems anhand des gewählten Anwendungsbeispiels erfolgt in Kapitel 6. Dieses gliedert sich in die technische Betrachtung der umgesetzten Funktionen sowie in eine Analyse der Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage.

Den Abschluss der Arbeit bildet Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung der erarbeiteten Erkenntnisse und einem Ausblick auf zukünftige Problemstellungen und Arbeiten auf diesem Themengebiet.

2 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Komponenten und Formen der Mensch-Roboter-Kooperation. Es charakterisiert ihre Anwendungsgebiete und erörtert die grundlegenden sicherheitstechnischen Standards sowie Rahmenbedingungen für deren Einsatz in der Produktion. Darauf aufbauend erfolgt eine abschließende Konkretisierung des vorliegenden Handlungsbedarfs.

2.1 Industrieroboter

2.1.1 Grundkomponenten und -begriffe

Die DIN EN ISO 8373 definiert einen Industrieroboter als einen „automatisch gesteuerten, frei programmierbaren Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann“.

Entsprechend der Kinematik, d. h. der geometrischen Anordnung, Art und Anzahl vorhandener Gelenke, lässt sich der mechanische Aufbau des Industrieroboters klassifizieren. Es handelt sich um eine serielle Kinematik, falls nur eine kinematische Kette zwischen Roboterfuß und dem Endeffektor vorliegt. Erfolgt die Bewegung durch mehrere kinematische Ketten, so wird dies als parallele Kinematik bezeichnet. Die Kombination rotatorischer und translatorischer Gelenke ermöglicht die eindeutige Beschreibung der Arbeitsräume verschiedener Robotertypen. Die Roboterpose beschreibt die Gesamtheit der aktuellen Achsstellungen, durch die eine Position mitsamt Orientierung definiert ist.

Ein grundlegender Bestandteil eines Industrieroboters ist der Endeffektor, der per Definition nach DIN EN ISO 8373 „eine Maschine [ist], deren Mechanismus aus einer Folge von Komponenten besteht, die durch Gelenke gegeneinander verschieblich verbunden sind, mit dem Zweck, Gegenstände zu greifen oder zu bewegen [...]“.

Für den Industrierobotereinsatz ist nach DIN EN ISO 8373 eine Steuerung erforderlich, die einen „Satz logischer Steuer- und Leistungsfunktionen [bereitstellt], der eine Überwachung und Steuerung der mechanischen Struktur des Roboters sowie die Kommunikation mit der Umgebung ermöglicht“.

In Abgrenzung zum Industrieroboter existiert ebenfalls nach DIN EN ISO 8373 ein Industrierobotersystem, das als eine Komposition aus „Industrieroboter(n), Endeffektor(en) sowie allen [...] Einrichtungen, Geräten oder Sensoren, die den Roboter bei der Ausführung der Aufgabe unterstützen“ verstanden wird.

Die vorliegende Arbeit fokussiert die Betrachtung von Vertikalknickarmrobotern aufgrund ihrer hohen Bewegungsflexibilität in allen Raumfreiheitsgraden. Der allgemeine Aufbau eines solchen Roboters kann aus Abbildung 2-1 entnommen werden.

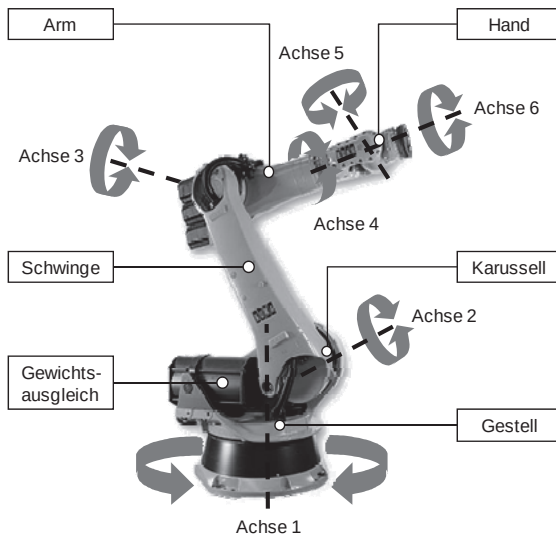


Abbildung 2-1: Aufbau eines Vertikalknickarmroboters mit sechs Achsen
(Bildquelle: KUKA AG)

2.1.2 Entwicklung und Einsatzfeld

Die jährlich veröffentlichte Erhebung World Robotics durch die IFR (International Federation of Robotics) zeigt die statistisch erfasste Entwicklung des weltweiten Robotereinsatzes (INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2013). Hierbei werden zwischen den drei Betrachtungsebenen Industriesektoren, Anwendungsgebiete sowie Regionalmärkte differenziert. Eine primäre Rolle nehmen Großserienproduktionen, wie z. B. die Automobil- und die Elektronikindustrie, ein, in der die Handhabung von Werkstücken (41,3 %) und deren Montage

(11,8 %) dominierende Tätigkeiten darstellen (INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2013). Gleichzeitig zeigen die regionalen Entwicklungen zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit die steigenden Automatisierungsbemühungen in bislang durch Niedriglohn geprägten Ländern Osteuropas, in den BRIC- sowie den ASEAN-Staaten (Association of Southeast Asian Nations). Die stetige Weiterentwicklung der Robotertechnologie belegt, dass die Roboterindustrie neben einer signifikanten Marktdurchdringung ebenfalls neue Einsatzfelder erschließt (vgl. Abbildung 2-2), um den Anforderungen nach hoher Produktindividualität und -vielfalt gerecht zu werden (REINHART ET AL. 2011, SCHLAICH 2013). Unterstützt durch die demographische Entwicklung zeigen einschlägige Studien und Untersuchungen ein durchgängiges Marktwachstum auf dem Gebiet der Service-roboter – einem neuen Anwendungsgebiet (VDI/VDE Innovation + TECHNIK GMBH 2011).

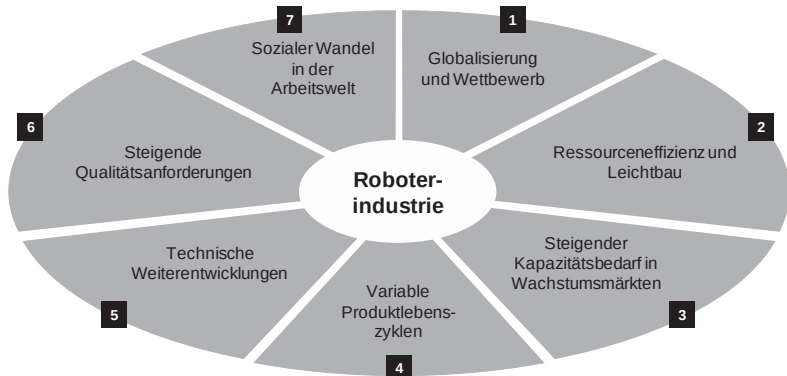


Abbildung 2-2: *Einflussfaktoren auf Roboterentwicklung und -einsatz der Zukunft (in Anlehnung an INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2013)*

Der Preisverfall bei Industrierobotern von über 40 % in den vergangenen 15 Jahren (HÄGELE 2012) hat das Investitionsrisiko gesenkt und somit einen einfacheren Technologiezugang gewährt. Industrieroboter werden vorrangig mit dem Ziel eingesetzt, dem wachsenden Bedarf an Produktionskapazitäten und den erhöhten Qualitätsansprüchen gerecht zu werden (EUROPEAN ROBOTICS NETWORK 2005, THE BOSTON CONSULTING GROUP 2005). Ein wesentlicher Vorteil besteht in der freien und flexiblen Programmierung. Diese bietet die Möglichkeit, Werkstücke in drei oder mehr Freiheitsgraden zu handhaben. Neben Rationalisierungseffekten führt der Robotereinsatz sowohl für Großunternehmen als auch für

KMUs (kleine und mittelständische Unternehmen) zu einer verstärkten Wettbewerbsposition und einem kontinuierlichen Beschäftigungswachstum und widerlegt somit die verbreitete Annahme eines vermehrten Stellenabbaus (ARMBRUSTER ET AL. 2001, MEYER & HÄGELE 2007).

2.1.3 Programmierverfahren und Robotersteuerung

In der Analyse des Informationsflusses zum Robotersystem steht die Programmierung von Montage- und Produktionsaufgaben als zentrales Element im Vordergrund. Hierbei bezeichnet die DIN EN ISO 8373 die Programmierung als die Erstellung eines Anwenderprogramms, welches die „Befehlsfolge an Bewegungs- und Hilfsfunktionen [beinhaltet], die die spezifisch beabsichtigte Aufgabe des Roboters oder Robotersystems festlegt“. Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, kann die Vielzahl an Verfahren anhand des Ortes der Programmerstellung grundlegend in zwei Klassen unterteilt werden (LINNEMANN 2013, SICILIANO & KHATIB 2008):

- direkte Programmierverfahren (Online) und
- indirekte Programmierverfahren (Offline).

Während in der Online-Programmierung die Eingabe von Programmierbefehlen, wie z. B. Bewegungs- und Steuerungsbefehle, direkt im laufenden Betrieb des Robotersystems und somit bewegungsorientiert erfolgt, ermöglicht die Offline-Programmierung eine Erstellung des Anwenderprogramms an vom Roboter unabhängigen Geräten. Die Erstellung sowie Modifikation der Bewegungs- und Logikbefehle für den Roboter kann somit über einen entkoppelten Rechner erfolgen und für den Betriebsfall auf die reale Anlage übertragen werden (LINNEMANN 2013). Einen detaillierten Überblick über Programmierverfahren geben die Arbeiten von BIGGS & McDONALD (2003), HAUN (2007), HELMS (2007), SICILIANO & KHATIB (2008), TEKOUO (2012), VOGL (2008) und ZAIDAN (2012).

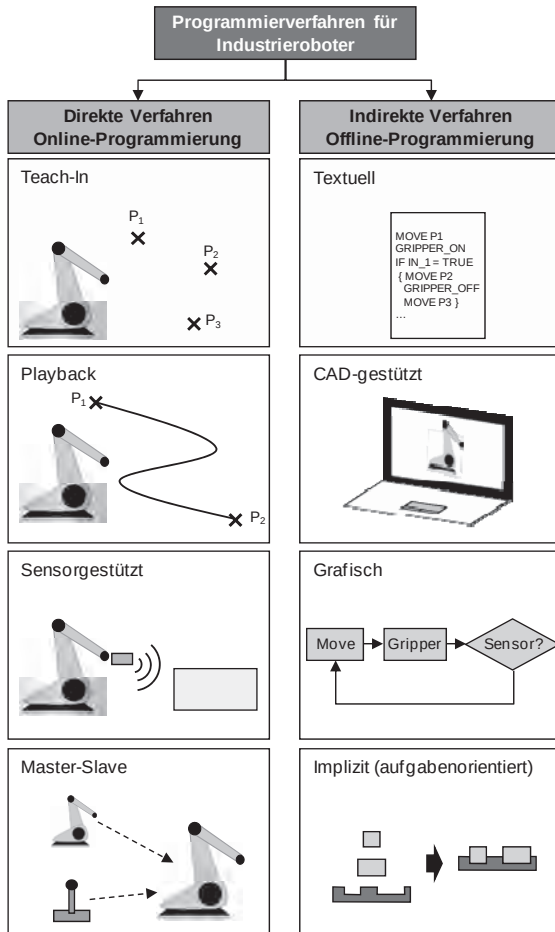


Abbildung 2-3: Programmierverfahren für Industrieroboter (in Anlehnung an LINNEMANN 2013, VOGL 2008)

2.2 Mensch-Roboter-Kooperation

2.2.1 Einführung

Nach DIN EN ISO 8373 wird die Mensch-Roboter-Kooperation oder auch Mensch-Roboter-Kollaboration als „Austausch von Informationen und Handlungen zwischen Mensch und Roboter zur Ausführung einer Aufgabe“ definiert. Die Informationssignale sind nicht auf einzelne Typen beschränkt und umfassen visuelle, auditive und haptische Eingaben sowie Wahrnehmungen bzw. Informationsverarbeitungen (vgl. Abbildung 2-4). Des Weiteren werden als Aufgabe neben der reinen Wertschöpfung in Form von Handhabungs- und Montagetätigkeiten ebenfalls vorbereitende Schritte wie das Programmieren und Einlernen von Bearbeitungsschritten verstanden. Entsprechend der vorliegenden Kommunikationsart lassen sich somit variable Aufgabenstellungen und Anwendungsgebiete erschließen.

Das übergeordnete Ziel einer Mensch-Roboter-Kooperation ist die Kombination der individuellen Stärken von Mensch und Roboter zur flexiblen und optimalen Arbeitsteilung auf Prozessebene durch die Einbringung spezifischer Fähigkeiten (FRYMAN & MATTHIAS 2012, THIEMERMANN 2005).

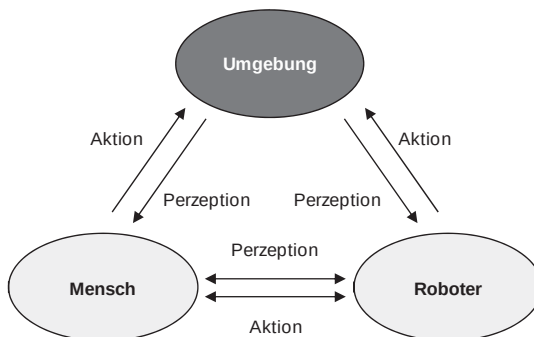


Abbildung 2-4: Die Interaktionsschleife in der Mensch-Roboter-Kooperation (in Anlehnung an IOSSIFIDIS & STEINHAGE 2005)

Beide Kooperationspartner können durch ihre charakteristischen Eigenschaften und Fähigkeiten beschrieben werden (vgl. Tabelle 2-1). Nach SCHMIDTKE (1993) lassen sich aus der gesonderten Betrachtung von Mensch und Roboter auf folgenden vier Ebenen:

- Arbeitsleistung,
- Manipulation und Handhabung,
- Informationsaufnahme sowie
- Informationsverarbeitung

allgemeine Schlussfolgerungen ziehen. Erfahrungswissen, Kognition sowie Fein-
fähigkeit können als menschliche Stärken zusammengefasst werden. Diese Fer-
tigkeiten mittels eines Industrieroboters umzusetzen würde einen hohen Investi-
tions- und Entwicklungsaufwand bedeuten (REINHART ET AL. 2011, TAKATA &
HIRANO 2011). Gleichermaßen eignet sich der Roboter sehr gut zur Durchfüh-
rung von schweren, repetitiven und ähnlich verlaufenden Aufgaben und gewähr-
leistet nach abgeschlossener Programmierung und Inbetriebnahme eine beständig
hohe Ausbringung und Qualität (BÖGE 2009, MICHALOS ET AL. 2010,
RAMPERSAD 1995). Diese teilweise monotonen Tätigkeiten lassen sich unter
Berücksichtigung von Ergonomie, Arbeitssicherheit und Wirtschaftlichkeit nur
bedingt manuell durchführen.

*Tabelle 2-1: Fähigkeitenvergleich zwischen Mensch und Roboter (in
Anlehnung an SCHMIDTKE 1993)*

	Roboter	Mensch
Arbeitsleistung		
Leistungsgrenzen	skalierbar	zeitlich abhängig
Geschwindigkeit	technologisch begrenzt	physiologisch begrenzt
Konstanz	groß	gering
Zuverlässigkeit	Ausfall	Ermüdung
Lernfähigkeit	keine	groß
Manipulation und Handhabung		
Leistung	spezifisch konstruiert	vielseitig
Adaptivität	starr	flexibel
Informationsaufnahme		
Modalität	abhängig von Messsystemen	abhängig von Sinnesorganen
Bereich	klein	groß
Empfindlichkeit	wählbar	verhaltensabhängig
Erkennung	Syntax	Semantik & Kontext
Informationsverarbeitung		
Strategiebildung	fest programmiert	wählbar, optimierbar
Verarbeitungsprinzip	parallel	seriell
Speicherung	groß	klein
Zugriffszeit	kurz und konstant	lang und variabel
Extrapolation	spezifisch festgelegt	kontextuell

Somit lassen sich aus der Kooperation von Mensch und Roboter vier wesentliche Vorteile ableiten (BEUMELBURG 2005, GECKS 2011, HELMS 2007, MICHALOS ET AL. 2010, THIEMERMANN 2005):

- *Produktivität* – Die fähigkeitsorientierte Aufgabenverteilung erleichtert das Einrichten, die Programmierung sowie die Aufgabendurchführung im gemeinsamen Arbeitsraum.
- *Flexibilität* – Die Anpassungsfähigkeit an wechselnde Aufgaben verlangt primär das Erfahrungswissen sowie die Problemlösungsfähigkeit des Menschen.
- *Ergonomie* – Eine Entlastung bei schweren, physisch belastenden Tätigkeiten führt zu einer signifikanten Verbesserung der Arbeitsplatzergonomie. Das Risiko einer physischen Überbeanspruchung lässt sich durch eine Reduktion des Handhabungsgewichts oder der Ausführungsfrequenz reduzieren.
- *Zeit- und Raumersparnis* – Der Wegfall trennender Schutzeinrichtungen führt zu einer erhöhten Bewegungsfreiheit und somit zu einer flexibleren Raumnutzung. Auf zusätzliche Handhabungs- und Verkettungssysteme kann weitestgehend verzichtet werden, sodass infolge der Arbeitsbereichszusammenführung eine höhere relative Wertschöpfung pro Flächeneinheit stattfindet. Dies ermöglicht die signifikante Reduktion räumlicher und baulicher Randbedingungen im Hinblick auf einen zukünftig steigenden Flexibilitätsbedarf in der Produktion infolge variierender Montageumfänge.

Am Beispiel eines Handhabungsschritts wird ersichtlich, dass dieser nicht immer vom Roboter übernommen werden kann, da der Komplexitätsgrad in der Durchführung im Wesentlichen von den Bauteileigenschaften abhängt (ROSS 2002). Im Speziellen formlabile Objekte, wie z. B. CFK (Carbonfaserverstärkter Kunststoff) oder Kabelbäume, besitzen einen deutlich höheren, motorischen und somit kognitiven Anspruch als die Handhabung von starren Objekten, deren Verformung unter Eigengewicht vernachlässigbar ist. Vorgehensweisen zur vereinfachten Auswahl von Automationsschritten, welche im erweiterten Sinne ebenfalls für eine Kooperationsaufgabe Gültigkeit besitzen, werden in ROSS (2002) und SPILLNER (2014) aufgezeigt.

2.2.2 Formen der Kooperation

In der Forschung und Literatur existieren unterschiedliche Ansätze zur Klassifikation von Mensch-Roboter-Kooperationen. YANCO & DRURY (2004) führen elf Betrachtungskategorien für Kooperationsformen ein, die neben der Aufgabe ebenfalls die Roboterart und die Hierarchie der Partner beinhalten. In der Arbeit von SPILLNER (2014) erfolgt eine Erweiterung um die Ausführungsebene sowie um die Rolle des Objekts. Darüber hinaus lassen sich neben prozeduralen Beschreibungsparametern ebenfalls kontextuelle Faktoren wie Einsatzgrund, Programmierverfahren oder Sicherheitskonzept einführen. Für eine detaillierte Analyse aller Beschreibungsformen sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur, wie z. B. BEUMELBURG (2005), GOODRICH & SCHULTZ (2007), KRÜGER ET AL. (2009), OGORODNIKOVA (2010), REINHART & SPILLNER (2010), THIEMERMANN (2005) sowie YANCO & DRURY (2004), verwiesen.

Eine Fokussierung auf Produktionsumgebungen und -aufgaben ermöglicht, wie in Abbildung 2-5 dargestellt, die Reduktion der Betrachtungskategorien auf zwei wesentliche Faktoren zur Klassifikation von Kooperationsarten: die Aufgabe und der Arbeitsraum (HELMS 2007, RADI 2012).

Der Robotereinsatz mit räumlicher Trennung zwischen Mensch und Roboter wird als unabhängige Kooperationsform bezeichnet. Die Vereinigung von räumlicher Trennung und gemeinsamer Aufgabendurchführung führt zur Fernsteuerung bzw. Telerobotik sowie zur Telepräsenz und -aktion (BAUERNSCHMITT ET AL. 2010, CHANG ET AL. 1999, DUBEY ET AL. 2001, RADI ET AL. 2010, REINHART & RADI 2009). Während erstere eine Steuerung auf Distanz darstellt, bei der der Mitarbeiter eine überwachende Rolle einnimmt und somit eine Sicherstellung der korrekten Durchführung verantwortet, ist im Letzteren eine Rückkopplung der Informationssignale zur gemeinsamen Aufgabenausführung erforderlich.

Die multimodale Kommunikation basiert auf dem Versand von Sensorinformationen vom Roboter zum Bediener, um das Gefühl einer Anwesenheit des Operators am Zielort zu erzeugen und erfordert eine möglichst verzögerungsfreie Weiterleitung der Sensordaten (RADI 2012). Der zur gemeinsamen Durchführung von Handhabungs- und Manipulationsaufgaben erforderliche Informationsaustausch wird durch den Versand von Steuerungs- und Bewegungsbefehlen vom Bediener zum Roboter vollzogen, wodurch der Regelkreis geschlossen wird.

		Raum	
		gemeinsam	getrennt
Aufgabe	gemeinsam	simultan / assistiert	
		physische Interaktion	Telepräsenz und -aktion
		synchronisiert	Fern- steuerung
	getrennt	Koexistenz / asynchron	unabhängig

Abbildung 2-5: Klassifikation der Kooperationsformen in der MRK (in Anlehnung an HELMS 2007)

Kooperationsformen mit einem gemeinsamen Arbeitsraum unterscheiden sich durch die Überlappung der Betrachtungsebene Aufgabe (vgl. Abbildung 2-5). Existiert keine Aufgabenteilung zwischen dem Werker und dem Industrieroboter, so spricht man von Koexistenz (GECKS 2011, REINHART & SPILLNER 2010). In Abgrenzung hierzu dienen Assistenzroboter in der Produktion dazu, Menschen in wertschöpfenden Prozessen zu unterstützen und physisch zu entlasten (REINHART & SPILLNER 2010). Neben Servicerobotern, deren Ziel es ist, teilautonom oder selbstständig nützliche Dienste für das menschliche Wohlbefinden zu erfüllen (INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2013), existieren sogenannte IAS (Intelligent Assist System) oder auch IAD (Intelligent Automation Device) gleichermaßen mit dem Ziel, Menschen bei der Aufgabendurchführung physisch zu entlasten (COLGATE ET AL. 1996, KRÜGER ET AL. 2009, STANLEY COBOTICS 2005).

Die Koexistenz stellt die einfachste und elementarste Form einer Mensch-Roboter-Kooperation dar und ist dadurch charakterisiert, dass der Arbeitsraum geteilt wird. Roboter und Mitarbeiter arbeiten jedoch unabhängig voneinander an individuellen Aufgaben und Prozessen (HENRICH ET AL. 2008). Wesentlicher Vorteil dieser Kooperationsform ist die Aufhebung der strikten Abhängigkeiten zwischen Robotersystem und Operator bei Prozessschritten in denen kein Assis-

tenzbedarf besteht, sodass zur Produktivitätssteigerung eine Prozessparallelisierung ermöglicht wird.

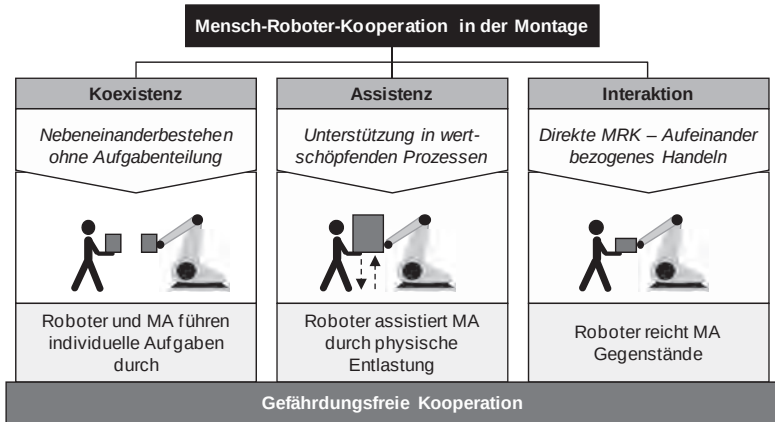


Abbildung 2-6: *Kooperationsformen der MRK in der Montage (in Anlehnung an GECKS 2011, REINHART & SPILLNER 2010, THIEMERMANN 2005)*

Die Interaktion erfordert eine geplante taktile Kooperation mit oder ohne Objekt. Hier werden vier Gruppen unterschieden, in welche der Roboter entweder durch den Menschen ohne gemeinsames Handhabungsobjekt geführt oder eingeschränkt wird und im Falle eines gemeinsamen Objekts eine Übergabe oder eine kooperative Manipulation erfolgt (HUBER ET AL. 2008, YIGIT 2005). Alle Kooperationsformen haben eine gefährdungsfreie Kooperation als Grundvoraussetzung.

2.3 Sicherheit in der Kooperation

2.3.1 Allgemeines

Grundsätzlich lässt sich der Sicherheitsbegriff in zwei Gruppen unterteilen. Die subjektiv wahrgenommene Sicherheit des menschlichen Kooperationspartners und die objektive Sicherheit, wie z. B. die Limitierung von Schäden am Menschen infolge der Interaktion mit dem Roboter (SISBOT ET AL. 2010). Eine als objektiv sicher eingestufte Roboterzelle kann von unterschiedlichen Personen durchaus als unsicher wahrgenommen werden. Ein bewegter Roboter beeinflusst

das Stressempfinden des Mitarbeiters und kann somit Auswirkungen auf die Produktivität haben (BORTOT 2014). Als signifikante Einflussfaktoren wurden in empirischen Studien der Abstand zwischen Roboter und Mensch (KIM & MUTLU 2014), Roboterannäherungsgeschwindigkeiten und -winkel (ARAI ET AL. 2010, THIEMERMANN 2005) sowie Motorengeräusche (BORTOT 2014) identifiziert. Im Gegensatz dazu verursachen anthropomorphe Systeme mit menschlichem Bewegungsverhalten durch angepasste Geschwindigkeiten und Trajektorien ein verringertes Stressempfinden (MEISNER ET AL. 2008, YIGIT 2005).

Primäre Voraussetzung für Kooperationsanwendungen bildet die objektive, physische Sicherheit. Diese stellt gleichzeitig die Grundlage dar, um Roboter in Produktionsprozessen unterstützend einzusetzen. Die objektive, physische Sicherheit bildet eine messbare Vorgabe zur Auslegung von Kooperations- und Koexistenzszenarien und soll im Folgenden im Betrachtungsfokus stehen. Einen breiten Überblick über die Rolle von Sicherheitssystemen in Kooperationsszenarien geben ALAMI ET AL. (2006), KRÜGER ET AL. (2009), REINHART & SPILLNER (2010) sowie VASIC & BILLARD (2013). Ein sicheres Robotersystem besteht aus den Grundelementen sicherer Roboter und sichere Steuerung (vgl. Abbildung 2-7) und ermöglicht die Überwachung der Roboterbewegungen. Hierfür erforderlich ist, dass Kontakte und Annäherungen zwischen Mitarbeiter und Roboter über Sensoren sicher detektiert werden und die Schaltsignale an die Robotersteuerung korrekt weitergeleitet und verarbeitet werden.

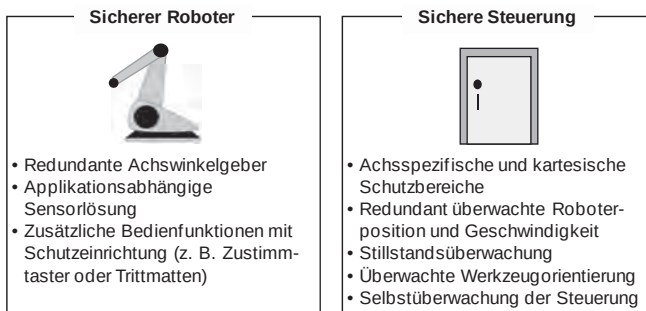


Abbildung 2-7: *Sicheres Robotersystem (in Anlehnung an HUELKE & OTTERSBAACH 2013, REINHART & RÖSEL 2010)*

Die Sicherheit in der Robotersteuerung wird durch eine 2-kanalige Ausführung der Positions- und Achsdatenerfassung realisiert. Diese Methode erlaubt sowohl eine kartesische als auch achsspezifische Überprüfung der Roboterposition und

darüber hinaus ebenfalls die sichere Einhaltung programmierter Orientierungen am TCP (Tool Center Point) sowie der kartesischen Geschwindigkeiten und achsspezifischen Winkelgeschwindigkeiten (vgl. Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: *Kartesische und achsspezifische Überwachungsfälle*

		Überwachungsmodus	
		Kartesisch	Achsspezifisch
Überwachungsmodus	Positionsüberwachung	kartesische Positionsüberwachung des TCP (Schutzzonen)	Achsbereichsüberwachung
	Orientierungsüberwachung	Orientierungsüberwachung des TCP	
	Geschwindigkeitsüberwachung	Geschwindigkeitsüberwachung des TCP	Achsgeschwindigkeitsüberwachung

2.3.2 Einsatzvoraussetzungen

Der Einsatz eines Industrieroboters für Kooperationsarbeitsplätze setzt sich zum Ziel, den Mitarbeiter in der Aufgabendurchführung physisch oder kognitiv zu entlasten. Eine grundlegende Herausforderung stellt die Integration von Kooperationsarbeitsplätzen in bestehende Montagekonzepte dar (THIEMERMANN 2005). Die hieraus resultierenden Vorteile, wie Platzeinsparungen und Nutzung von Synergieeffekten zur Fähigkeitensynthese, erfordern somit eine zunehmende Integration von Sensoren und eine Fusion von Sensordaten zur Realisierung von sicheren Kooperations Szenarien (GRAF 2010, HELMS 2007).

Unter dem Begriff der Sicherheit wird im Maschinenbau die zuverlässige und gefahrungsfreie Funktionserfüllung verstanden (DIN EN ISO 14121-1). Ein sicheres System oder ein sicheres Systemverhalten liegt vor, sofern das identifizierte vorhandene Risiko kleiner als das Grenzkrisiko ist, welches das größte noch vertretbare Risiko einer Anlage ist (vgl. Abbildung 2-8).

Schäden im Bereich der Arbeitssicherheit im Kontext der Mensch-Roboter-Kooperation werden als Verletzungen an Personen definiert und können nie komplett ausgeschlossen werden. In diesem Zusammenhang wird die funktionale Sicherheit entsprechend der IEC 61508-4 als Teil einer Gesamtsicherheit definiert, der von der korrekten Funktion der sicherheitsbezogenen Systeme und externer Systeme zur Risikominderung abhängt.

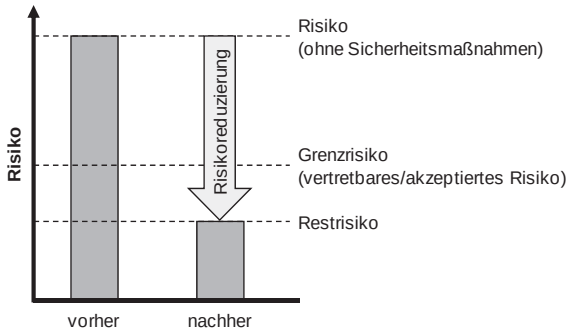
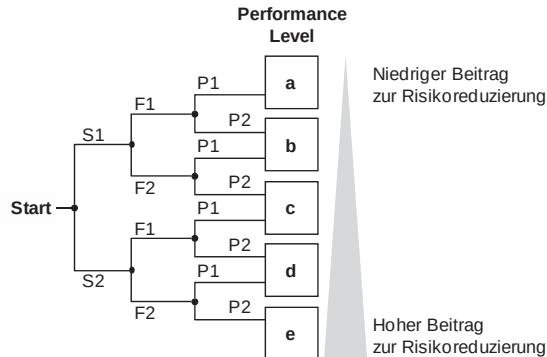


Abbildung 2-8: Zusammenhang zwischen Risiko und Restrisiko (in Anlehnung an ZELLER 2001, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2010)

Entsprechend der vorliegenden Situation werden Sicherheitsanforderungen mittels des erforderlichen Performance Levels (PL_r) nach DIN EN ISO 13849-2 spezifiziert (vgl. Abbildung 2-9). Hierbei wird die Schwere der möglichen Verletzung mit der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Möglichkeit der Abwendbarkeit logisch verknüpft.

Darüber hinaus wird das zielgerichtete Aussetzen der regulären Maschinenfunktion zur Wahrung der Sicherheitsfunktion unter a-priori spezifizierten Betriebsbedingungen als Sicherheitsintegrität bezeichnet (IEC 61508). Das Ziel der Sicherheitstechnik besteht darin durch Einsatz sicherheitsgerichteter Komponenten und Funktionen das Risiko von technischen Systemen unterhalb eines quantifizierten Mindestmaßes (Restrisiko) zu halten (vgl. Abbildung 2-8), um somit einen für Menschen und Umwelt gefährungsfreien und sicheren Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Dies stellt eine Grundvoraussetzung für einen industriellen Einsatz dar.



Legende

S – Schwere der Verletzung (S: Severeness)

S1: leichte reversible Verletzung

S2: schwere irreversible Verletzung

F – Häufigkeit des Aufenthalts (F: Frequency)

F1: selten bis öfter und/oder kurze Expositionsdauer

F2: häufig bis dauernd und/oder lange Expositionsdauer

P – Möglichkeit der Abwendbarkeit (P: Probability)

P1: möglich unter bestimmten Bedingungen

P2: kaum möglich

Abbildung 2-9: Kategorisierung des erforderlichen Performance Level PL_r nach DIN EN 13849

2.3.3 Sicherheitsmaßnahmen

Zur Wahrung der Sicherheitsfunktion technischer Systeme nach dem Prinzip der integrierten Sicherheit werden bestehende Ansätze nach DIN 12100-1, wie in Abbildung 2-10 dargestellt, in drei Gruppen unterteilt:

- *Unmittelbare Sicherheitsmaßnahmen* – Sicherheitsstrategien für den Betrieb von einem System oder einer Anlage, die keine Gefahren für Interaktionspartner und ihre Umwelt enthält, werden als unmittelbare Maßnahmen bezeichnet. Dies kann durch sicheres Bestehen realisiert werden, in der alle wahrscheinlichen Zustände ohne Versagen überstanden werden können. Eine Alternative hierzu stellt das beschränkte Versagen dar, bei dem alle Versagensfälle kontrolliert und ohne Folgen ablaufen.
- *Mittelbare Sicherheitsmaßnahmen* – Schutzsysteme, die bei Integration in das Gesamtsystem die notwendigen Sicherheiten ergeben und hinsichtlich

ihrer Gestaltung zuverlässig, zwangsläufig und unumgebar sind, stellen mittelbare Maßnahmen dar.

- *Hinweisende Sicherheitsmaßnahmen* – Das Ziel einer Informationsbereitstellung an der Maschine oder Anlage, um den Bediener vor Schäden und Gefahren zu bewahren, stellt den Fokus hinweisender Maßnahmen dar. Diese ist zulässig, sofern die existierenden Risiken kontrollierbar sowie die Folgen abwendbar oder reversibel sind.



Abbildung 2-10: Überblick der Sicherheitsmaßnahmen im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation nach DIN 12100-1

Grundsätzlich steht der Einsatz unmittelbarer, konstruktiver Sicherheitstechnik und somit die Reduktion von Gefährdungsursachen, sofern technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar, im Fokus. Des Weiteren erfordert es den Einsatz mittelbar unterstützender Maßnahmen zur Risikoreduktion, gefolgt von hinweisenden Maßnahmen zur ergänzenden Warnung und Information (ZELLER 2001).

Im Sinne der Redundanz bei unmittelbaren und mittelbaren Sicherheitsmaßnahmen sind Komponenten im Bereich der Robotik so zu gestalten, dass im Versagensfall die Funktionen von Nachbarkomponenten übernommen werden (ALAMI ET AL. 2006, DHILLON & LI 2009).

2.3.4 Normative Rahmenbedingungen

Im Folgenden werden grundlegende Normen und Standards sowie deren Zusammenhang eingeführt (vgl. Abbildung 2-11). Hierbei wird zwischen drei Normtypen hinsichtlich ihrer Allgemeingültigkeit unterschieden (GRÄF 2004):

- *A-Normen* – Sicherheitsgrundnormen enthalten Grundbegriffe, wesentliche Gestaltungsleitsätze und allgemeine Aspekte zur Konzeption sowie Arbeitsweise mit Gültigkeit für alle Maschinen.
- *B-Normen* – Sicherheitsgruppennormen behandeln Sicherheitsaspekte (B1-Normen) oder eine Art von Schutzeinrichtungen (B2-Normen), die für eine Reihe von Maschinen verwendet werden können.
- *C-Normen* – Maschinensicherheitsnormen sind Normen für die Maschinensicherheit, welche detaillierte Sicherheitsanforderungen an eine bestimmte Maschine oder eine Gruppe von Maschinen stellen.

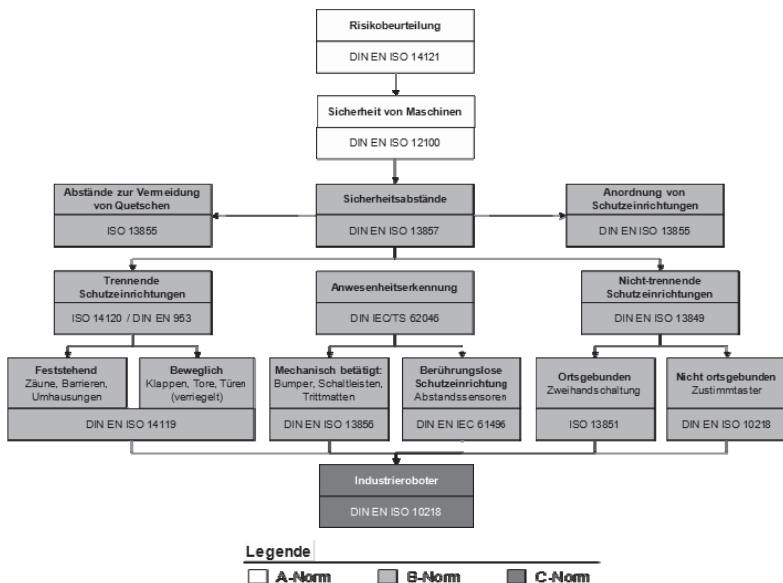


Abbildung 2-11: Zusammenhang der sicherheitstechnischen Normen für kollaborierende Industrieroboter (in Anlehnung an DIN 14119)

Die Risikobeurteilung, bestehend aus Risikoanalyse und Risikobewertung (vgl. Abbildung 2-12), bildet den Kerninhalt der zweiteiligen DIN EN ISO 14121. Der erste Teil wurde von der DIN EN ISO 12100 abgelöst. Ziel der Analyse ist es, vorliegende Gefährdungen innerhalb der festgelegten Systemgrenze zu identifizieren und mittels einer Risikoeinschätzung das Schadensausmaß sowie die Ein-

```
graph TD; A[Maschinengrenzen definieren] --> B[Alle Gefährdungen identifizieren]; B --> C[Gefährdungsrisiken einschätzen]; C --> D[Gesamtrisiko bewerten]; D --> E{Ist die Maschine sicher?}; E --> F[Risiko mindern]; F --> A; E --> G[Risiko beurteilung]; G --> H[Risikoanalyse]; H --> A;
```

The flowchart illustrates the risk assessment process (Risikoanalyse) for machine safety. It begins with 'Maschinengrenzen definieren' (Defining machine boundaries), followed by 'Alle Gefährdungen identifizieren' (Identifying all hazards), 'Gefährdungsrisiken einschätzen' (Estimating hazard risks), and 'Gesamtrisiko bewerten' (Evaluating total risk). A decision diamond asks 'Ist die Maschine sicher?' (Is the machine safe?). If not safe, the process loops back to 'Maschinengrenzen definieren' via 'Risiko mindern' (Reduce risk). If safe, the process proceeds to 'Risiko beurteilung' (Risk assessment), which then leads to 'Risikoanalyse' (Risk analysis), which in turn leads back to 'Maschinengrenzen definieren'.

Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen werden in der DIN EN ISO 13857 hinsichtlich der Sicherheit von Maschinen erläutert. Das Festlegen der Sicherheitsabstände berücksichtigt hierbei Erreichbarkeitssituationen, anthropometrische Daten, biomechanische Gegebenheiten, technische und praktische Gesichtspunkte sowie zusätzliche Maßnahmen für bestimmte Personengruppen.

24

weise, zum anderen Berechnungsvorschriften zur Bestimmung des Nachlaufs des Systems sowie den daraus resultierenden Mindestabständen.

Die deutsche DIN EN 953 ist eine Typ-B-Norm und dient der Maschinensicherheit und behandelt im Speziellen das Thema der feststehenden und beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen. Weitere Leitlinien und Gestaltungsgrundsätze für Verriegelungseinheiten in Verbindung mit trennenden Schutzeinrichtungen werden in DIN EN ISO 14119 beschrieben.

In der DIN EN ISO 13849 werden sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen, einschließlich Software, behandelt. Der erste Teil bietet allgemeine Gestaltungsleitsätze, der zweite eine Validierung. Neben gestalterischen und ergonomischen Aspekten werden Eigenschaften, wie z. B. Performance Level festgelegt, die zur Erfüllung der entsprechenden Sicherheitsfunktionen erforderlich sind.

Als Ersatz für DIN IEC/TS 62046 ist die VDE 0113-211 vorgesehen. In dieser wird die Sicherheit von Maschinen unter dem Aspekt der Anwesenheitserkennung betrachtet. Inhaltlich umfasst der Entwurf der VDE-Norm verschiedene Sensortechniken, die als Schutzeinrichtungen verwendet werden. Sowohl Merkmale und Anforderungen der Sicherheitstechnik als auch Anwendungen mit anschließender Prüfung werden näher erläutert.

In diesem Zusammenhang behandelt die DIN EN ISO 13856 den Bereich druckempfindlicher Schutzeinrichtungen. Diese Norm stellt Leitsätze zur Gestaltung und Prüfung von Schaltmatten sowie für Schaltleisten und Schaltstangen zur Verfügung. Solche Schutzeinrichtungen werden unter verschiedenen Bedingungen, wie z. B. elektrischen, physikalischen und chemischen Umgebungseinflüssen eingesetzt. Die Maschinensteuerungen stellen sicher, dass die Maschine beim Betätigen der Schutzeinrichtung in einen sicheren Zustand übergeht.

Eine weitere VDE-Norm (DIN EN IEC 61496) beschäftigt sich mit berührungslos wirkenden Schutzeinrichtungen, wie zum Beispiel Abstandssensoren. Neben allgemeinen Anforderungen an Funktion, Konstruktion und Umgebung werden Prüfverfahren und Kennzeichnungen empfohlen. Ergänzend zur DIN EN ISO 13855 bietet diese Norm weitere Parameter, die bei der Berechnung des Mindestabstandes beachtet werden sollen.

Der erste Teil der DIN EN ISO 10218 C-Norm beschäftigt sich mit Industrierobotern und gibt eine Anleitung, wie die Sicherheit bei der Gestaltung und dem Bau des Roboters gewährleistet werden kann. Der zweite Teil erweitert die Anleitungen zum Schutz des Personals von der Roboterintegration über den Betrieb

bis zur Reparatur. Technische Anforderungen an einen Roboter sind z. B. Betriebsartenwahl, Leistungs- und Kraftbegrenzung, Eigenschaften von Anhaltezeit und -weg oder auch Gefährdungen durch Kraftübertragungsteile. Ein Abschnitt der Norm beschreibt die Sicherheitsanforderungen speziell für den kollaborierenden Roboterbetrieb. Ein Kollaborationsraum ist ein „Arbeitsraum innerhalb des geschützten Bereichs, in dem der Roboter und der Mensch während des Produktionsbetriebs gleichzeitig Aufgaben ausführen können“ (DIN 10218-2).

Bei der ISO/TS 15066 handelt es sich um eine – in Auszügen veröffentlichte, aber noch nicht in Kraft getretene – technische Spezifikation basierend auf Anwendererfahrungen für den Einsatz kollaborierender Roboter (SHEA 2013). Diese setzt sich zum Ziel, dass im kollaborierenden Betrieb weder Wahrnehmung noch Aufmerksamkeit oder Denken der Person eingeschränkt oder gestört wird. Der Ansatz basiert auf biomechanischen Leistungsgrenzen. Die dazugehörige Risikoanalyse anhand eines Körpermodells ermöglicht eine empirische Definition von Beanspruchungsgrenzen für das Klemmen bzw. Quetschen sowie für den Stoß zwischen einem Industrieroboter und einem Menschen.

2.4 Sicherheitsstrategien

2.4.1 Einführung

Im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation lassen sich zwei grundlegende Strategien unterscheiden (vgl. Abbildung 2-13). Berührende Ansätze limitieren die Kollisionsenergie bei direktem Kontakt zwischen Roboter und Menschen (GECKS 2011, REINHART & SPILLNER 2010). Dieser Ansatz verfolgt das Ziel der Gefährdungsreduktion durch Schadensminimierung. Im Gegensatz hierzu haben berührungslose Ansätze das Ziel, durch den Einsatz einer sensorischen Kontaktprädiktion Annäherungen zu detektieren und schon vorab darauf zu reagieren, um einen gefahrbringenden Kontakt zu vermeiden (REINHART & SPILLNER 2010).

Im Folgenden wird ein Überblick über existierende Sicherheitsstrategien in der Mensch-Roboter-Kooperation gegeben (vgl. Abbildung 2-14). Diese werden im Anschluss hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit für die ortsflexible kontinuierliche Fließmontage bewertet.

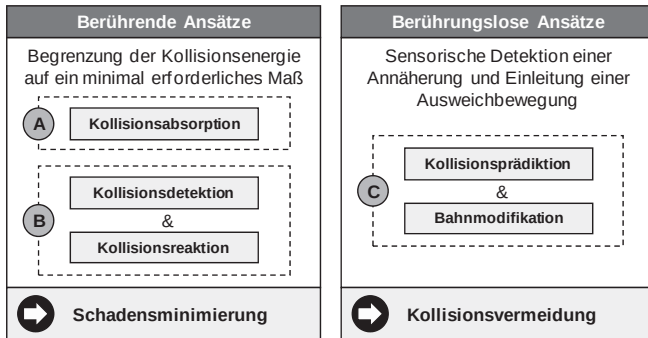


Abbildung 2-13: Sicherheitsstrategien für die Mensch-Roboter-Kooperation (in Anlehnung an KRÜGER ET AL. 2009, REINHART & SPILLNER 2010, REINHART ET AL. 2012B, SONG 2011)

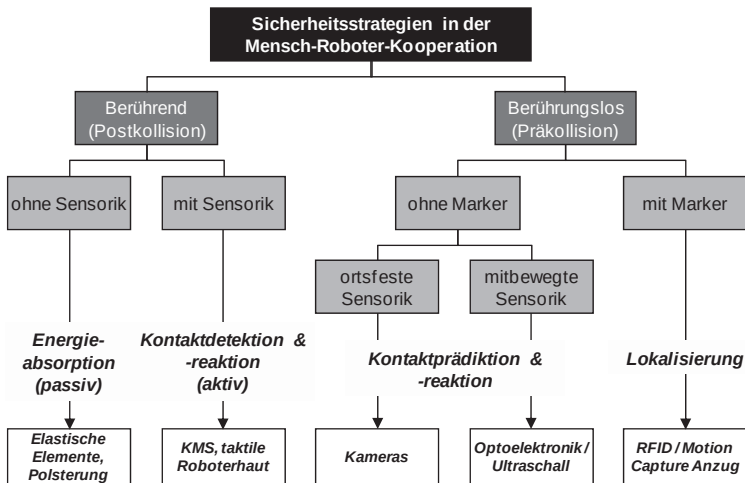


Abbildung 2-14: Sicherheitsstrategien für die Mensch-Roboter-Kooperation (SHEN & REINHART 2012)

2.4.2 Energieabsorption

Der Einsatz von Polsterelementen am Roboterarm oder eine angepasste Kinematik mittels elastischen Komponenten ermöglicht die intrinsische Sicherheit von Robotersystemen. Bei Kontakt wird die vorhandene Kollisionsenergie durch

nachgiebige Elemente absorbiert und auf ein risikoarmes Maß reduziert. Dadurch wird konstruktiv ein inhärent sicherer Roboter realisiert, bei welchem durch mechanische Verformung der Grundstruktur ausgeschlossen wird, dass Gefährdungen entstehen können.

LENS ET AL. (2010) stellen den nachgiebigen BioRob (Bionic Robotics) vor, dessen mechanischer Aufbau am Muskel-Sehnen-Prinzip angelehnt ist (vgl. Abbildung 2-15 d). Die Leichtbauweise mit nachgiebigen Elementen in den vier Bewegungsachsen mittels Seilzügen erlaubt eine signifikante Reduktion der Gesamtmasse. Hierdurch wird die potenzielle Kollisionsenergie auf ein Minimum reduziert. Jedoch ist diese Roboterbauform auf eine maximale Traglast von 0,5 kg ab Roboterflansch ausgelegt, sodass sie für industrielle Anwendungen nur begrenzt geeignet ist.

Das auf der Arbeit von HEILIGENSETZER (2003) basierende und von der Firma MRK-Systeme GmbH vertriebene SafeInteraction-System nutzt einen Schutzmantel aus taktilen Elementen mit integrierten Näherungssensoren (vgl. Abbildung 2-15 e). Hierdurch kann die vorhandene Kollisionsenergie partiell von der Schaumstoffummantelung aufgenommen werden. In Kombination mit dem löslichen Kontaktflansch wird das Werkzeug bei Überschreitung einer Kraftgrenze vom Roboterflansch getrennt, um gefahrbringende Verletzungen zu vermeiden (MRK-SYSTEME GMBH 2013).

Ein bionischer Ansatz wird im Projekt BROMMI (Bionische Rüsselkinematik für sichere Roboteranwendungen in der Mensch-Maschine-Interaktion) verfolgt, indem die vielseitigen Bewegungsmöglichkeiten des Elefantenrüssels als funktionales Vorbild verwendet wird (vgl. Abbildung 2-15 a). Die vorgestellte tripedale Alternanzkaskade ist ein mit pneumatischen Muskeln betriebener Manipulator, der Bewegungen über einem zentralen Wellengelenk mittels Druckstäben ausführt. Dieser ermöglicht eine einstellbare Nachgiebigkeit. Die serielle Kinematik besteht aus sphärischen Koppelgetrieben, die rüsselähnliche Flexionsbewegungen ausführen kann (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FABRIKBETRIEB UND -AUTOMATISIERUNG 2010).

Im Verbundprojekt LiSA wurde ein Roboter auf einer mobilen Plattform vollständig mit einer taktilen Haut überzogen, die aus einer Sensormatrix besteht (vgl. Abbildung 2-15 b). Diese energieabsorbierende Roboterhaut ermöglicht das kontrollierte Abbremsen der Roboterbewegung bei unbeabsichtigten Berührungen (SCHULENBURG ET AL. 2007, SCHULENBURG ET AL. 2010).

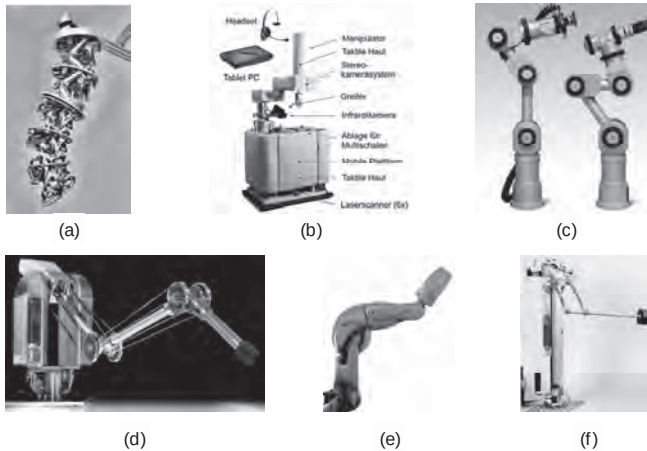


Abbildung 2-15: *Roboterkinematiken mit Energieabsorption;*
 (a) BROMMI (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FABRIKBETRIEB UND -AUTOMATISIERUNG 2010)
 (b) LiSA (SCHULENBURG ET AL. 2010)
 (c) Katana (NEURONICS AG 2008)
 (d) BioRob (LENS ET AL. 2010)
 (e) SafeInteraction (MRK-SYSTEME GMBH 2013)
 (f) Roboter mit Gewichtsausgleich (VERMEULEN & WISSE 2010)

Eine Prämisse für berührende Verfahren ist das „Design-for-safety“-Prinzip, bei dem scharfe Kanten in der Produktentwicklung sowie Konstruktion vermieden werden (ALBU-SCHÄFFER ET AL. 2007, BICCHI & TONIETTI 2004). Ein Beispiel geben VERMEULEN & WISSE (2010), bei dem Federn als Gewichtsausgleich zum Einsatz kommen (vgl. Abbildung 2-15 f), um einen optimierten Ausgleich zwischen Masse und Geschwindigkeit zu erreichen, sodass ungeplante Kontakte durch Nachgiebigkeiten unterhalb eines Schwellwerts bleiben. Auch wird durch Polsterung an exponierten Stellen am KATANA Roboter der Neuronics GmbH die Berührungs- und Kollisionsenergie für die sichere Kooperation reduziert und darüber hinaus werden Berührungen über Schleppfehler der verwendeten Harmonic Drive Getriebe detektiert (vgl. Abbildung 2-15 c) (NEURONICS AG 2008).

Grundsätzlich bleibt festzustellen, dass die Sicherheitsstrategie der Energieabsorption hohe Einschränkungen für das Robotersystem und somit das Einsatzfeld hat. Bau- und Arbeitsraum, maximale Lastaufnahme sowie Bewegungsgeschwindigkeiten müssen individuell angepasst werden, um die Kollisionsenergie innerhalb des beherrschbaren Grenzbereichs zu halten, sodass diese durch nachgiebige Elemente im Kollisionsfall abgebaut werden kann. Ebenfalls muss bei berührenden Ansätzen auf spitze und scharfkantige Roboterwerkzeuge verzichtet werden, um Gefährdungen durch eben diese zu verhindern (KRIEGER 2010).

2.4.3 Kontaktdetektion und -reaktion

Die Detektion einer Berührung am Roboterarm ermöglicht die Einleitung einer schadensminimierenden Reaktion. Hierfür können interne Sensordaten wie z. B. Motorströme, Encoderwerte oder auch Sensordaten von KMS (Kraft-Momenten-Sensoren) in den Roboterachsen verwendet werden. Dadurch wird durch Regelungsstrategien die Dynamik des Roboters eingeschränkt und reduziert die im Kollisionsfall auf den Menschen übertragbare Energie. Einen Überblick über Klassifikationsansätze für taktile Kooperation geben ARGALL & BILLARD (2010) sowie YIGIT (2005). Des Weiteren gibt FRUTIG (2013) eine Marktübersicht über serienreife bzw. prototypisch erhältliche Leichtbauroboter.

Es existieren zwei unterschiedliche technische Ansätze für die Kollisionsdetektion: der Roboter kann mit einer Hülle verkleidet sein, in die taktile Schaltelemente eingearbeitet sind (vgl. Abschnitt 2.4.2). Eine Alternative hierzu bieten Roboter, die mit internen Sensoren ausgestattet sind und somit im Stande sind, die als Resultat einer Kollision entstehenden Momentenabweichungen in den Roboter Gelenken wahrzunehmen.

Der vom DLR (Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt) gemeinsam mit der KUKA AG entwickelte Leichtbauroboterarm aus Karbonfasern beinhaltet Momentensensoren in den Achsen und einen integrierten Impedanzregler, um Kontakte zu detektieren (vgl. Abbildung 2-16 b) (ALBU-SCHÄFFER ET AL. 2007). Diese ermöglichen eine Roboternachgiebigkeit, sodass der im Kollisionsfall übertragene Impuls auf ein Minimum reduziert werden kann. Der Trigger für die Kontaktdetektion erfolgt über einen Motorstromvergleich, bei dem ein anliegendes Drehmoment, welches ein Motorstrom-Äquivalent darstellt, mit dem zu erwartenden Drehmoment verglichen wird.

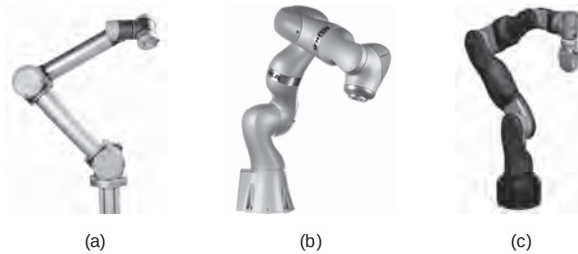


Abbildung 2-16: *Roboterkinematiken mit integrierter Kollisionsdetektion und -reaktion;*
(a) Universal Robot® (Bildquelle: Universal Robot)
(b) LBR iiwa® (Bildquelle: KUKA Roboter GmbH)
(c) F&P Personal Robotics® (Bildquelle: F&P)

Der von der gleichnamigen dänischen Firma entwickelte UR (Universal Robot) bestimmt die auftretenden Kräfte ebenfalls durch die internen Motorströme und kann dadurch bei Erreichung der maximalen äußeren Kraft anhalten und somit eine sichere Kooperation ermöglichen (vgl. Abbildung 2-16 a) (UNIVERSAL ROBOTS APS 2010). Ebenso verspricht der von der Firma F&P Personal Robotics entwickelte Roboter die Gewährleistung einer intrinsischen Sicherheit durch Kraftbegrenzung (vgl. Abbildung 2-16 c) (F&P PERSONAL ROBOTICS 2014).

Der Einsatz von KMS ermöglicht die Einhaltung der von der TS 15066 vorgeschlagenen biomechanischen Grenzwerte (vgl. Abschnitt 2.3.4), um das Gefährdungsrisiko zu minimieren. Demnach sind sogenannte Leichtbauroboter mit integrierter Sensorik grundsätzlich für eine Mensch-Roboter-Kooperation geeignet. Fraglich bleibt dennoch die zuvor im Abschnitt 2.4.2 erwähnte Einsatzfeldbegrenzung infolge von Nennlastgrenzen und die zu erwartende Akzeptanz in der Belegschaft. Es ist davon auszugehen, dass ungeplante Berührungen zwischen Mensch und Roboter, auch wenn diese verletzungsfrei sind, die Konzentration der Werker maßgeblich beeinträchtigen können und geringe Akzeptanz innerhalb der Belegschaft finden. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass berührungslose Systeme für eine Mensch-Roboter-Kooperation zu bevorzugen sind.

2.4.4 Kontaktprädiktion und -reaktion

2.4.4.1 Globale Sensorik

Die Integration von ortsfesten Sensorsystemen ermöglicht die Einsicht und Überwachung mehrerer Interaktionspartner innerhalb eines definierten Arbeitsraums (vgl. Abbildung 2-17). Der große Vorteil ist die berührungslose Detektion einer gefahrbringenden Situation sowie die Prädiktion von möglichen Kollisionen. Dies ermöglicht den Einsatz von Robotern mit höheren Traglasten, sodass in der Regel nicht die physische Interaktion im Fokus steht, sondern die flexible und sichere Arbeitsraumteilung von Mensch und Roboter.

Das SafetyEYE® Kamerasystem der Firma Pilz GmbH basiert auf drei fest zueinander ausgerichteten Kameras, die sich auf einer gemeinsamen Trägerplatte befinden. Die Bildauswertung geschieht mittels Stereoalgorithmen. Hierbei wird eine 2,5 D-Raumüberwachung von a-priori definierten Warn- und Schutzräumen realisiert (vgl. Abbildung 2-17 a). Über Kontrastveränderungen können undefinierte Objekte im Beobachtungsraum detektiert werden und über eine sichere Steuerung kann eine Geschwindigkeitsreduktion oder ein Roboterstop eingeleitet werden (PILZ GMBH & CO. KG 2008). Dieses Prinzip hat den Nachteil, dass aufgrund der Arbeitsraumüberwachung aus einer starren Perspektive verdeckte Bereiche entstehen können. Ferner ist das kommerzielle SafetyEYE® nicht fähig, Roboterbewegungen in seine Berechnungen mit einzubeziehen.

Im Verbundprojekt ASSISTOR (Assistierende, interaktive und sicher im industriellen Umfeld agierende ortsflexible Roboter) wurde der Einsatz unterstützender Manipulatoren, die in direkter physischer Interaktion mit dem Menschen arbeiten können, untersucht.

EBERT (2003) beschreibt den Einsatz einfacher Roboterkinematikmodelle aus Pyramidenstümpfen zur Erzeugung von Silhouettenbildern. Diese werden verwendet, um zu entscheiden, ob eine bestimmte Achskonfiguration zu einer Kollision mit einem unbekannten Objekt führen kann. Mittels dieser Auswertung kann die Bahnplanung für den Roboter durchgeführt werden, um eine kollisionsfreie Bahn zum gewünschten Zielort zu erreichen. Da eine Kooperationsszene niemals statisch ist, ist es erforderlich die Kollisionsüberprüfung zur Laufzeit durchzuführen, um die Korrektheit der Bahn zu bestätigen und gegebenenfalls umzuplanen.

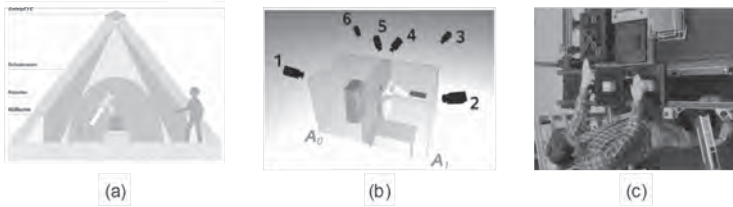


Abbildung 2-17: Exemplarische Sicherheitsansätze für stationäre Arbeitsplatzüberwachung;

(a) SafetyEye® (PILZ GMBH & CO. KG 2008)

(b) Differenzbildverfahren (GECKS 2011)

(c) Handdetektion im Arbeitsraum (KRÜGER ET AL. 2005)

Aufbauend darauf entwickelte GECKS (2011) im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts SIMERO (Sichere Mensch-Roboter-Koexistenz) ein weg- und zeitoptimiertes Bahnplanungsverfahren zur Umgehung dynamischer Hindernisse im nahen Umfeld. Für die Detektion des Menschen und anderer unbekannter Objekte wurde das Differenzbildverfahren eingesetzt. Hierbei kamen mehrere kalibrierte Kamerasysteme sowie eine Sensordatenfusion zum Einsatz (vgl. Abbildung 2-17 b). Die Verwendung bekannter Objektmodelle, wie z. B. Roboter und Arbeitsraum, ermöglicht die Durchführung von Online-Kollisionstests und darauf aufbauend die Echtzeitberechnung von Ausweichbewegungen zur Steigerung der Verfügbarkeit.

Ein vom Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF im Rahmen des Verbundprojektes ViERforES (Virtuelle und Erweiterte Realität für höchste Sicherheit und Zuverlässigkeit von Eingebetteten Systemen) entwickeltes projektions- und kamerabasiertes System zur Arbeitsraumüberwachung kann die Sicherheitsbereiche (Warn- und Schutzfelder) direkt in die Arbeitsplatzumgebung sichtbar projizieren. Werden diese im Kooperationsbetrieb verletzt, so werden die Projektionsstrahlen und -flächen unterbrochen und können von statisch installierten Kamerasystemen detektiert werden. Diese erlauben gleichzeitig eine visuelle Rückmeldung der vorliegenden Systeminformationen. Die Verwendung mehrerer Kameras und Projektoren ermöglicht die dynamische Adaption des Überwachungsbereichs hinsichtlich Größe und Lage (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FABRIKBETRIEB UND -AUTOMATISIERUNG 2011).

Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA wurden ebenfalls Ansätze für die sichere Arbeitsraumteilung von Mensch und Roboter

erarbeitet. In der Arbeit von WINKLER (2007) wird ein System vorgestellt, das ToF-Kameras (Time of Flight), basierend auf dem Laufzeitverfahren einsetzt, um den Arbeitsraum zu überwachen. Die gewonnenen Informationen werden fusioniert und verwendet, um dynamische, virtuelle Schutzzonen einzurichten. Die Vermeidung gefahrbringender Situationen erfolgt bei diesem System durch Anpassung der Roboterarbeitsgeschwindigkeit. Hierbei wird der Roboter in Form von quaderförmigen Hüllkörpermodellen in einem Umweltmodell repräsentiert, um Abstandsberechnungen im dynamischen Sicherheitsbereich durchzuführen. Die Integration der Umweltmodelle ermöglicht darüber hinaus eine detaillierte Vorabbetrachtung der kritischen Fälle in der Planungs- und Konfigurationsphase (WINKLER 2007).

In KRÜGER ET AL. (2005) stellt das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK ein System bestehend aus drei CCD-Farbbildkameras (Charge-coupled Device) vor, das ein dreistufiges Verfahren einsetzt, um Mitarbeiter in der Arbeitszelle zu detektieren (vgl. Abbildung 2-17 c). Zunächst erfolgt die Bewegungsanalyse und -schätzung der Szene, um dynamische Objekte im Raum zu erkennen. Der zweite Schritt beinhaltet die Identifikation des menschlichen Kopfs und seiner Hände durch Hautfarbenerkennung unter Einsatz eines dichromatischen Reflexionsmodells, bei dem die Farbmerkmale von Melanin und Hämoglobin für die Klassenbildung bei der Bildauswertung verwendet werden. Im letzten und dritten Schritt werden die kritischen Bereiche durch eine trifokale Kamerakonfiguration ermittelt und gespeichert. Der Abstand Roboter-Werkerhand wird im Kooperationsszenario als Indikatorwert für die Robotergeschwindigkeit verwendet, der bis auf Null herunter skaliert werden kann, um Kollisionen zu vermeiden.

Unter Einsatz eines virtuellen 3D Modells des Roboters und zweier Kinect®-Kameras zur Erfassung der Werkerposition mittels eines Differenzbildverfahrens werden von WANG ET AL. (2013) vier Reaktionsstrategien – basierend auf dem minimalen Abstand – von der Information bis hin zur Trajektorienmodifikation vorgeschlagen und in ersten grundlegenden Versuchen evaluiert. Die Evaluation anhand einer Fallstudie wurde in SCHMIDT & WANG (2013) vorgestellt.

In den Arbeiten von KULIĆ (2005) und KULIĆ & CROFT (2006) wird ein Gefahrenindex für die gemeinsame Arbeitsraumteilung eingeführt. Dieser kombiniert Robotergeschwindigkeit, -stellung sowie die mit einer Stereokamera erfassten Abstände zum Menschen mit physiologischen Signalen, wie z. B. Herzfrequenz und Muskelaktivitäten. Der berechnete Indexwert wird direkt für eine Bahnpla-

nung anhand eines Gütefunktionalen verwendet. Als kritisch anzusehen ist die Berücksichtigung physiologischer Signale aus produktionstechnischer Sicht, da abhängig von der Aufgabenkomplexität, Tageszeit und -form sowie dem Erfahrungslevel sowohl physische als auch psychische Beanspruchungen zu signifikanten Varianzen führen können.

2.4.4.2 Lokale Sensorik

Die Applizierung von Sensorsystemen am Roboterarm erzeugt eine virtuelle Schutzhülle um den Roboter und reduziert dadurch den Konfigurations- und Einrichtaufwand in Bezug auf Umgebungsänderungen (vgl. Abbildung 2-18).

In den Arbeiten von HEILIGENSETZER (2003), NOVAK & FEDDEMA (1992), SCHLAICH (2013) und ŠEKORANJA ET AL. (2014) werden kapazitive Sensoren im Sinne einer Roboterhaut verwendet, um berührungslos Annäherungen von Objekten zu detektieren und diese Informationen direkt der Robotersteuerung für eine Bahnänderung zur Verfügung zu stellen. Eine Limitierung dieses Verfahrens sind statische Umgebungsobjekte, deren gewollte Annäherung ebenfalls zu einer Kapazitätsänderung der Kondensatoren und zwangsläufig zu einem Roboterhalt führt.

Eine Besonderheit stellt die Kombination von Kontaktdetektion sowie -prädiktion dar, die sich sowohl in der SafeInteraction Technologie der Firma MRK-Systeme GmbH (vgl. Abbildung 2-15 e) (MRK-SYSTEME GMBH 2013) sowie in dem von Bosch entwickelten APAS-Roboter (Automatischer Produktions-Assistent) wiederfindet (vgl. Abbildung 2-18 d) (SCHLAICH 2013). Die kapazitiven Sensoren sind in eine elastische Schutzhaut integriert, welche die Kollisionsenergie bei Kontakt absorbiert.

MORIKAWA ET AL. (2007) verwendet ein Multi-Vision-System, bestehend aus mehreren Hochgeschwindigkeitskameras, die entlang des Roboterarms angebracht sind, um Fremdobjektbewegungen zu detektieren (vgl. Abbildung 2-18 c). Mittels des Visual Servoing Verfahrens werden die Trajektorien der gemessenen Objektbewegungen vom Kamerakoordinatensystem direkt auf die referenzierten Roboterachsen projiziert und für die Ausweichbewegung verwendet.

Im Forschungsprojekt EsIMiP (Effiziente und sichere Interaktion von Menschen und intelligenten Produktionsanlagen) wurde auf Basis einer Architektur zur Separation von sicherheitskritischen und unkritischen Kernfunktionalitäten, wie z. B. Bahnplanung oder Geschwindigkeitsregelung, ein System zur Kontaktprä-

diktion mittels Ultraschallsensoren am Roboter entwickelt (vgl. Abbildung 2-18 a) (OSTERMANN ET AL. 2011). Dieses basiert auf einer Umgebungskarte, welche zyklisch mit der Roboterbewegung abgeglichen wird, um anhand von Kollisionstests die zulässigen Bewegungsräume zu ermitteln und daraus die Achsgeschwindigkeiten zu berechnen.

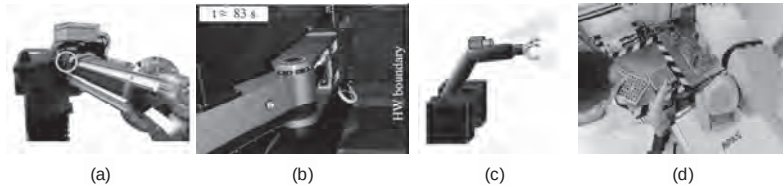


Abbildung 2-18: Exemplarische Sicherheitsansätze für die Kontaktprediktion und -reaktion;

(a) und (b) Ultraschallsensoren am Roboterarm (OSTERMANN ET AL. 2011, GLOWA & SCHLEGL 2013)

(c) Kollisionsvermeidung mittels Visual Servoing (MORIKAWA ET AL. 2007)

(d) APAS (SCHLAICH 2013)

Ebenso wurde von GLOWA & SCHLEGL (2013) ein System, bestehend aus einer Kombination aus Ultraschallsensoren am Manipulator, zur Kollisionsvermeidung vorgestellt (vgl. Abbildung 2-18 b). Dieses kann eine Unterscheidung in statische und dynamische Objekte vornehmen, indem sensorisch erfasste und a-priori bekannte Objekte mittels einer virtuellen Umgebung unterdrückt werden. Hieraus folgt, dass vorhandene Messungen mit unbekannten Objekten assoziiert werden und ungewünschte Kollisionen vermieden werden können. Eine Integration in eine Bahnplanung sowie die Erprobung anhand eines Anwendungsszenarios stehen noch aus.

2.4.5 Lokalisierung

Durch den Einsatz von Markern am Menschen können aktuelle Bewegungs- sowie Positionsdaten ausgelesen und ermittelt werden. In CORRALES ET AL. (2011) werden der Roboter und der Mensch zunächst durch kinematische Drahtmodelle mit Gelenken repräsentiert und im zweiten Schritt mittels geometrischer Ersatzhüllkörper, wie z. B. Zylinder, approximiert (vgl. Abbildung 2-19 b). Die Bewegungserfassung und -synchronisation erfolgt durch den Einsatz

eines getragenen Motion Capture Anzugs. Mögliche Kollisionen werden durch die Überwachung des minimalen Abstands zwischen allen Ersatzkörpern identifiziert.

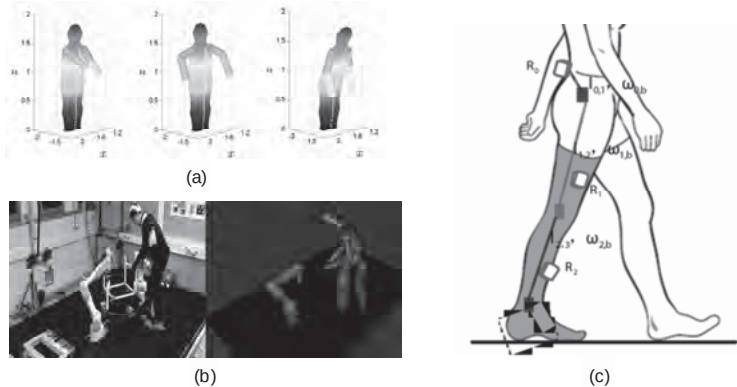


Abbildung 2-19: Exemplarische Sicherheitsansätze für Lokalisierung;
 (a) Menschmodellierung mittels Sichtmarker (NAJMAEI & KERMANI 2011)
 (b) Menschmodellierung mittels kinematischer Drahtmodelle (CORRALES ET AL. 2011)
 (c) Inertialsensoren am Menschen (YUAN & CHEN 2014)

CIFUENTES ET AL. (2014) sowie YUAN & CHEN (2014) nutzen tragbare Inertialsensoren zur Erfassung menschlicher Bewegungen. Diese werden in einfacher Form am Becken (CIFUENTES ET AL. 2014) zur Messung von Orientierungsänderungen bei Gehbewegungen appliziert oder in dreifacher Ausführung zusätzlich am Oberschenkel sowie am Unterschenkel angebracht (vgl. Abbildung 2-19 c) (YUAN & CHEN 2014). Anhand der gemessenen Beschleunigungsdaten können sowohl die Bewegungsgeschwindigkeit als auch die Position über doppelte Integration sowie unter Verwendung eines zweistufigen linearen Kalman-Filters ermittelt werden. Dieses Verfahren wird vorrangig für Analysen von Bewegungsverhalten eingesetzt und wurde bislang noch nicht in Kombination mit einer Mensch-Roboter-Kooperation evaluiert.

Ein zweistufiger Ansatz wird in NAJMAEI & KERMANI (2011) präsentiert. Anhand von Sichtmarkern, die am Oberkörper und an den Armen angebracht sind, kann der Torso sensorisch erfasst und mit einem kinematischen Ersatzmodell

abgeglichen werden (vgl. Abbildung 2-19 a). In Kombination mit Trittmatten und einem künstlichen neuronalen Netz (KNN) wird die Position sowie Orientierung des Menschen mit seinen Oberkörperinformationen fusioniert und auf ein Ganzkörpermodell übertragen. In Versuchen wird das generelle Funktionsprinzip demonstriert. Unklar bleibt jedoch, wie robust ein neuronales Netz, aufgrund der unbekannten inneren Struktur, in einer sicherheitskritischen Anwendung ist. Darüber hinaus ist das zeitintensive Training eines Netzes oftmals nur für eine spezifische Konfiguration anwendbar und limitiert demzufolge die Einsatzflexibilität sowie Übertragbarkeit des Systems.

Es bleibt festzustellen, dass markerbasierte Systeme oder tragbare Sensoren am Menschen eine nicht zu unterschätzende Barriere, verursacht durch den Trageaufwand, darstellen. Des Weiteren ist die industrielle Relevanz für markerbasierte Systeme abzusprechen, da Fehlverhalten, wie z. B. ein falsches Tragen der Marker, eine Manipulation oder ein möglicher Markerverlust, äußerst kritisch sind.

2.4.6 Bewertung bestehender Ansätze

Für eine Mensch-Roboter-Koexistenz wird die Einhaltung der Anforderungen entsprechend der Norm DIN EN ISO 10218 Teil 1 und Teil 2 zur Gefährdungsreduktion vorgeschrieben. Die quantifizierten Leistungsgrenzen für den kollaborierenden Betrieb, welcher die Koexistenz einschließt, werden in der aktuellen Norm durch die biomechanischen Grenzwerte aus der technischen Spezifikation TS 15066 abgelöst. Diese Sicherheitsanforderungen gelten beim Zusammenarbeiten von Mensch und Industrieroboter. Sie konkretisieren die allgemeinen in der Norm DIN EN ISO 10218 gestellten Anforderungen, welche die Einwirkungen auf den Menschen reglementieren und für die berührende Ansätze anzuwenden sind. Mit Ausnahme von Hals und Gesicht liegen die Grenzwerte im Falle eines Stoßes zwischen 160 N bis 250 N. Bei leichten Roboterbauarten kann dies zu einer signifikanten Verbesserung der Systemnutzung führen ohne ein höheres Verletzungsrisiko in Kauf nehmen zu müssen (vgl. Abbildung 2-20) (REINHART ET AL. 2012B).

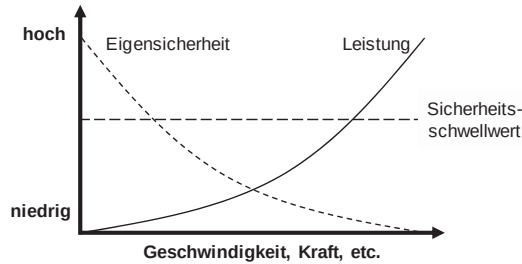


Abbildung 2-20: Zielkonflikt in der Mensch-Roboter-Kooperation (in Anlehnung an OBERER-TREITZ ET AL. 2011)

Als entscheidendes Einsatzkriterium für einen Einsatz von MRK-Systemen steht die Balance zwischen der Betriebssicherheit und einer höchstmöglichen Systemeffizienz. Daraus folgt, dass die geringe Nutzlast geeigneter schadensminimierender Roboterbauformen sowie deren begrenzte Reichweite das Einsatzfeld limitieren. Generell ergeben sich aus der spezifischen Betrachtung der Zielapplikation die notwendigen Kräfte und Wege und führen damit zur Auswahl des Robotertyps. Um die Vorteile und das Potenzial einer Arbeitsraumteilung auszus schöpfen und somit auch große schwere Baugruppen, wie in der Endmontage durchaus üblich, handhaben zu können, ist ein Einsatz größerer Roboterbauformen mit erhöhter Traglast erforderlich. Das bedeutet, dass die Sicherheitsstrategie diesen prozeduralen Anforderungen Rechnung tragen muss.

Aus Abbildung 2-21 geht hervor, dass prinzipiell berührungslose Sensorsysteme eine qualitativ bessere Eignung gegenüber berührenden Systemen versprechen. Neben den beschriebenen prozessbedingten Anforderungen stellt die Systemakzeptanz ein signifikantes Entscheidungsmerkmal dar. Grundsätzlich ist diese höher, sofern keine Beeinträchtigung des bisherigen Status quo erfolgt. Hierbei besteht nach Expertenmeinungen Grund zum Zweifel, ob berührende Ansätze von Mitarbeitern aus langfristiger Sicht wirklich akzeptiert werden oder ob die aus Gefährdungssicht unkritischen Kontakte zwischen Mensch und Roboter eine kognitive Belastung für den Menschen hinsichtlich Produktivität sowie Konzentration darstellen (AUTOMATIONSPRAXIS 2014) und der erwartete Vorteil einer Mensch-Roboter-Kooperation umgehend wieder aufgezehrt wird.

Robotergröße	groß			Berührungslos
				Berührend
	klein			Berührungslos
				Berührend
		niedrig	hoch	
Robotergeschwindigkeit				
Legende				
 geeignet  bedingt geeignet  ungeeignet				

Abbildung 2-21: Qualitative Bewertung der Sicherheitsstrategien für den kollaborierenden Roboterbetrieb abhängig von der Robotergröße und -geschwindigkeit (REINHART ET AL. 2012B)

In diesem Kontext stehen insbesondere die Adaptierbarkeit und Reaktionsfähigkeit berührungsloser Sicherheitsstrategien auf sich veränderliche Umgebungsbedingungen, wie sie innerhalb der kontinuierlichen Fließmontage vorliegen, im Fokus der Betrachtung. Die bisherigen Ansätze sind, eingeteilt in die drei Betrachtungsebenen Systemeignung, Systemflexibilität und Systemakzeptanz, in Tabelle 2-3 zusammengefasst. Anhand dieser Gegenüberstellung wird hieraus der konkrete Handlungsbedarf in Bezug auf eine Arbeitsraumteilung zwischen Mensch und Roboter innerhalb von Fließmontagesystemen abgeleitet.

- **Systemeignung** – Die Systemeignung adressiert die Evaluation der Ansätze in Bezug auf technische Funktionserfüllung unter Berücksichtigung der Montageorganisationsform. Unterschieden wird hier zwischen stationärer und ortsflexibler Montage. Während die Absicherung der stationären Montage zum Stand der Technik gehört, stellt die ortsflexible Montage, wie z. B. die kontinuierliche Fließmontage, insbesondere für berührungslose globale Systeme eine große Herausforderung dar. Dies resultiert aus dem limitierten Sichtbereich sowie dem großen Hardwareaufwand zur Abdeckung eines großen Arbeitsraums zur Vermeidung möglicher Verdeckungen.
- **Systemflexibilität** – Diese Ebene fokussiert den Prozess der Arbeitsraumteilung. Die in NYHUIS ET AL. (2008) eingeführten Wandlungsbefähiger lassen sich mit applikationsspezifischen Unterpunkten assoziieren. So repräsentiert der Mobilitätsaspekt eine Eingangsvoraussetzung für die Ab-

laufflexibilität innerhalb einer Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage. Diese beschreibt die Fähigkeit des Roboters, auf variierende Tätigkeitsfolgen und -dauern des Menschen im gemeinsamen Arbeitsraum zu reagieren, und abhängig davon seinen Montageprozess zu adaptieren. In diesem Zusammenhang repräsentiert die Systemverfügbarkeit die Vermeidung eines Roboter-Not-Halts zur Aufrechterhaltung des automatisierten Montageprozesses. Der dritte Aspekt stellt die Universalität und somit die Systemunabhängigkeit vom Robotertyp dar und beschreibt, inwiefern der Ansatz für variierende Robotergrößen geeignet ist.

- **Akzeptanz** – Dieser Aspekt beschreibt die Systemakzeptanz aus Mitarbeiter- und Betreibersicht. Für die erste Domäne relevant sind die Faktoren Bedienerfreundlichkeit und wahrgenommenes Sicherheitsempfinden. Aus Betreibersicht wird der zu erwartende, monetär vergleichbare, Hardwareaufwand für die Realisierung einer Mensch-Roboter-Koexistenz betrachtet.

Aus der Analyse existierender Sicherheitsstrategien wird deutlich, dass eine durchgängige technische Eignung für stationäre Montageorganisationsformen vorliegt, welche sowohl in Prototypen als auch in Serienprodukten dargelegt wurden. Aufgrund der Tatsache, dass berührende Sicherheitsansätze direkt in das Robotersystem integriert sind (vgl. Abschnitt 2.4.2 und Abschnitt 2.4.3), ist eine Übertragbarkeit auf ortsflexible Montagesysteme grundsätzlich gegeben, jedoch steht der erforderliche Austausch von Roboterhardware einem wirtschaftlichen Einsatz im Weg. Darüber hinaus limitiert die Beschränkung berührender Ansätze hinsichtlich der Ablaufflexibilität einen Einsatz in Montageszenarien mit variierenden Arbeitsinhalten.

Der Einsatz markerbasierter Systeme ermöglicht grundsätzlich eine hohe Ablaufflexibilität in sowohl stationären als auch ortsflexiblen Montageorganisationsformen. Die Realisierung einer hohen Akzeptanz sowohl aus Mitarbeiter- als auch aus Betreibersicht, wie sie für einen langfristigen Einsatz erforderlich wäre, scheint jedoch fragwürdig zu sein (vgl. Abschnitt 2.4.5).

Ansätze basierend auf Kontaktprädiktion und -reaktion sind unabhängig vom Robotertyp und ermöglichen folglich die Umrüstung bestehender Roboteranwendungen für eine Mensch-Roboter-Koexistenz. Gleichmaßen ist eine hohe Mitarbeiterakzeptanz durch die Vermeidung von ungeplanten Kontakten zwischen Mensch und Roboter zu erwarten. Jedoch erfordert die Berücksichtigung des bewegenden Montagehauptkörpers innerhalb der dynamischen Szene einen ho-

hen Aufwand in der Einrichtung sowie Konfiguration. Dies führt entweder zum erforderlichen Einsatz mehrerer Sensorsysteme zur Abdeckung eines großen Arbeitsbereichs, wie in einer Fließmontage üblich, oder zu einer aufwändigen Integration von Umgebungsobjekten ohne Verwendung von räumlichen Fixpunkten für die Kollisionsvermeidung.

Tabelle 2-3: Qualitative Bewertung der Sicherheitsstrategien

		Berührende Ansätze		Berührungslose Ansätze			
		Energie-absorption	Kontakt-detektion und -reaktion	Kontaktprädiktion und -reaktion		Lokalisierung	
				Globale Sensorik	Lokale Sensorik		
System-eignung	Stationäre Montage	●	●	●	●		●
	Ortsflexible Montage	●	●	◐	◐		●
Systemflexibilität	Ablaufflexibilität	○	○	◐	○		●
	Systemverfügbarkeit	◐	◐	◐	◐		◐
	Unabhängigkeit vom Robotertyp	○	○	●	●		●
System-akzeptanz	MA-Akzeptanz	◐	◐	●	●		○
	Betreiberakzeptanz	◐	◐	◐*	○**	◐*	○**

* Stationäre Montage

** Ortsflexible Montage

Legende

● voll erfüllt ◐ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

2.5 Konkretisierung des Handlungsbedarfs

Durch die Kombination manueller Tätigkeiten bei gleichzeitig automatisierten Montageprozessen am sich bewegenden Montagehauptkörper lassen sich weitere Effizienz- und Flexibilitätsvorteile innerhalb der Fließmontage, wie z. B. bei Nacharbeiten und variierenden Arbeitsinhalten, erschließen. Hieraus resultiert an die einzusetzende Sicherheitsstrategie die Anforderung nach einer hohen Systemflexibilität bei gleichzeitig geringem Hardware- und Konfigurationsaufwand. Es stehen hierfür verschiedene Strategien zur Verfügung, die in berührende und berührungslose Verfahren unterteilt werden können.

Jede Sicherheitsstrategie bietet ein individuelles Charakteristikum an Funktionen und Systemeigenschaften, um grundsätzlich eine Mensch-Roboter-Koexistenz zu realisieren. Anhand der durchgeführten Analyse und Bewertung bleibt festzustellen, dass Sicherheitsstrategien basierend auf dem Einsatz globaler Sensorik den vielversprechendsten Ansatz für eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage darstellen, da sie erhebliche Vorteile im Bereich der Systemflexibilität aufweisen. Dem gegenüber stehen Defizite durch die Nutzung räumlicher Fixpunkte, welche den notwendigen Hardwareaufwand signifikant erhöhen. Des Weiteren besteht Handlungsbedarf in der Erarbeitung von Bahnplanungskonzepten zur Durchführung förderbandsynchroner Montageprozesse unter dem Aspekt der Kollisionsvermeidung zur Steigerung der Systemverfügbarkeit.

Für die Erforschung eines allgemeingültigen Systemkonzepts für eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage ergeben sich somit folgende Schwerpunkte:

- *Synchronisationskonzept für die Arbeitsraumüberwachung* – Es bedarf des Entwurfs eines Rahmenkonzepts, welches neben der Synchronisation zwischen dem Roboterendeffektor und dem Montagehauptkörper ebenfalls die Synchronisation des zu überwachenden Überwachungsraums an die sich unterschiedlich bewegenden Objekte innerhalb der Fließmontage ohne den Einsatz räumlicher Fixpunkte realisiert.
- *Arbeitsraumkonfiguration und -erfassung* – Die automatisierte Konfiguration des zulässigen Roboterarbeitsbereichs beinhaltet die Analyse und Auswahl von Sensorprinzipien zur Erfassung bekannter und unbekannter Umgebungsobjekte innerhalb des Arbeitsraums. Darüber hinaus bedarf es der Erarbeitung einer geeigneten Vorverarbeitung, um Umgebungsmodelle in kompakter Form der Roboterbahnplanung zur Verfügung stellen zu können.
- *Flexible Roboterbahnplanung* – Die Roboterbahnplanung schreibt eine Kombination aus Montageprozessdurchführung bei gleichzeitiger Kollisionsvermeidung unter Betrachtung dynamischer Kollisionsbedingungen im Rahmen der förderbandsynchronen Fließmontage vor. Ein Hauptaugenmerk stellt in diesem Zusammenhang die Aufrechterhaltung der Systemverfügbarkeit durch die ortsflexible Wiederherstellung einer verlorenen Synchronisation zwischen Roboterendeffektor und Montagehauptkörper infolge einer Kollisionsvermeidung dar.

3 Anforderungen an eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage

Das folgende Kapitel beschreibt die systematische Analyse und Ableitung von allgemeinen Zielanforderungen für eine Mensch-Roboter-Koexistenz innerhalb einer Fließmontageanwendung. Des Weiteren erfolgt eine Betrachtung generischer Randbedingungen und Erfordernisse, die durch die Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit komplettiert wird.

3.1 Allgemeines

Die Kernprozessanforderung ist die Synchronisation zwischen Montagekörper und Montagehauptkörper zur Ausführung der Montage. Aus Sicht des bewegten Montagehauptkörpers findet der Handhabungs- und Montageprozess in einer definierten relativen Position sowie Orientierung statt. In Abgrenzung zu DIRNDORFER (1993) wird für die förderbandsynchrone Prozessaufführung nicht die Kompensation der vorliegenden Schwingungen, sondern das reaktive prozessorientierte Robotersystemverhalten innerhalb einer Mensch-Roboter-Koexistenz fokussiert. Demnach stellt eine wesentliche Anforderung die Synchronisation des Überwachungsraums an das reaktive Roboterverhalten entlang der Förderstrecke dar.

Folgende Unterpunkte umfassen sowohl die technischen als auch wirtschaftlichen Kernanforderungen an ein System für eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage:

- Montageprozess,
- Arbeitsraumüberwachung,
- Roboterbahnplanung,
- Ökonomische Effizienz und
- Systemaufbau.

3.2 Montageprozess

Der Montageprozess umfasst nach VDI 2860 das Greifen bzw. die Aufnahme des Bauteiles (vgl. Abbildung 3-1, Schritt I-III) und der erforderlichen Montagehilfsmittel durch die Montageeinheit; in diesem Fall der Industrieroboter mitsamt Endeffektor. Danach schließt sich der eigentliche Montagevorgang an (vgl. Abbildung 3-1, Schritt IV-VII), der durch eine prozessorientierte Positionierung sowie Bauteilorientierung im Hinblick auf die auszuführende Trajektorie charakterisiert ist.

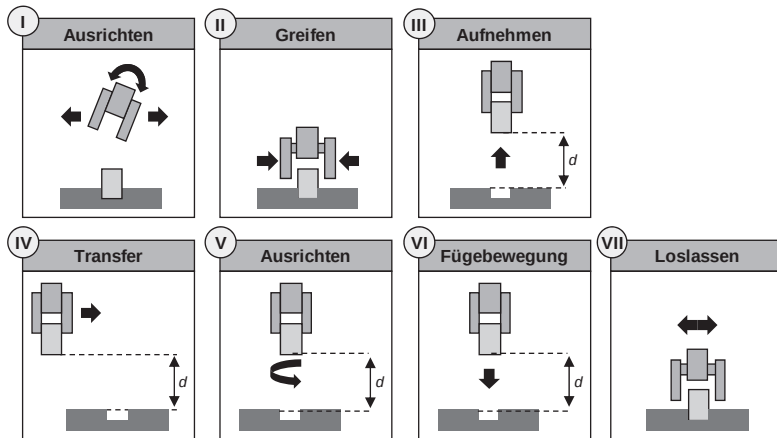


Abbildung 3-1: Allgemeiner Montageprozess (in Anlehnung an SAYLER 2011)

Daher sind für die Umsetzung eines roboterbasierten Montageprozesses folgende Parameter und Randbedingungen festzulegen:

- Bahnkurven für die Grobpositionierung des Montageobjekts,
- Bewegungsabläufe des Montageobjekts zur Feinpositionierung und
- Randbedingungen und Grenzen für die Bewegungsabläufe.

Bei der Systemgestaltung für die ortsflexible Montage ist zu berücksichtigen, dass der Montageablauf stationär aufgenommen werden kann. Klassischerweise erfolgt die Grobpositionierung über eine punktbasierte Definition der Sollpositionen. Hierbei ist die Genauigkeit der aufgenommenen Punkte für die finale Einbaubahn nicht entscheidend, da sie mittels der erfassten Sensorinformationen an das Szenario adaptiert werden und in der Grundform niemals zum Einsatz kom-

men. In der Ausführung werden sich sowohl Position, Orientierung, Geschwindigkeit als auch Beschleunigungen nachhaltig verändern können.

Im Gegensatz zur Grobpositionierung, bei der Punktkoordinaten nach der prozessorientierten Programmvorschrift sequenziell angesteuert werden, erfolgt im Fall der Feinpositionierung eine Online-Regelung über eine Sollwertvorgabe. Dies bedeutet, dass über vorgelagerte Algorithmen im Sinne einer Vorsteuerung eine Anpassung des Führungsverhaltens erzielt werden kann, sodass die Nominalbahn für die Kollisionsvermeidung modifiziert werden kann. Ferner ist zu betonen, dass die Kollisionsvermeidung im Falle der förderbandsynchronen Montage nicht beliebig durchführbar ist. So muss eine Fallunterscheidung ab dem Schritt Fügebewegung (vgl. Abbildung 3-1, Schritt VI) vorgenommen werden, da infolge der erfolgreichen Synchronisation zwischen Montageobjekt und Montagehauptkörper nicht mehr alle Freiheitsgrade für die Kollisionsvermeidung zur Verfügung stehen.

3.3 Arbeitsraumüberwachung

Damit der Industrieroboter eine Kollisionsvermeidung innerhalb einer Koexistenz gewährleisten kann, bedarf es einer echtzeitnahen Erfassung des Werkers beim Eindringen in den Arbeitsraum. Primäre Herausforderung ist bei der kontinuierlichen Fließmontagelinie die Tatsache, dass der Überwachungsraum sich weder zeitlich noch räumlich an Fixwerten orientiert, sondern sich kontinuierlich in Bewegung befindet. Somit bietet der Einsatz eines beweglichen Schutzraums eine hohe Flexibilität bei wirtschaftlich vertretbarem Aufwand im Vergleich zu einem Einsatz mehrerer Sensorsysteme. Da der Industrieroboter für die Prozessdurchführung verantwortlich ist und gleichermaßen die gefahrbringende Komponente darstellt, liegt es nahe, den Überwachungsraum an die Roboterbewegungen anzupassen und zu synchronisieren.

Die Roboterbewegungsbahn im nominellen und ungestörten Montageprozess zur Positionierung und Orientierung des Montageobjekts kann zwar als bekannt vorausgesetzt werden, jedoch ist der Zeitpunkt, zu dem ein Bahnpunkt angefahren wird, unbekannt und variabel. Diese Unsicherheit ergibt sich aus der Unkenntnis, ob bzw. wann und wo sich ein unbekanntes Objekt in der Umgebung des Roboters befindet und somit eine Reaktionsbewegung auslöst. Es liegt somit eine dynamische, online generierte Bewegungsbahn vor, die eine prozesssichere und schnelle Synchronisation der sensorischen Arbeitsraumüberwachung relativ

3 Anforderungen an eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage

zum Roboter bzw. seinem Manipulator für die Koexistenz unabdingbar macht (vgl. Abbildung 3-2).

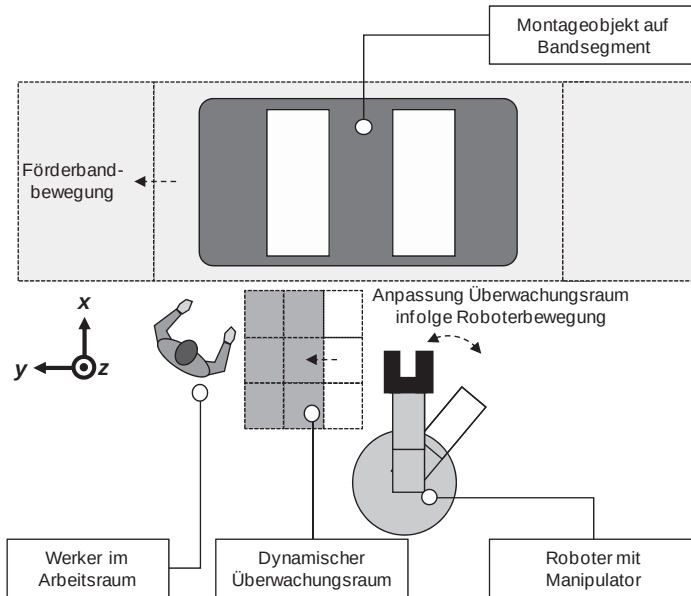


Abbildung 3-2: Schematische Draufsicht eines Fließmontagesegments mit Mensch-Roboter-Koexistenz

Da die Synchronisation mit der Gleichzeitigkeit des Bewegungsablaufs zwischen Überwachungsraum und Roboter einhergeht, ist die Forderung nach echtzeitfähigem Verhalten näher zu untersuchen. Echtzeitfähig bedeutet hierbei, dass innerhalb einer definierten Zeit Prozesse zuverlässig auftreten und die Dauer des Ablaufs fest kalkulierbar ist, d. h. logisch und zeitlich korrekt ist (WÖRN & BRINKSCHULTE 2005). Hieraus resultieren nach WÖRN & BRINKSCHULTE (2005) die beiden Aspekte:

- **Rechtzeitigkeit** – Die Ausgabedaten müssen rechtzeitig berechnet werden und zur Verfügung stehen und Eingabedaten müssen somit ebenfalls rechtzeitig abgeholt werden. Als aggregierte Bedingung kann folglich ein exakter Zeitpunkt, ein spätester Zeitpunkt, ein frühester Zeitpunkt oder ein Zeitintervall gewählt werden.

- *Gleichzeitigkeit* – Eine Gewährleistung der Rechtzeitigkeit für parallele Aktionen wird als Gleichzeitigkeit bezeichnet, welche durch paralleles Verarbeiten der Daten gewährleistet werden kann.

Aufbauend auf Kapitel 2 lassen sich berührungslose Ansätze, wie z. B. kamera-basierende Systeme über dem Arbeitsraum, als geeignet einstufen. Hierbei kann die Ortsflexibilität des Überwachungsraums entweder durch eine Kamera-schwenkbewegung oder durch eine Bewegung bei konstanter Kameraorientierung bzw. eine Kombination beider realisiert werden. Aufgrund des geforderten robusten Umgangs mit Verdeckungen innerhalb des Sichtkegels im Falle einer Roboterüberfahrt soll die zweite Variante weiter betrachtet werden. In diesem Zusammenhang lassen sich folgende Anforderungen für die synchronisierte Bewegung formulieren:

- *Genauigkeit* – Der Schutzraum sollte möglichst nah am Roboter beginnen. Die Genauigkeit, mit welcher die geforderte Kameraposition erreicht wird, muss so gewählt werden, dass trotz einer zum Roboter versetzten Kameraposition kein Fremdobjekt detektiert wird.
- *Schnelligkeit* – Im Sinne einer Synchronisation sollte jeder Zwischenpunkt möglichst zeitgleich zusammen mit dem Roboter ohne Überspringen erreicht werden.
- *Eindeutigkeit* – Entsprechend der Situation kann das Roboterverhalten im Hinblick auf seine Trajektorie streckenweise variieren. Die Adaptivität des Kamerasystems an unterschiedliche Robotergeschwindigkeiten stellt somit eine wesentliche Anforderung in der Arbeitsraumüberwachung an die Mensch-Roboter-Koexistenz innerhalb der Fließmontage dar.
- *Zuverlässigkeit* – Ein wichtiger Punkt ist eine zuverlässige Funktion der Regelung, damit die Sicherheit des Gesamtsystems gewährleistet ist. Neben der Genauigkeit und Schnelligkeit des Systems sollten interne Systemfehler im Sinne der funktionalen Sicherheit nach IEC 61508 detektiert werden können.

3.4 Roboterbahnplanung

Damit die Roboterbewegungen im Prozess steuerbar und somit online modifizierbar sind, bildet das Vorhandensein eindeutiger Systemzustände eine essentielle Basis. Es muss der Anforderung Rechnung getragen werden, in jedem Sys-

3 Anforderungen an eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage

temtakt die Roboterbewegung hinsichtlich der relevanten Bewegungsparameter wie Position, Orientierung und Geschwindigkeit zu verändern und a-priori vorgegebene Soll-Trajektorien auf vorliegende Kontextsituationen anzupassen. Mittels einer funktionalen Modellierung und der Einführung von prozeduralen Betriebszuständen lassen sich die prozesstechnischen Steuerungs- und Logikeinheiten modular und unabhängig voneinander spezifizieren und umsetzen (GEISBERGER ET AL. 2007). Ausgehend von einer durchgängigen Kommunikationsarchitektur ist es somit möglich, über vertikale oder horizontale Skalierungen modulare Funktionserweiterungen durchzuführen (ROPOHL 2009).

Im Nominalfall erfolgt die förderbandsynchrone Montage ohne Störungen. Insbesondere im Falle einer Mensch-Roboter-Koexistenz können sicherheitsbedingte Modifikationen der Nominaltrajektorie notwendig sein. Dennoch ist es erforderlich, dass während der Aufgabenausführung in der Koexistenz ein hoher Effizienzgrad in der Durchführung der individuellen Aufgaben besteht (SHEN & REINHART 2013). BORTOT ET AL. (2012) haben im Rahmen einer Studie, unter der Prämisse eines hohen Wohlbefindens, geeignete Bewegungsparameter am Beispiel eines Vertikalknickarmroboters identifiziert, welche die menschliche Akzeptanz im Rahmen einer Arbeitsraumteilung unterstützen können. Ähnliche Erkenntnisse lassen sich aus der Arbeit von THIEMERMANN (2005) für SCARA-Roboter (Selective Compliance Assembly Robot Arm) ableiten. Grundsätzlich kann ein physischer Kontakt zwischen Mensch und Roboter gefahrlos sein (HADDADIN ET AL. 2008, HADDADIN ET AL. 2011) (vgl. Abschnitt 2.4.2 und 2.4.3), jedoch können abrupte Geschwindigkeiten als unangenehm wahrgenommen werden (ARAI ET AL. 2010, BORTOT 2014).

Es kann folglich zusammengefasst werden, dass ein beliebiges Ausweichen des Roboters eine geringe Akzeptanz besitzt, sodass definierte Roboterreaktionen erforderlich sind. Es bietet sich hierfür an, folgende Fälle einzuführen, welche abschnittsweise miteinander kombinierbar sind:

- *Montageprozess* – Der Nominalfall repräsentiert einen kompletten Montagedurchlauf in der minimal erforderlichen Prozesszeit ohne reaktive Bahnänderungen des Industrieroboters. Dieser stellt im Idealfall eine automatisierte förderbandsynchrone Montage dar.
- *Kollisionsvermeidung* – Durch Skalierungsfaktoren wird die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters in bis zu sechs Freiheitsgraden gezielt modifiziert, um eine Kollision mit dem Werker als auch mit dem Montagehauptkörper zu vermeiden.

- *Re-Synchronisation* – Primäres Ziel ist die Durchführung der Montage. Das bedeutet, dass bei Geschwindigkeitsmodifikationen der Nominalfall verlassen wird und demzufolge ein Synchronisationsverlust zwischen Industrieroboter und Montagehauptkörper die Folge ist. Da der Synchronisationsverlust an jeder Position entlang eines Bandsegments auftreten kann, resultiert hieraus die Anforderung nach einer ortsflexiblen Wiederherstellung der prozeduralen Synchronisation.

Im Gegensatz zur starren Programmierung ermöglichen Online-Bahnkorrekturen die Anpassung der Robotertrajektorien während der Laufzeit unter Nutzung von sensorisch erfassten Prozess- oder Umgebungsinformationen (vgl. Abbildung 3-3) (GRONINGER ET AL. 2009). Hierbei gilt es zwischen der prozessorientierten Bahnkorrektur und der Kollisionsvermeidung zu unterscheiden:

- *Prozessorientierte Bahnkorrektur* – Die Bahnkorrektur adressiert eine prozessorientierte Änderung der programmierten Roboterbahn hinsichtlich der charakteristischen Bahnparameter (z. B. Stützpunkte, Orientierung, Geschwindigkeit und Beschleunigung) mit dem Zweck der effektiveren Zielerfüllung. Einen Bestandteil stellt der „Point-of-no-return“-Aspekt dar, der die verbleibende Montagezeit für einen automatisierten Montageprozess betrachtet.
- *Kollisionsvermeidung* – Eine Unterart der konventionellen Bahnkorrektur stellt die Kollisionsvermeidung dar. Hier steht das Vermeiden von ungewollten Kontakten sowie Kollisionen mit statischen und dynamischen Umgebungsobjekten im Fokus. Das Ziel der Prozesserrfüllung stellt hier eine untergeordnete Rolle dar.

Das zu entwerfende System soll an die Anforderungen der Bedienergruppe angepasst sein und einen einfachen und schnellen Zugang zu den Grundfunktionen ermöglichen. Dies garantiert eine hohe Akzeptanz seitens der Anlagenbediener durch die reduzierte System- sowie Bedienungskomplexität, aber auch seitens des Unternehmens, da hierdurch Kosten für Roboterexperten auf ein Mindestmaß reduziert werden. Hierdurch werden insbesondere KMUs entlastet, die in den hohen Initialkosten ein großes Risikopotenzial sehen. Zudem wird durch den Wegfall erforderlicher Spezialkenntnisse das Gesamtrisiko signifikant reduziert.

3 Anforderungen an eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage

Dies wird durch folgende Kernaspekte deutlich:

- Der Anlagenbetreiber bzw. -bediener muss im laufenden Prozess Werkzeuganpassungen aufgrund veränderter Produktvarianten integrieren können.
- Veränderungen im Zelldesign sollen systemunterstützt unter (teil-)automatischen Rekonfigurationsaspekten integriert werden können.

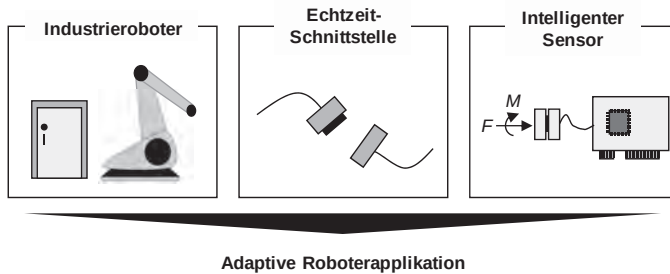


Abbildung 3-3: Struktur einer adaptiven sensorgesteuerten Roboterapplikation (in Anlehnung an GRONINGER ET AL. 2009)

3.5 Ökonomische Effizienz

Die ökonomische Effizienz stellt im Kontext des Systembetriebs den Nutzungsgrad und folglich eine wesentliche Kenngröße dar, die für die Auswahl von Lösungsalternativen und die wirtschaftliche Realisierung einen signifikanten Charakter ausweist. Diese fokussiert nicht nur das Sensor- und Steuerungssystem als solches, sondern steht ebenfalls in direktem Zusammenhang mit der Anlagenverfügbarkeit und hat das globale Ziel, System- und Roboterstandzeiten mittels der Roboterbahnplanung zu reduzieren und somit den direkten Kostenanteil zu senken. Im Fokus stehen in der monetären Betrachtung die Initialkosten sowie die Betriebskosten.

Die Initialkosten beschreiben die monetären Aufwände für die Lösungsrealisierung. Hierzu gehören neben den Komponentenkosten ebenso die Entwicklungs- und Inbetriebnahmekosten. Demgegenüber stehen die Betriebskosten, die über die komplette Systemlebensdauer auftreten. Beispiele hierfür sind Verfügbarkeits- und Servicekosten.

3.6 Systemaufbau

Die Einsatzflexibilität des Robotersystems für die Programmierung und Aufgabendurchführung darf durch den Sensoreinsatz nicht reduziert werden. Aus den Analysen und Ergebnissen bisheriger Arbeiten zu den Themen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität, wie z. B. CISEK (2005), ELMARAGHY (2009), NYHUIS ET AL. (2008), WESTKÄMPER ET AL. (2000) und WIENDAHL ET AL. (2007), lassen sich folgende Kernaspekte ableiten und für ein System für die Mensch-Roboter-Koexistenz innerhalb der Fließmontage wie folgt konkretisieren:

- Der Einsatz modularer Standard-Komponenten, welche eine einfache Handhabbarkeit gewährleisten, ist zu priorisieren. Diese versetzt den Bediener in die Lage, mittels aussagekräftiger Anweisungen sowie Kriterien das System für unterschiedliche Montageprozesse zu adaptieren.
- Es ist ein priorisierter Einsatz einer homogenen Systemlandschaft anzustreben, um Schnittstellendefizite und Synchronisationsprobleme in der Steuerungstechnik zu vermeiden. Daher muss sichergestellt sein, dass ein direkter Zugriff auf die Bewegungs- und Steuerungsfunktionen des Roboters gegeben ist.
- Eine Synchronisation der strukturalen mit der funktionalen Sicht ist erforderlich, um Hardware- und Software-Module funktionsorientiert und aufwandsarm erweitern sowie austauschen zu können und somit auf neue Prozesse im Sinne der skalierbaren Applikationsanforderung individuell anzupassen.
- Eine einfache Konfigurations- sowie Parametrisierungsphase stellen Kernaspekte dar, um Inbetriebnahme- und Stillstandszeiten zu minimieren und einen optimalen Systemnutzungsgrad zu gewährleisten. Ebenso ist die damit verbundene Effizienz entscheidend für die Benutzerakzeptanz und einen potentiellen, industriellen Transfer und Einsatz.

3.7 Fazit

Die allgemeinen Anforderungen an eine Mensch-Roboter-Koexistenz lassen sich anhand fünf wesentlicher Kernpunkte zusammenfassen:

3 Anforderungen an eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage

- *Montageprozess* – Der automatisierte Montageprozess ist in Segmente zu unterteilen, welche mit oder ohne Online-Regelung erfolgen können. Des Weiteren muss der Gültigkeitsbereich für eine Kollisionsvermeidung während der synchronisierten Fügebewegung zur Vermeidung von Kollisionen zwischen Montageobjekt und Montagehauptkörper eingeschränkt werden.
- *Arbeitsraumüberwachung* – Die Arbeitsraumüberwachung erfordert eine Synchronisation der Überwachungsräume an die Roboterbewegung entlang des gesamten Montageprozesses unter den Aspekten Genauigkeit, Schnelligkeit, Eindeutigkeit und Zuverlässigkeit.
- *Roboterbahnplanung* – Es ist aus Akzeptanzgründen erforderlich, definierte Roboterreaktionsstrategien für die Online-Regelung einzuführen. Zur Zielerreichung einer Kollisionsvermeidung bei gleichzeitiger Wahrung der Systemverfügbarkeit ist eine Kombination der Reaktionsstrategien Montageprozess, Kollisionsvermeidung und Re-Synchronisation notwendig.
- *Ökonomische Effizienz* – Das Zielsystem muss der Anforderung Rechnung tragen, eine wirtschaftliche Realisierungsalternative im Vergleich zum Status quo darzustellen.
- *Systemaufbau* – Es wird angestrebt, das Gesamtsystem mit handelsüblichen Komponenten zu realisieren und die Kernfunktionen modularisiert zu konzeptionieren und prototypisch umzusetzen.

4 Konzeption und Systementwurf

Im vorangegangenen Kapitel wurden allgemeine Anforderungen an eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage formuliert und abgeleitet. Das folgende Kapitel stellt darauf aufbauend ein Vorgehen vor, um die vorliegenden Problemstellungen zu strukturieren und hierfür geeignete Lösungsmodule zu entwerfen und in das Gesamtsystem zu integrieren.

4.1 Übersicht und Vorgehen

Innerhalb der Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage können unterschiedliche gefahrbringende Situationen auftreten. Eine Fallmodellierung mittels eines Ereignisbaums zur Unterscheidung und Beurteilung erfordert einen hohen Aufwand und limitiert die Einsatzflexibilität, was als nicht praktikabel einzustufen ist. Einen vereinfachten Zugang bietet der Einsatz von Modellen, die in direkter Kopplung mit dem realen Roboterprozess synchronisiert sind. Deren Umsetzung und Nutzung erfordert eine methodische Konzeption. Ausgehend von der Montageaufgabe bedarf es eines systematischen Vorgehens zur Erstellung, Konfiguration und Integration von Funktionsmodulen für die Anwendung in einer Mensch-Roboter-Koexistenz innerhalb der Fließmontage.

Ein besonderer Fokus liegt hier in der Übertragbarkeit, der Modularität und der bidirektionalen Transitionen zwischen Erstellungs- und Betriebsphase. Das zugrundegelegte Vorgehen orientiert sich am TOTE-Modell (Test-Operate-Test-Exit) (LINDEMANN 2009) und gliedert sich in die konsekutiven Phasen:

- Zielklärung,
- Lösungsgenerierung und
- Lösungsauswahl.

Zur Erarbeitung einer allgemeingültigen Lösung ist es erforderlich, die konkreten Spezifikationen weiter zu abstrahieren. Dies ermöglicht eine Lösungsfindung und -auswahl innerhalb eines generalisierten Lösungsraums. Darauf kann im Folgeschritt die Konkretisierung erfolgen und infolgedessen auf die vorliegende Problemstellung angewandt werden.

Es existieren konkrete Problemstellungen, die sich modular in folgende Kernfunktionalitäten unterteilen lassen (vgl. Abbildung 4-1):

- *Synchronisationskonzept des Gesamtprozesses* – Es bedarf einer systematischen Betrachtung der erforderlichen Synchronisationen zwischen Montagehauptkörper, Roboter und Überwachungsraum und einer Auswahl einer geeigneten Synchronisationsstrategie innerhalb des Gesamtsystems.
- *Verknüpfung der Einzelfunktionen im Gesamtsystem* – Zur situationsspezifischen Roboterbahngenerierung ist es notwendig, sowohl Hierarchien als auch Parallelitäten der Prozesse zu berücksichtigen und innerhalb eines Rahmenkonzepts abzubilden.
- *Robotermodell* – Das Ziel dieses Moduls ist eine allgemeingültige Modellierung der Roboterdynamik für die Roboterbahnplanung.
- *Arbeitsraumüberwachung und -synchronisation* – Die Synchronisation des Überwachungsraums an das reaktive Roboterverhalten stellt einen wesentlichen Aspekt zur Detektion unbekannter Objekte innerhalb des Fließmontagesystems dar.
- *Integration bekannter Umgebungsobjekte* – In diesem Modul ist es erforderlich, Komponenten des Fließmontagesystems, wie z. B. den Montagehauptkörper, mittels eines geeigneten Sensoreinsatzes zu erfassen und in ein Umgebungsmodell für die Roboterbahnplanung zu überführen.
- *Roboterbahnplanung* – Innerhalb dieses Moduls wird unter Berücksichtigung der vorangegangenen Schritte das Nominalmodell einer ungestörten automatisierten Montage situationsspezifisch modifiziert und die Roboterbahn an die Mensch-Roboter-Koexistenz angepasst.

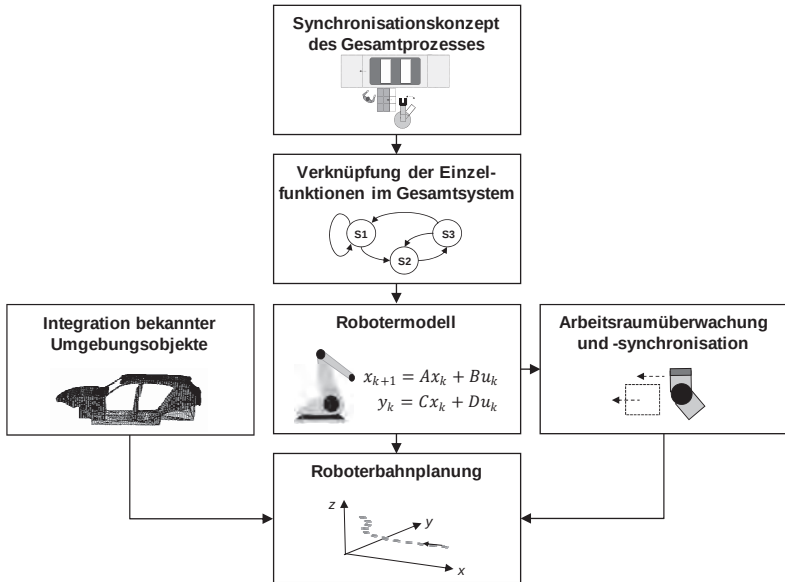


Abbildung 4-1: Modulübersicht des Gesamtkonzepts

4.2 Entwurf des Synchronisationskonzepts

4.2.1 Systemgrenzen und Synchronisationskaskade

Es lässt sich aus Abschnitt 3.3 erkennen, dass Montagehauptkörper, Roboter und Überwachungsraum miteinander zu synchronisieren sind und darauf aufbauend zwei Synchronisationssysteme existieren, die für eine Arbeitsraumteilung in der Fließmontage zu berücksichtigen sind. Allgemein ist bei zeitgleicher Verarbeitung mehrerer Systeme die hierarchische Struktur und das Abhängigkeitsverhältnis zu untersuchen und festzulegen (ROPOHL 2009). Dies bedeutet, dass zwischen den Synchronisationssystemen dieser Aspekt näher betrachtet werden muss.

Das Gesamtsystem lässt sich anhand der Priorität in eine Kaskade aus zwei Systemen unterteilen. Der Überwachungsraum und der Roboter bilden gemeinsam das innere System (vgl. Abbildung 4-2, System II), deren relative Beziehung aufgrund der reaktiven Roboterbewegung als unbekannt anzusehen ist. Besondere Relevanz kommt diesem System zu, da ein Synchronisationsverlust zu einer

Gefährdung führt und infolgedessen als sicherheitskritisch einzustufen ist. Daher muss diesem System eine erhöhte Priorität zugewiesen werden.

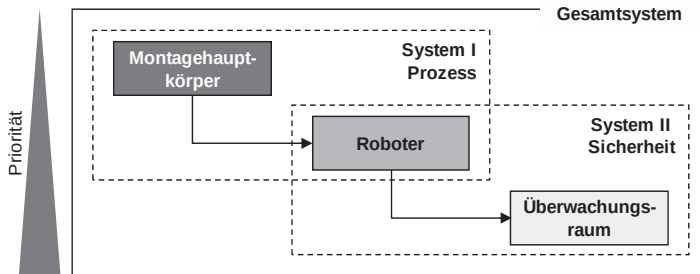


Abbildung 4-2: Gesamtsystem mit dem prozessrelevanten Synchronisationssystem I und dem sicherheitsrelevanten Synchronisationssystem II

Das äußere System I beinhaltet die prozessrelevante Abhängigkeit zwischen Montagehauptkörper und Roboter, die es zu synchronisieren gilt. Hieraus wird ersichtlich, dass beide Synchronisationssysteme zur Erfüllung der Hauptfunktionen Arbeitsraumüberwachung und Montageprozess miteinander über das Roboter-element gekoppelt sind. Somit erfordert die Synchronisation des Gesamtsystems ein zweistufiges Vorgehen unter Berücksichtigung der jeweiligen individuellen Eigenschaften, Prioritäten und Systemschnittstellen.

4.2.2 Synchronisationsprinzip

Eine systemtheoretische Betrachtungsweise des Gesamtsystems ermöglicht die Sicht auf die abstrakten Funktionen der Einzelmodule (JANSCEK 2010). Somit lassen sich die Einzelfunktionen der Systeme mit den jeweiligen assoziierten Abhängigkeiten getrennt voneinander betrachten und in das hierarchische Gesamtmodell für die Synchronisation überführen.

Eine Synchronisation kann entsprechend existierender Prinzipien für Handhabungssysteme in drei Gruppen unterteilt werden (vgl. Abbildung 4-3), welche in DIRNDORFER (1993) und WERNER (2012) ausführlich beschrieben werden:

- *Mechanische Synchronisation* – Ein Mitbewegen eines Interaktionspartners durch form- oder kraftschlüssige Kopplung an den Anderen führt zu einer quasistatischen Umgebung.

- *Gesteuerte Synchronisation* – Eine offene Signalverarbeitungskette ohne Rückführung charakterisiert die gesteuerte Synchronisation, bei der über eine Sollwertvorgabe von Geschwindigkeiten oder Positionen eine Abstandsminimierung der beiden Interaktionspartner erzielt wird.
- *Geregelte Synchronisation* – Werden die relativen Positions differenzen während der Prozesslaufzeit erfasst und über einen Regelkreis rückgeführt, spricht man von einer geregelten Synchronisation.

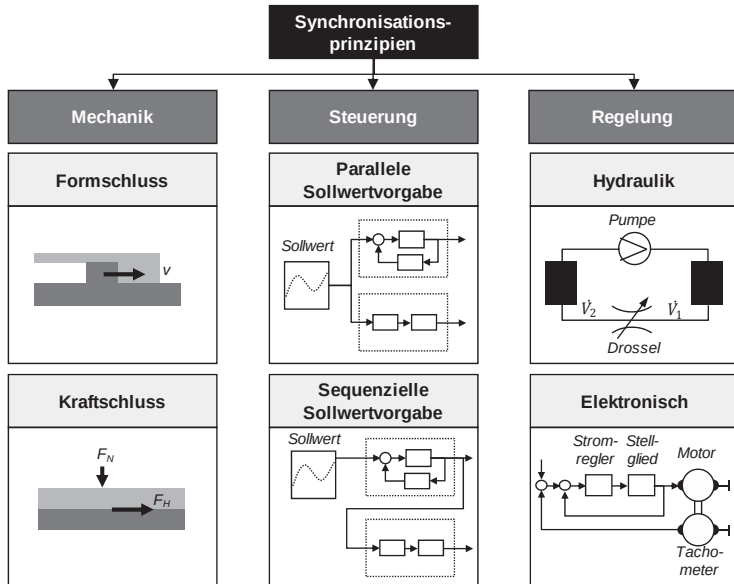


Abbildung 4-3: Synchronisationsprinzipien (in Anlehnung an DIRNDORFER 1993)

Aufgrund der geforderten berührungslosen Arbeitsraumüberwachung innerhalb der Fließmontage, limitiert eine mechanische Kopplung die Flexibilität sowohl für System I als auch II und ist somit nicht geeignet.

4.2.3 System I: Montagehauptkörper – Roboter

Die Auswahl des Synchronisationsprinzips zwischen Montagehauptkörper und Industrieroboter im System I hängt maßgeblich von einer einfachen Realisierung und einer hohen Flexibilität hinsichtlich der Übertragbarkeit auf alternative Mon-

tageprozesse ab. Hierbei ist das Förderband mitsamt Montagehauptkörper der Umgebung zuzuordnen. Dies bedeutet, dass die Eigenschaften nicht veränderbar sind und der Montagehauptkörper sich gemeinsam mit dem Förderband mit konstanter Geschwindigkeit entlang der Führungsschiene bewegt.

Neben dem Synchronisationsprinzip spielt ebenfalls die Synchronisationsvariante eine entscheidende Rolle. Die Möglichkeit, auftretende Regeldifferenzen dem Regelkreis zurückzuführen und somit eine möglichst genaue Synchronisation zu realisieren, ist ein wesentliches Leistungsmerkmal der geregelten Synchronisation. Entsprechend der gestellten Grundanforderungen nach situationsbasierten Roboterreaktionen innerhalb einer ortsflexiblen Mensch-Roboter-Koexistenz stellt diese Methode ebenfalls das flexibelste Prinzip mit einer guten Robustheit dar. Nach WERNER (2009) existieren aus Sicht des Industrieroboters drei wesentliche Synchronisationsvarianten zur Festlegung der Synchronisationspunkte:

- Synchronisation am Förderband,
- Synchronisation am Montagehauptkörper und
- Synchronisation am Montageort.

Es bietet sich die Wahl des TCPs als Synchronisationspunkt in Kombination mit dem förderbandbasierten Synchronisationsprinzip an, um der Forderung nach hoher Systemflexibilität in Bezug auf Montageprozesse Rechnung zu tragen (vgl. Abbildung 4-4). Die Nutzung eines montagekörpernahen Fixpunkts garantiert eine stabile Referenz und verringert darüber hinaus Verdeckungen im Prozessablauf (WERNER 2009).

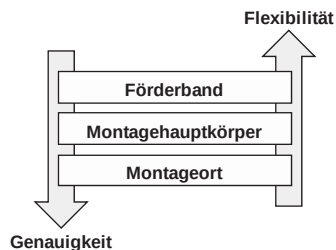


Abbildung 4-4: Vergleich der Synchronisationsvarianten hinsichtlich Genauigkeit und Flexibilität

4.2.4 System II: Roboter – Überwachungsraum

Innerhalb System II bedarf es der sicherheitskritischen Synchronisation zwischen dem beweglichen Kamerasystem und dem Industrieroboter. Diese darf nicht unterbrochen werden und wird gegenüber der prozessorientierten Synchronisation höher priorisiert. Ausgehend von den generischen Anforderungen aus Abschnitt 3.3 lassen sich die Synchronisationsanforderungen anhand von konkreten Einheitsgeschwindigkeitsprofilen für ein bewegtes Kamerasystem konkretisieren (vgl. Abbildung 4-5):

- *Konstante Geschwindigkeit* – Im Nominalfall ohne Einwirkung von außen soll die Kamera dem Roboter folgen.
- *Bremsvorgang* – Eine Geschwindigkeitsreduzierung des Roboters, wie z. B. bei einer Schleichfahrt, soll durch die Kamera registriert werden, damit die Geschwindigkeit angepasst werden kann.
- *Halt* – Sollte der Roboter in einen Halt-Zustand übergehen, so soll die Kamera, unabhängig von der Geschwindigkeit, die Synchronisation nicht verlieren und gemeinsam mit dem Roboter in den Stillstand übergehen.
- *Beschleunigung* – Im Anfahrvorgang sind die Roboterbeschleunigungen größer als im Nominalfall, da ein möglicher Synchronisationsverlust im System I unter Umständen ausgeglichen werden muss, um den geplanten Montageprozess abzuschließen.

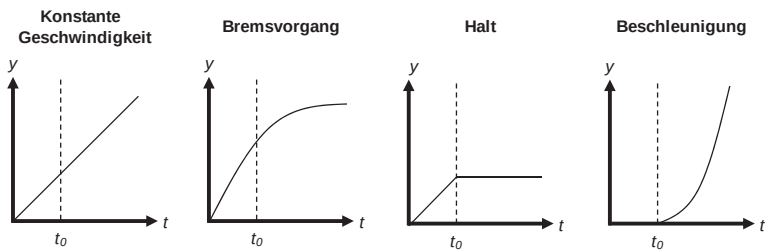


Abbildung 4-5: Geschwindigkeitsprofile für die Synchronisation

Aufgrund der speziellen Dynamikanforderungen bietet es sich an, ein hybrides Synchronisationsprinzip zu wählen. Während die rein geregelte Form durch die Rückkopplung grundsätzlich über eine hohe Genauigkeit und Stabilität bei stationären Prozessen verfügt (FÖLLINGER & KONIGORSKI 2013, LUNZE 2006), ist die

gesteuerte Form der Synchronisation dynamischer, da systembedingte Stellgrößenvorschriften, mit dem Ziel einer höheren Reaktionsgeschwindigkeit, umgangen werden können. Zwar erlauben Industrieroboter einen direkten Zugriff auf aktuelle Positionswerte, jedoch sind diese für eine Synchronisation nur begrenzt verwendbar, da die Latenzzeit innerhalb der Signalverarbeitungskette in Kombination mit der Trägheit des Kamerasystems einen Schleppfehler erzeugen würde. Folglich muss das System für eine vorausschauende Synchronisation ausgelegt werden, um die Einflüsse beider Faktoren reduzieren zu können.

4.3 Statechart-Modell

4.3.1 Allgemeines

Aufbauend auf der identifizierten Hierarchie zwischen den beiden Synchronisationssystemen ist es erforderlich, ein geeignetes Rahmenkonzept zur modularen Spezifikation der benötigten Roboterfunktionen zu entwerfen und deren Relationen zu definieren. Eine Möglichkeit zur Beschreibung von ereignisgetriebenen Systemen bieten Zustandsmodelle, wie z. B. Statecharts, durch welche explizite Systemereignisse für die Modellierung herangezogen werden können. Diese haben den Vorteil einer realitätsnahen objektorientierten Sicht und ermöglichen zusätzlich zu einer parallelen Ereignisverarbeitung ebenfalls die Hierarchiebildung und Modularisierung (HAREL & POLITI 1998, BRUNNER 2013). Die Repräsentation zusammenhängender Systeme mitsamt deren Verhalten kann folglich über eine funktionale Interaktionsbeschreibung von Subsystemen und deren Transitionen erfolgen. Diese basieren entweder auf diskreten FSM-Modellen (Finite State Machine), auf kontinuierlichen Modellen mittels algebraischen Differentialgleichungen (KUPPAN CHE ET AL. 2012) oder auf Funktionsbausteinen (TSENG & SCHREYER 2002).

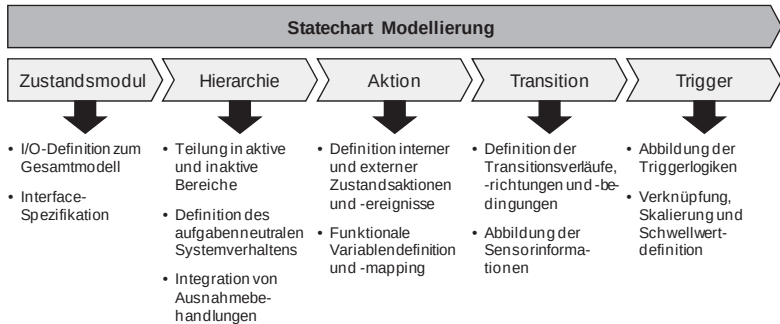


Abbildung 4-6: Vorgehensweise für Statechart Modellierung (in Anlehnung an KUPPAN CHE ET AL. 2012, TSENG & SCHREYER 2002)

4.3.2 Industrieroboter als Statechart

Die Hauptfunktion der Roboterzustandsmaschine besteht darin, die korrekte Positionssollwertfolge für die Aufgabendurchführung zu generieren und die korrekte Ausführung sicherzustellen. Die Einführung von Schichtmodellen, ähnlich dem Verfahren von ZAIDAN (2012), bietet einen grundsätzlichen Vorteil durch die Abstraktion und Gruppierung von funktionalen Modulen und deren hierarchischen Verknüpfungen. In diesem Zusammenhang wird am Beispiel des Industrieroboters ein dreischichtiges Modell eingeführt, dessen Ausführungsfrequenz bei steigendem Abstraktionsgrad abnimmt (vgl. Abbildung 4-7). So werden Aufgabenfunktionen als Komposition aus Bewegungsfolgen über komplette Zustände abgebildet und individuell über verknüpfte Triggersignale aktiviert.

Im Folgenden werden die vier Module innerhalb des Statecharts näher vorgestellt:

- **Aktivierung** – In der Aktivierungsschicht werden durch Komposition messbarer Signale, wie z. B. Position des Montagehauptkörpers oder Werkerposition, die Trigger zur situationsbasierten Aktivierung erzeugt und modifiziert.
- **Zustandsmaschine** – Individuell gekapselte Aufgabenfunktionen als Komposition von Bewegungsfolgen werden durch die zweite Schicht in Form von Zuständen abgebildet und über verknüpfte Triggersignale aktiviert und miteinander verschaltet.

- *Regelalgorithmus* – Über Integration ausgabenerzeugender Transduktoren trägt die Schicht Regelalgorithmus dazu bei, die Bewegungen des Roboters basierend auf einem Robotermodell zu planen und zu optimieren.
- *Prädiktion* – Das Prädiktionsmodul erstreckt sich über die unteren beiden Schichten und dient dazu, in Abhängigkeit der aktivierten Zustände und Steuerbefehlsfolgen, die zukünftigen Roboterpositionen zu schätzen und diese für die erforderliche Synchronisation des Überwachungsraums (vgl. Abschnitt 4.2.4) zu verwenden und somit systembedingte Latenzzeiten zu kompensieren.

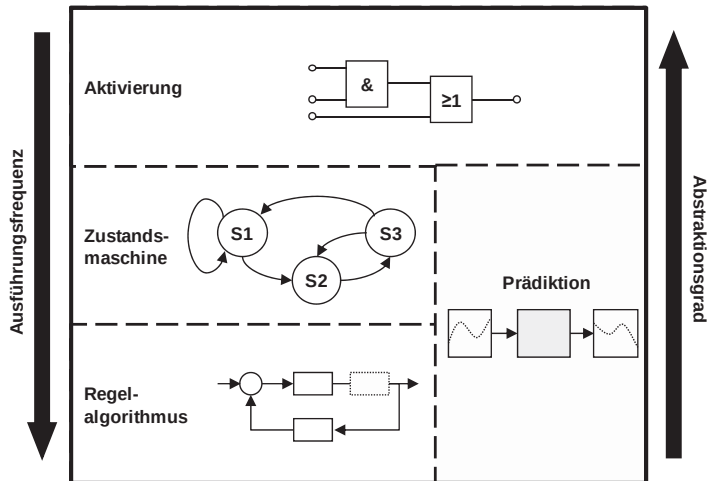


Abbildung 4-7: Statechart-Modell des Roboters

4.4 Robotermodell

4.4.1 Allgemeines

Der folgende Abschnitt leitet aus grundlegenden Überlegungen einen Ansatz für die Modellierung von Industrierobotern ab, mit der eine Prädiktion innerhalb des Statechart-Modells für die Arbeitsraumüberwachung und -synchronisation realisiert wird.

Für eine breite Übertragbarkeit des zu entwerfenden Systems soll zunächst angenommen werden, dass folgende systemtheoretischen Bedingungen nach LUNZE (2010) erfüllt sind:

- *Beobachtbarkeit* – Der Roboterzustand, beschrieben aus Ein- und Ausgangswerten der kommandierten und erreichten Posen, kann vollständig ermittelt werden. Dies setzt nicht zwangsläufig voraus, dass alle Zustandsvariablen direkt oder indirekt messbar sind.
- *Steuerbarkeit* – Ein beliebiger Roboterzustand, d.h. eine Pose, lässt sich aus einer geeigneten Kombination der Stelleingänge erreichen. Dies erfordert nicht zwingend, dass jede Stellgröße nur auf eine Zustandsvariable wirkt.

In diesem Zusammenhang wird der Begriff Roboterzustand analog zum Systemzustand aus der Zustandsraumdarstellung verstanden und beschreibt innere, energiespeichernde Systemgrößen (ISERMANN & MÜNCHHOF 2010).

4.4.2 Modellierungsräume

In der geometrischen Beschreibung existieren, wie in Abbildung 4-8 dargestellt, mehrere kartesische KOS (Koordinatensysteme), deren Bedeutungen an die jeweilige Anwendung angepasst und im Folgenden kurz erläutert werden:

- *Welt-Koordinatensystem W* – Ein globales W-KOS dient als Referenz und bildet das Hauptkoordinatensystem.
- *Basis-Koordinatensystem B* – Das B-KOS befindet sich in der Regel im Roboterfuß und besitzt die gleiche Orientierung wie die erste Rotationsachse. Im Falle eines stationären Roboters entspricht das Basis-System dem Welt-System.
- *Flansch-Koordinatensystem F* – Das F-KOS ist ein translatorisch und rotatorisch verschobenes Koordinatensystem und befindet sich im Flanschmittelpunkt. Es besitzt die gleiche Orientierung wie das Basis-Koordinatensystem.
- *Tool-Koordinatensystem T* – Das T-KOS oder auch TCP-KOS wird ebenfalls als Werkzeug-Koordinatensystem bezeichnet und liegt im Roboterwerkzeug. Es ist relativ zu diesem immer gleich. Die Lage und Orientie-

ung werden als relative translatorische Verschiebung und rotatorische Verdrehungen zum F-KOS definiert.

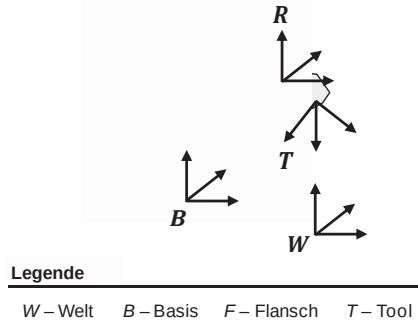


Abbildung 4-8: Kartesische Koordinatensysteme beim Industrieroboter

Die Roboterpose kann durch den Einsatz zweier Darstellungsverfahren beschrieben werden (HAUN 2007). Die Darstellung der Lage eines starren Körpers im Raum erfolgt durch die Beschreibung mittels sechs Freiheitsgraden. Im Falle eines Vertikalknickarmroboters bedeutet dies, dass ebenfalls sechs Beschreibungsparameter zum Einsatz kommen.

- *Kartesische Darstellung* – Die Roboterpose wird in kartesischen Koordinaten durch die Position x, y, z sowie die Orientierung α, β, γ dargestellt.

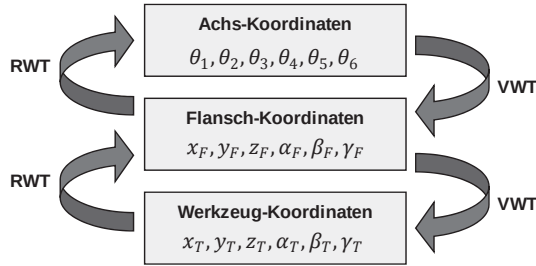
$$X = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T \quad (4-1)$$

- *Achsspezifische Darstellung* – Die Roboterpose wird in den Gelenkkordinaten durch die Achswinkel θ_n angegeben, wobei n die Anzahl der seriell angeordneten Robotergetriebe darstellt.

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T \quad (4-2)$$

4.4.3 Koordinatentransformation

Mittels homogener Transformationsmatrizen, die sowohl eine translatorische als auch rotatorische Verschiebung beinhalten, können Koordinatensysteme ineinander überführt werden (vgl. Abbildung 4-9).



Legende

VWT – Vorwärtstransformation RWT – Rückwärtstransformation

Abbildung 4-9: Zusammenhang zwischen den verwendeten KOS (in Anlehnung an CRAIG 2004)

Zur Ermittlung der Roboterpose im Raum anhand der vorliegenden Gelenkstellungen kann die homogene Transformationsmatrix verwendet werden (CRAIG 2004, DENAVIT & HARTENBERG 1955).

$${}^{i-1}_iT = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

$\theta_i, \alpha_i, a_i, d_i$ Denavit-Hartenberg-Parameter

i Zählvariable für die Gelenke

${}^{i-1}_iT$ Transformation des Gelenks $i - 1$ in das Gelenk i

Diese besteht aus einem rotatorischen und einem translatorischen Anteil zur Überführung von einem Gelenkkoordinatensystem zum Nächsten. Ein mechanisches Gelenk mitsamt seiner Randbedingungen zum benachbarten Gelenk wird durch die drei konstanten Parameter α_i, a_i, d_i sowie den variablen Achswinkel θ_i beschrieben. Im Fall eines n -achsigen Manipulators bedarf es der Vorwärtstransformation (VWT) (vgl. Formel 4-4), d. h. der korrekten Kombination der n Transformationsmatrizen in der notwendigen Reihenfolge zur Gesamttransformation (CRAIG 2004).

$${}^0_nT = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}_iT \quad (4-4)$$

Zur Ermittlung der n Gelenkwerte für die Erreichung eines definierten kartesischen Raumpunkts wird die Rückwärtstransformation (RWT) verwendet. Diese wird ebenfalls als inverse Kinematik bezeichnet. Somit kann mittels einer bekannten Matrix T die Suche nach den Gelenkwinkeln θ_i erfolgen. Das resultierende Gleichungssystem ist überbestimmt und kann im Falle eines Vertikal-knickarmroboters bis zu 16 Lösungen besitzen (TSAI & MORGAN 1985). Die existierenden realen Lösungen repräsentieren Posen, die durch die Kinematik eingenommen werden können, wohingegen die imaginären Lösungen Posen repräsentieren, die außerhalb des Arbeitsraums liegen (TEKOUO 2012).

Die Nichtlinearität ermöglicht keine direkte Lösung des Systems, sodass eine geschlossene Lösung oder eine numerisch-iterative Lösungsstrategie gewählt werden muss. Aus Zeitgründen ist eine geschlossene Lösung vorzuziehen, um den Rechen- und Verarbeitungsaufwand zu minimieren (CRAIG 2004). Durch eine geschlossene Lösung, wie z. B. durch den Einsatz der Pseudo-Inversen Jakobimatrix (SICILIANO & KHATIB 2008), wird eine Entkopplung der rotatorischen von den translatorischen Freiheitsgraden realisiert.

4.4.4 Systemtheoretische Betrachtung

Ziel dieses Abschnitts ist die Modellbildung zur Beschreibung der Roboterdynamik. Grundlegend soll der Industrieroboter als mechatronisches System verstanden werden, welches erst durch die Erweiterung mit Sensoren, Aktuatoren oder kombiniert mechatronischen Funktionsmodulen dazu befähigt wird, die Umgebung zu verändern und somit eine programmierte Aufgabe auszuführen. Entsprechend der gewählten Betrachtungsebene erfordert es an dieser Stelle die Unterscheidung zwischen einem mechanischen und einem realen Roboter (LANGE 2003).

- *Mechanischer Roboter* – Der Begriff mechanischer Roboter beschreibt ein Robotersystem ohne interne Regelung. Das bedeutet, dass die Achsantriebe des betrachteten Industrieroboters als offene Regelstrecke ohne Signalarückführung vorliegen, sodass die Ist-Positionen der Antriebe (Ausgangssignale) nicht mit den kommandierten Soll-Positionen (Eingangssignale) übereinstimmen (LUNZE 2006).
- *Realer Roboter* – Ein realer Industrieroboter mit einem Regelungssystem erweitert einen mechanischen Roboter um zwei wesentliche Elemente. Die interne Sensorik gemeinsam mit der Regelungsrückkopplung (Feed-

back) innerhalb der Robotersteuerung ermöglicht die Rückführung der Regelgrößen und hebt das Ziel, Modellierungsunsicherheiten und externe Störungen zu kompensieren (vgl. Abbildung 4-10).

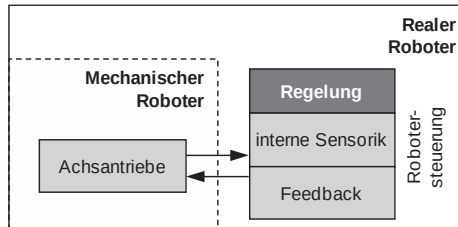


Abbildung 4-10: *Roboterarten aus systemtheoretischer Sicht (in Anlehnung an LANGE 2003, LUNZE 2006)*

Zur Modellidentifikation können parametrische und nicht-parametrische Methoden eingesetzt werden (ISERMANN & MÜNCHHOF 2010). Der Einsatz von Standardkomponenten und die Nutzung von Positionsschnittstellen des Industrieroboters ermöglichen einen aufwandsarmen Modellierungsansatz, sodass auf eine exakte und aufwendige mathematische Beschreibung der eingesetzten Roboterkomponenten über Mehrkörpersysteme verzichtet werden kann. Dies beschleunigt die Modellierungsaufgabe. Anstelle des mechanischen Roboters dient ein vorgeregelter realer Roboter ohne Momentenschnittstelle als zu identifizierende Strecke. Damit werden nur die Robotereingangs- und -ausgangssignale betrachtet (vgl. Abbildung 4-11). Dieses generische Verfahren hat zwar bei hochdynamischen Anwendungen eine begrenzte Genauigkeit, ermöglicht aber eine hinreichend exakte und zudem einfache Zugänglichkeit zu Positionsgrößen, die bereits intern eine Positionsregelung durchlaufen haben und somit als ideal angenommen werden können. Folglich kann auf eine detaillierte Betrachtung von Trägheits-, Euler- und Coriolis-, Gravitations-, Reibungs- sowie Antriebskräften, welche in der Regel verborgen sind, verzichtet werden (REINHART & ZAIDAN 2009).

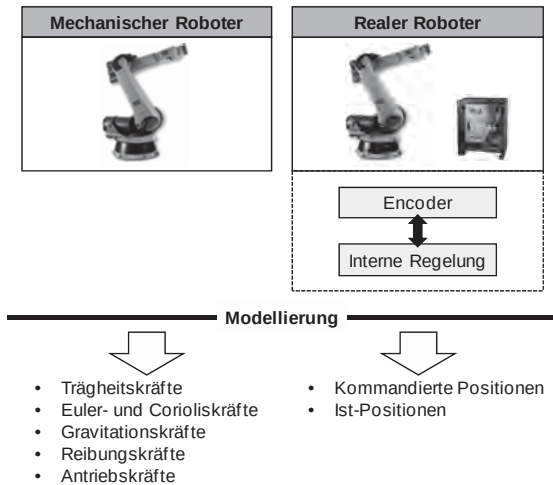


Abbildung 4-11: Modellierungsparameter eines realen Roboters mit integrierter Kaskadenregelung im Vergleich zum mechanischen Roboter

4.4.5 Auswahl Identifikationsverfahren

Ein wesentliches Augenmerk sollte im Rahmen einer Systemidentifikation auf die Wahl einer allgemeingültigen Modellstruktur gelegt werden, jedoch würde eine herstellerübergreifende Modellstruktur unter Berücksichtigung der Mechanik, Elektrik, Sensorik und des integrierten Regelkreises die Modellkomplexität soweit steigern, dass dieses Vorgehen als nicht praktikabel einzustufen wäre.

Theoretisch sind nicht-parametrische Modelle, wie z. B. künstliche neuronale Netze (KNN) oder genetische Algorithmen, für Systeme unbekannter Strukturen sehr gut geeignet (HUY ANH ET AL. 2011, JIANG ET AL. 2006, PATINO ET AL. 2002, VISSER & PEINEMANN 1996). Jedoch besitzen diese Methoden den Nachteil, dass gängige Optimierungsverfahren aufgrund fehlender Strukturinformationen nur bedingt verwendet werden können. Das bedeutet konkret, dass die Optimierung nur durch eine Bereitstellung großer Mengen an Lerndaten möglich und folglich äußerst zeitaufwendig ist (KRUSE 2011, REY & WENDER 2011).

Die Anforderungen an ein Modell lassen sich anhand vier wesentlicher Faktoren differenzieren (WOLLNACK 2009):

- *Vollständigkeit* – Die Beschreibung des realen Systemverhaltens erfüllt die für den Zielprozess erforderliche Genauigkeit.
- *Stetigkeit* – Geringfügige Änderungen der Modellparameter sowie der Eingangsgrößen bewirken nur eine kleine Änderung der betrachteten Ausgangsgröße.
- *Minimalität* – Das Systemmodell beinhaltet eine minimale Anzahl an Modellparametern und schließt insbesondere Linearkombinationen zwischen den Parametern aus.
- *Parameterunempfindlichkeit* – Geringfügige Änderungen der Eingangs- und Ausgangsgrößen bewirken nur eine kleine Änderung der Modellparameter.

Es wird eine experimentelle Systemidentifikation angestrebt, welche das Robotersystem als Black-Box betrachtet. Das hat zur Folge, dass kein exaktes Wissen über die internen Zustände zur Verfügung steht. Dies kann gleichermaßen von Vorteil sein, wenn Komponenten eingesetzt werden, deren struktureller interner Aufbau unbekannt und das System sehr komplex ist.

Zur weiteren Vereinfachung soll die Modellbildung priorisiert für SISO-Systeme (Single-Input-Single-Output) erfolgen. Durch die Betrachtung des Roboters im achsspezifischen Raum (generalisierten Koordinaten) kann dies realisiert werden. Demnach sind bei einem seriellen n -achsigen Manipulator n unabhängige Freiheitsgrade und folglich n SISO-Systeme zu identifizieren, im Vergleich zu einem komplexeren intern gekoppelten MIMO-System (Multiple-Inter-Multiple-Output) gleicher Ordnung.

ISERMANN & MÜNCHHOF (2010) definieren für eine Systemidentifikation acht Schritte, die sukzessive durchlaufen werden:

1. *Definition des Anwendungszwecks* – Innerhalb des ersten Schritts erfolgt die Anforderungsspezifikation für das zu identifizierende Modell sowie die Wahl des Modelltyps (White-/Black-/Grey-Box-Modell).
2. *Aufstellung der a-priori Kenntnisse* – Der zweite Schritt betrachtet vorhandenes Systemwissen. Gegebenenfalls sind Kenntnisse über Totzeit, Linearität oder auch Zeitvarianz vorhanden.

3. *Planung der Messungen* – Die Planungsphase fokussiert die Auswahl von Testsignalen, Abtast- und Messzeiten. Gleichermaßen erfolgt in diesem Schritt die Festlegung einer Online- bzw. Offline-Verarbeitung.
4. *Durchführung der Messungen* – Nach Messdurchführung erfolgt die erste visuelle Inspektion sowie Bereinigung der Messdaten von Ausreißern und Messfehlern.
5. *Preprocessing* – Die Berechnung von Ableitungen sowie Vorverarbeitung von Daten, wie z. B. Signalkalibrierung und Drifteliminierung werden im Schritt Preprocessing zusammengefasst.
6. *Auswertung der Messungen* – Im sechsten Schritt erfolgt die Ermittlung der Systemordnung sowie der Modellparameter.
7. *Verifikation* – Durch einen Vergleich zwischen realen und modellbasierten Ausgangssignalen kann das Modell im siebten Schritt verifiziert werden.
8. *Iteration* – Das Ergebnis kann durch mehrfache Iteration der Schritte 4 bis 7 verbessert werden.

Einschlägige Arbeiten, wie die Werke von ISERMANN & MÜNCHHOF (2010) und LJUNG (2009), geben einen breiten Überblick über vorhandene Identifikationsmethoden. Mögliche Störungen und Messungenauigkeiten am Industrieroboter müssen berücksichtigt werden, um eine gute mathematische Beschreibung des Systemverhaltens basierend auf kommandierten und erreichten Achspositionen zu erhalten. Hierfür eignen sich Parameterschätzverfahren, iterative Optimierungsverfahren und Subspace Methoden.

Die Forderungen nach einem allgemeingültigen Vorgehen und einem durchgängigen schnellen Identifikationsverfahren für den gesamten Roboterarbeitsraum schließen zeitintensive Offline-Verfahren und iterative Optimierungen aus. Die Qualität des Identifikationsergebnisses bei der Black-Box-Modellierung ist signifikant abhängig von der Wahl der Eingangssignale.

Der Dirac-Impuls ist prinzipiell gut geeignet, um die Impulsantwort eines Systems zu erhalten und auf die Gewichtsfunktion zu schließen, jedoch lassen sich die theoretischen Annahmen und Überlegungen praktisch nicht umsetzen. Subspace Methoden hingegen bieten die Möglichkeit, Modelle des Übertragungsverhaltens mit beliebiger Systemanregung zu erstellen (EBERT 2012) und erfordern nicht die Vorgabe von Startwerten für die Modellparameter (DITTMAR & PFEIFFER 2009). Darüber hinaus verleiht die Kombination aus linearer Algebra

und linearer Regression dem Verfahren die geforderte Schnelligkeit und Stabilität (DITTMAR & PFEIFFER 2009) und wird daher im Folgenden ausgewählt und weiter betrachtet.

4.4.6 Systemidentifikation

4.4.6.1 Subspace Verfahren

Ein vereinfachter linearisierter Streckenansatz ist in vielen Fällen hinreichend genau (LJUNG 2009). Basierend darauf kann jede Roboterachse – und damit jeder Roboterfreiheitsgrad – mittels eines allgemeinen diskreten Zustandsraummodells abgebildet werden, wobei die Zustände $x_{Rob,k}$ im Allgemeinen physikalisch nicht immer eindeutig interpretierbar sind (LUNZE 2010, WIEDERHOLD 2011).

$$\begin{aligned} x_{Rob_i,k+1} &= A_{Rob_i} x_{Rob_i,k} + B_{Rob_i} u_{Rob_i,k} + w_{Rob_i,k} \\ y_{Rob_i,k} &= C_{Rob_i} x_{Rob_i,k} + D_{Rob_i} u_{Rob_i,k} + v_{Rob_i,k} \end{aligned} \quad (4-5)$$

$x_{Rob,k}$	Zustandsvektor
A_{Rob}	Roboter Systemmatrix
B_{Rob}	Roboter Eingangsmatrix
C_{Rob}	Roboter Ausgangsmatrix
D_{Rob}	Roboter Durchgangsmatrix
u_{Rob}	Roboter Eingänge (kommandierte Sollpositionen als Achswinkel)
y_{Rob}	Roboter Ausgänge (Ist-Positionen als Achswinkel)
w_{Rob}	Roboter Systemrauschen
v_{Rob}	Roboter Messrauschen
k	Zeitpunkt
i	Roboterachsindex

Die Messsignale $y_{Rob,k}$ werden von einem System- bzw. Prozessrauschen $v_{Rob,k}$ sowie einem Messrauschen $w_{Rob,k}$ überlagert. Idealerweise handelt es sich um einen weißen und somit mittelwertfreien und stationär stochastischen Rauschprozess, sodass sich der Erwartungswert zu

$$E \left\{ \begin{pmatrix} w_{Rob,k} \\ v_{Rob,k} \end{pmatrix} \right\} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4-6)$$

ergibt und die stochastischen Signale nicht miteinander korreliert sind.

Als unbekannte Parameter müssen für alle Achsen (= Systemfreiheitsgrade) die Matrizen A_{Rob} , B_{Rob} , C_{Rob} und D_{Rob} bestimmt werden, die das Übertragungsverhalten zwischen gemessenen Systemeingängen u_{Rob} und den Systemausgängen y_{Rob} modellieren. Hierfür eignet sich bei N Messpunkten der Einsatz eines Regressionsmodells mit einem geschätzten Zustandsvektor $\hat{x}_{Rob,k}$ für die Systemparameter basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate (KATAYAMA 2005).

$$\begin{pmatrix} A_{Rob_i} & B_{Rob_i} \\ C_{Rob_i} & D_{Rob_i} \end{pmatrix} = \left(\sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} \hat{x}_{Rob_i,k+1} \\ y_{Rob_i,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{Rob_i,k}^T & u_{Rob_i,k}^T \end{bmatrix} \right) \left(\sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} \hat{x}_{Rob_i,k} \\ u_{Rob_i,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{Rob_i,k}^T & u_{Rob_i,k}^T \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (4-7)$$

Zusammenfassend ergeben sich nach EBERT (2012) sowie DITTMAR & PFEIFFER (2009) folgende Teilschritte für die Subspace Identifikation:

1. Eingangs- und Ausgangswerte des Systems in eine Block-Hankelmatrix überführen,
2. LQ-Zerlegung der Block-Hankelmatrix mittels numerischer QR-Zerlegung,
3. Singulärwertzerlegung zur Bestimmung der erweiterten Beobachtbarkeitsmatrix bzw. Zustandsvektoren durch Projektion und
4. Bestimmung der Zustandsmodellparameter A_{Rob} , B_{Rob} , C_{Rob} und D_{Rob} durch lineare Regression.

Eine ausführliche mathematische Darstellung des Ansatzes enthält OVERSCHEE & MOOR (1996).

4.4.6.2 Signalwahl und Bewertung

Für eine quantitative Bewertung bei N Messwerten bietet sich der quadratische Mittelwert RMS (Root Mean Square) mit den modellierten und realen Ausgängen $\hat{y}_{Rob,k}$ bzw. $y_{Rob,k}$ an.

$$RMS_{Rob_i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (\hat{y}_{Rob_i,k} - y_{Rob_i,k})^2} \quad (4-8)$$

Darauf basierend führt LJUNG (2009) einen Modellgütewert MG ein, der zusätzlich den Mittelwert $\bar{y}_{Rob,k}$ der gemessenen Ausgangswerte berücksichtigt und somit ebenfalls den Gesamtverlauf betrachtet.

$$MG_{Rob_i} = 100 \% \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (y_{Rob_i,k} - \hat{y}_{Rob_i,k})^2}}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (y_{Rob_i,k} - \bar{y}_{Rob_i,k})^2}} \right) \quad (4-9)$$

Für die Identifikation können, wie eingangs erwähnt, beliebige Bewegungen auf die einzelnen Roboterachsen aufgebracht werden, die nicht zwangsläufig die typischen Grundsignaltypen, wie z. B. Sprung oder Rampe, beinhalten müssen. Es ist dennoch sinnvoll, genügend variierende Bewegungen im Signal für die Modellierung zu besitzen, um eine hinreichende Systemordnung zu erhalten.

Aus Abbildung 4-12 ist ersichtlich, dass das Subspace Verfahren am Beispiel eines verwendeten Vertikalknickarmroboters die sechs Roboterachsen für unterschiedliche Betrachtungsbereiche hinreichend genau approximieren kann.

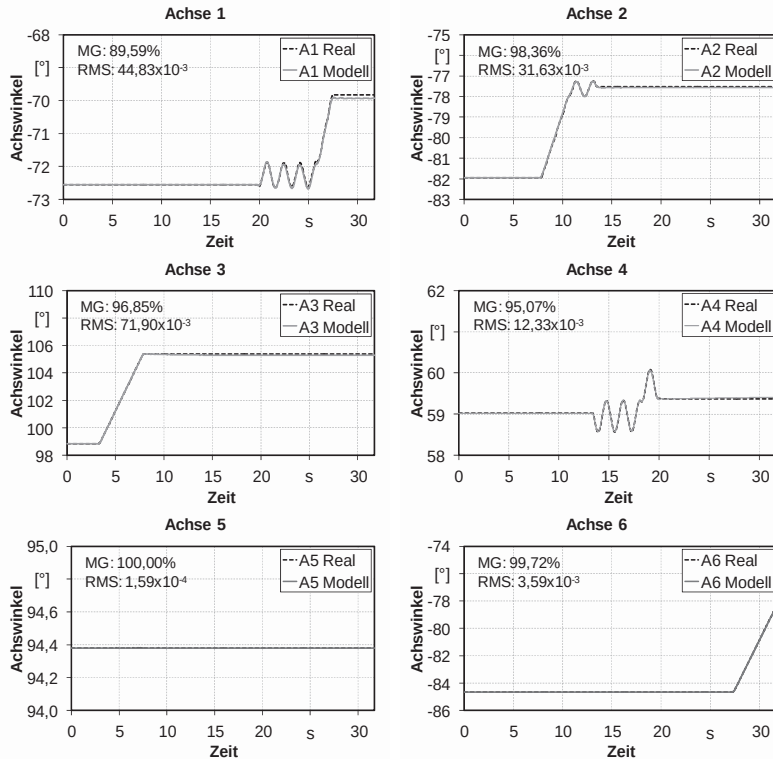


Abbildung 4-12: Exemplarisch modellierte Roboterachsen 1 bis 6 mit MG- und RMS-Gütebewertung

4.4.6.3 Online-Verfahren

Da die Identifikation der Roboterachsen nur für einen begrenzten Betrachtungsbereich zutrifft, ist anzunehmen, dass diese nicht allgemeingültig auf den kompletten Arbeitsbereich übertragbar ist. Die Notwendigkeit ein gültiges Modell für den gesamten Roboterarbeitsraum vorliegen zu haben, bedingt den Einsatz einer Identifikationsstrategie im laufenden Betrieb. Diese ermöglicht es, Veränderungen im Robotersystemverhalten durch unterschiedliche Gelenk- und Handstellungen abzubilden. So lässt sich neben einem Flexibilitätsvorteil ebenso ein zeitlicher Vorteil feststellen, der mit dem Einsatz einer Online-Identifikation einhergeht. Es gilt zu berücksichtigen, dass infolge der Systemlaufzeit, die Datenkom-

plexität linear zunimmt und die Identifikationszeitdauer analog ansteigt. Daher ist es notwendig, die Datenmenge zu begrenzen und an die situationsspezifische Bewegung anzupassen.

Ein geeignetes Mittel hierfür bieten Zeitfenster, mit denen innerhalb eines festgelegten Zeitraums – mit einem Daten-Batch – die Identifikation für alle Systemfreiheitsgrade durchgeführt werden kann (vgl. Abbildung 4-13). Dies ermöglicht eine laufende Modellaktualisierung, mit der anfängliche Modellierungsfehler eliminiert und direkte Folgefehler vermieden werden können (vgl. Abbildung 4-14).

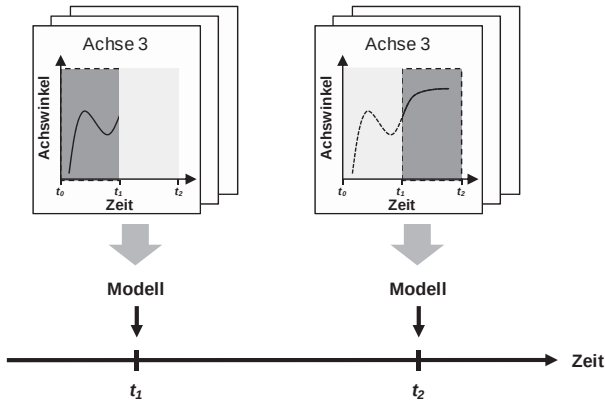


Abbildung 4-13: Prinzip der Online-Identifikation mittels definierten Zeitfenstern am Beispiel von Achse 3

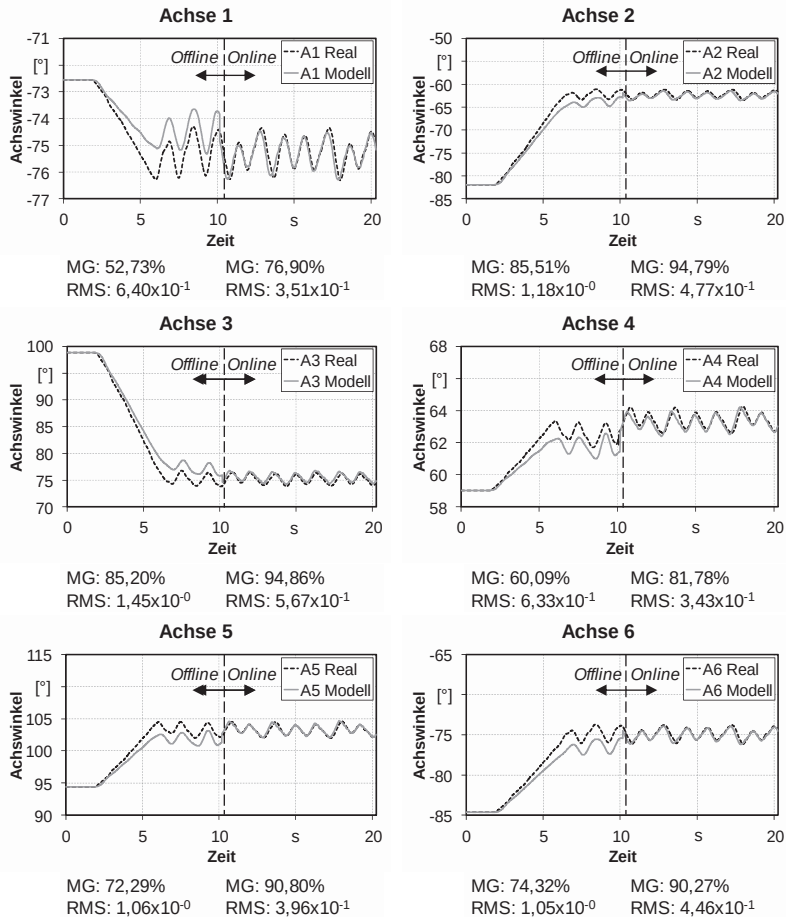


Abbildung 4-14: Exemplarischer Vergleich zwischen Online- und Offline-Identifikation mit Zeitfenstern für die Roboterachsen 1 bis 6; zunächst wird ein Offline-Modell verwendet und im Anschluss wird die Online-Funktion mit diskreten Zeitfenstern zugeschaltet.

4.4.7 Prädiktion

Die im Vorfeld angenommene und im Rahmen der Systemidentifikation bestätigte Systemlinearität der Achsen bei einem realen Roboter ermöglicht den Einsatz

eines linearen Schätzverfahrens. Der Kalman-Filter erfüllt die hierfür formulierten Prämissen hinsichtlich Störgrößenrobustheit sowie internen Systemungenauigkeiten (JULIER & UHLMANN 1997) und bietet aufgrund der simplen Implementierung einen sinnvollen Lösungsansatz. Für eine ausführliche Beschreibung sei an dieser Stelle auf KALMAN (1960) verwiesen. Die Aufgabe des Schätzers ist es hierbei den Schätzfehler

$$e_{Rob_i,k} = y_{Rob_i,k} - C_{Rob_i} \hat{x}_{Rob_i,k} \quad (4-10)$$

mit der realen Roboter Ausgangsgröße $y_{Rob,k}$ und dem rekursiv geschätzten Zustandsvektor $\hat{x}_{Rob,k}$ des Roboters zu minimieren.

Der diskrete Kalman-Filter nach GREWAL & ANDREWS (1993) wird für einen Freiheitsgrad wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{Rob_i,k+1} &= A_{Rob_i} \hat{x}_{Rob_i,k} + B_{Rob_i} u_{Rob_i,k} + L_{Rob_i} (y_{Rob_i,k} - \hat{y}_{Rob_i,k}) \\ \hat{y}_{Rob_i,k} &= C_{Rob_i} \hat{x}_{Rob_i,k} \end{aligned} \quad (4-11)$$

Hierbei entspricht L_{Rob} dem Verstärkungsfaktor des Kalman-Filters und wird durch

$$L_{Rob_i} = P_{Rob_i} C_{Rob_i}^T R_{Rob_i}^{-1} \quad (4-12)$$

- P_{Rob} Kovarianzmatrix des Schätzfehlers
- C_{Rob} Ausgangsmatrix
- R_{Rob} Kovarianzmatrix des Messrauschens
- i Roboterachsindex

definiert.

In diesem Zusammenhang kann die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers P_{Rob} mittels der Ricatti-Gleichung und der Kovarianzmatrix des Systemrauschens R_{Rob} bestimmt werden (ADAMY 2007B).

Die achsspezifischen Prädiktionen (vgl. Abbildung 4-15) lassen sich durch die Verwendung der homogenen Transformationsmatrizen T miteinander verknüpfen und in den kartesischen Arbeitsraum überführen. Dies hat den Vorteil, dass neben dem TCP die Robotergelenkpunkte gleichermaßen präzisiert und verwendet werden können.

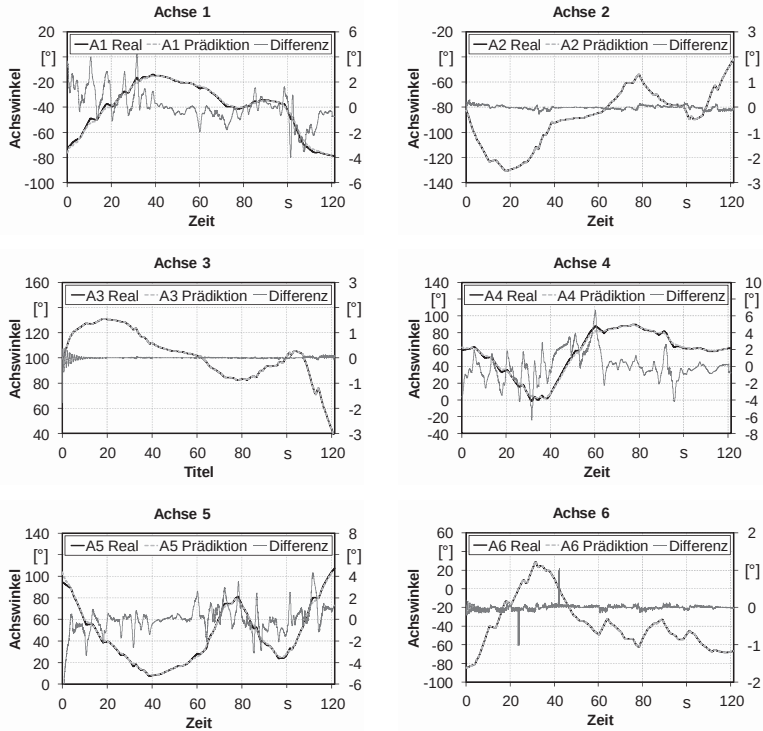


Abbildung 4-15: Exemplarischer Vergleich zwischen realen und prädierten Achswerten für die Roboterachsen 1 bis 6.

4.5 Arbeitsraumüberwachung und -synchronisation

4.5.1 Allgemeines

Ziel dieses Abschnitts ist die synchronisierte Arbeitsraumüberwachung zur Detektion von unbekannten Umgebungsobjekten für eine kollisionsfreie automatisierte Montage in der Fließmontage. Neben der Positionserkennung des Werkers im gemeinsamen Arbeitsraum wird darüber hinaus der Aspekt der Ablaufflexibilität betrachtet, indem beobachtete Tätigkeiten des Werkers innerhalb der Szene erkannt und für die Roboterbahnplanung verwendet werden können. Ein Über-

blick über die Arbeitsraumüberwachung und die im Zusammenhang stehende Synchronisation kann der Abbildung 4-16 entnommen werden.



Abbildung 4-16: Mehrstufiges Vorgehen für die Arbeitsraumüberwachung und Koordination innerhalb des gemeinsamen Arbeitsraums

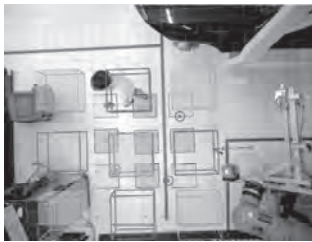
Für die Ausführung einer Arbeitsraumüberwachung sind entsprechend folgende Schritte zu durchlaufen:

- *Positionserkennung* – Innerhalb dieses Moduls wird die relative Position des Werkers im Bezug auf den Roboter-TCP detektiert.
- *Ablaufmodellierung* – Mit einer Mensch-Roboter-Koexistenz geht die Anforderung einer koordinierten Aufgabenerfüllung zwischen Roboter und Mensch einher. Innerhalb dieses Moduls wird ein Konzept zur Identifikation menschlicher Aktivitäten vorgestellt.
- *Kamerasynchronisation* – Aufgrund der vorhandenen interferierenden Bewegungen von Montagehauptkörper, Roboter und Werker ist eine statische Betrachtung der Arbeitsraumteilung infolge möglicher Verdeckungen ungeeignet. Daher wird in diesem Modul hinsichtlich der in Abschnitt 3.3 gestellten Anforderungen eine Lösung für eine adaptive Synchronisation des zu überwachenden Arbeitsraums vorgestellt.

4.5.2 Positionserkennung

4.5.2.1 Konkretisierung der Aufgabe

Wie bereits erwähnt, erscheint eine berührungslose Arbeitsraumüberwachung für eine Koexistenz am geeignetsten zu sein. Die eingesetzten optischen Verfahren basieren auf der Erkennung von Objekten innerhalb eines definierten Überwachungsraums. Über eine Disparitätsauswertung lassen sich somit auch geschlossene dreidimensionale Räume spezifizieren, bei der mittels einer Grauwertanalyse auf unbekannte Objekte geschlossen wird. Es findet folglich keine Objektidentifikation statt, sodass nicht zwischen einem Menschen oder einem Fremdobjekt unterschieden wird (vgl. Abbildung 4-17).



(a)

1	2	3
4	5	6
7	8	9

(b)

Abbildung 4-17: Konfigurierte Raumanordnungen;
(a) Detektion eines Menschen im Arbeitsraum
(b) Matrixnummerierung

Zur Festlegung der relevanten Objektgröße sowie erforderlichen Auflösungen können anthropometrische Daten, wie in JÜRGENS ET AL. (1998) zusammengefasst, herangezogen werden. Für die Integration in das definierte Statechart-Modell bedarf es der Abgrenzung von Zuständen sowie Übergängen. Einen einfachen Zugang hierzu bietet der Einsatz diskreter Überwachungsbereiche und soll exemplarisch erläutert werden.

4.5.2.2 Modellierung

Eine teil aufgelöste Matrixanordnung im gemeinsamen Arbeitsraum ermöglicht eine separate Objektdetektion und zugleich eine Arbeitsraumsegmentierung sowie eine sequenzielle Verkettung der Überwachungsbereiche zur Abdeckung

des gesamten Arbeitsbereichs. Das bedeutet, dass mit n unabhängigen Datenkanälen und m unabhängigen Überwachungsbereichen eine Auflösung von $n * m$ realisierbar ist, die eine Position P_{Werker} eindeutig beschreibt. Das führt bei hohen Auflösungen zu einer steigenden Verarbeitungskomplexität, sodass ein ereignisbasiertes Konzept vorgeschlagen wird.

Bei der Definition der Überwachungsbereiche sind sowohl die Form als auch die Dimensionen (Breite, Länge und Höhe) zu spezifizieren. Diese sind so zu wählen, dass ein Objekt an zwei verschiedenen Positionen erkannt werden kann. Deswegen soll zwischen den Bereichen genügend Abstand existieren, sodass ein eindeutiger Austritt aus einem Bereich vor dem Eintritt in den Nachbarbereich erforderlich ist. Der Einsatz eines Petri-Netzes (PN), basierend auf den in Abbildung 4-18 beschriebenen Analogien, ermöglicht die Abbildung dieser Logik und die Integration in das Statechart-Modell des Roboters.

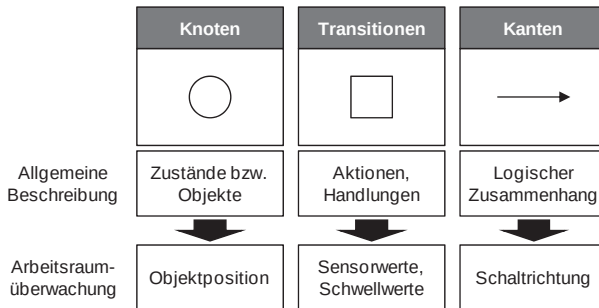


Abbildung 4-18: Komponenten der Petri-Netze in Anlehnung und Anwendung für die Positionserkennung

4.5.3 Ablaufmodellierung

4.5.3.1 Konkretisierung der Aufgabe

Innerhalb einer Arbeitsraumteilung ist die Sicherheit des Werkers durch einen entsprechenden Maßnahmeinsatz gewährleistet, jedoch ist der Kontext der Kooperationssituation unbekannt. Das bedeutet, dass der Roboter permanent in eine Reaktionshaltung gezwungen wird, welche sicherheitstechnisch notwendig ist, jedoch aus Sicht der Prozesseffizienz Optimierungspotenzial beinhaltet. Eine Koordination der Tätigkeiten von Werker und Roboter würde demzufolge eine verbesserte Ablaufsynchronisation beider Tätigkeiten ermöglichen. Durch die

4 Konzeption und Systementwurf

Vermeidung konkurrierender Zugriffe auf gleiche Objekte wird zum einen das Gefährdungsrisiko reduziert und zum anderen die Systemeffizienz, durch die störungsfreie Ausführung geplanter Tätigkeiten beider Kooperationspartner, erhöht.

Der Mitarbeiter ist im Sinne eines actio-reactio-Prinzips in das Montagesystem eingebunden und soll sich im Prozessablauf auf seine Tätigkeiten konzentrieren und idealerweise nicht vom Roboter abgelenkt werden. Daher muss folglich die Koordination der Aufgabe vom Roboter übernommen werden. Wie in Abbildung 4-19 abgebildet, ist eine konventionelle Betrachtung auf Aktion-Perzeption-Ebene aufgrund des fehlenden Kontexts sowie der fehlenden Prozessinformationen hierfür nicht ausreichend. Eine alternative Erweiterung auf die Aufgaben-Ziel-Ebene zeigt, dass die für eine effiziente Koordination erforderlichen Informationen, wie z. B. Ziele, Aufgaben oder Tätigkeiten, sensorisch nicht beobachtbar sind und dadurch die Koordination innerhalb der Aufgabendurchführung nicht möglich ist (SHEN ET AL. 2015).

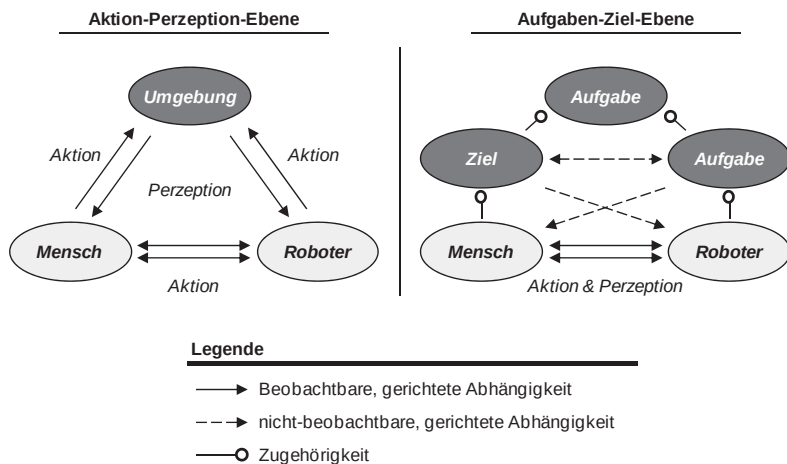


Abbildung 4-19: Unterschiedliche Betrachtungsebenen einer Mensch-Roboter-Koordination (SHEN ET AL. 2015)

Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit anhand sensorisch erfassbarer Daten auf formelle abstrakte Informationen Rückschlüsse zu ziehen, um Zugang zu darunterliegenden Plan-Informationen, wie Prozessdauer, Vorgänger- oder Nachfolgerprozessschritt, zu erhalten.

4.5.3.2 Umgebungscharakteristik und Anforderungen

Zur Analyse der Voraussetzungen bedarf es einer Typisierung der Umgebung. Die Abbildung eines Roboters als Agenten, der die Umgebung wahrnimmt und diese durch Aktuatoren beeinflusst, betrachtet die vier Ebenen (HEIDEMANN 2008, MONOSTORI ET AL. 2006, RUSSELL & NORVIG 2003):

- Sensoren,
- Aktuatoren,
- Umwelt und
- Aufgabenerfüllung.

Eine besondere Relevanz beinhaltet in diesem Kontext die Umwelt, da diese nach RUSSELL & NORVIG (2003) die Verbindung zwischen der Wahrnehmung (Sensoren) und den Aktionen (Aktuatoren) darstellt. Hieraus leiten sich die in Tabelle 4-1 dargestellten Anforderungen ab.

Tabelle 4-1: Typisierung von Umgebungen (in Anlehnung an HEIDEMANN 2008)

Umgebungscharakteristik		Ausprägungen und Beschreibung	
1	Beobachtbarkeitsgrad der Umgebung	Vollständig beobachtbar	Teilweise beobachtbar
2	Determiniertheit	<i>Deterministisch</i> - Zukünftiger Zustand hängt allein vom gegenwärtigen Zustand und durchgeführten Aktionen ab.	<i>Stochastisch</i> - Umgebung enthält Zufallselemente und ist selbst bei vollständiger Beobachtung nicht vorhersehbar.
3	Episodisch / Sequenziell	<i>Episodisch</i> - Aktionen beeinflussen die Umgebung nur für die nächste Episode, nicht aber für zukünftige Episoden.	<i>Sequenziell</i> - Die Aktionen beeinflussen die Zukunft, d.h. der Agent muss vorausdenken.
4	Statisch / Dynamisch	<i>Statisch</i> - Die Umgebung verändert sich nur durch Aktionen des Agenten.	<i>Dynamisch</i> - Die Umgebung verändert sich auch unabhängig von den Aktionen.
5	Diskret / Kontinuierlich	zeitliche Abhängigkeit der Wahrnehmungen sowie der Aktionen	
6	Einzelagent / Multiagent	<i>Einzelagent</i> - Ein einzelner Agent ist mit der Problemlösung beschäftigt.	<i>Multiagent</i> - Mehrere Agenten sind mit der Problemlösung beschäftigt und agieren miteinander (kooperativ oder konkurrierend).

Am Beispiel einer Mensch-Roboter-Koexistenz ist die menschliche Handlung aus Robotersicht zwar durch formelle Prozessbeschreibungen vorgegeben, je-

doch nicht vollständig beobachtbar. Gleichmaßen unterliegt das System einer stochastischen Verteilung sowie einer kausalen Logik der Einzelaktionen, sodass es sich um ein sequenzielles System handelt. Die Wechselwirkungen zwischen Mensch und Roboter spiegeln die Dynamik des Multiagentensystems wider, auf die mittels der Roboterantriebe innerhalb diskreter Steuerungsarchitekturen ein-gewirkt werden kann. Dies führt zur Schlussfolgerung, eine Mensch-Roboter-Koexistenz als Multiagentensystem zu betrachten und damit einhergehend zur Forderung, dass das entsprechende Vorgehen für diese systemische Betrachtung zulässig ist.

Aus Robotersicht kann, basierend auf der abgeleiteten Umweltcharakteristik, die Annahme getroffen werden, dass ein Mensch im gemeinsamen Arbeitsraum einen quasi-autonomen Roboter darstellt. Auf Basis dieser Überlegung lässt sich folglich ein adaptierter Methodeneinsatz umsetzen, sodass der Einsatz von Vor-gehensmodellen aus dem Bereich des maschinellen Lernens legitim erscheint, um die Charakteristiken des menschlichen Handelns zu erfassen.

4.5.3.3 Auswahl Modellierungsmethode

Nachdem im vorherigen Abschnitt die entscheidungsrelevanten Kriterien einge-führt wurden, erfolgt darauf basierend die Vorstellung und Bewertung existie-render Verfahren sowie die Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise.

- *Fuzzy-Logik* – Die Fuzzy-Logik verfeinert die diskrete Boolesche Logik durch Integration umgangssprachlicher Beschreibungen auf Basis un-scharfer Mengen (ADAMY 2007A) und ermöglicht somit die Beschreibung von Unsicherheiten. Die hohe Anzahl an zu definierenden Regeln sowie die systemnahe anwendungsspezifische Auslegung limitieren die Anwen-dung auf einfache Systeme (AKERKAR & SAJJU 2010).
- *Künstliche neuronale Netze* – Ein KNN ist eine Black-Box-Approx-i-mation eines funktionalen Zusammenhangs ohne Kenntnis der inneren Struktur (OBERHOFER & ZIMMERER 1996). Neben einer guten selbststän-digen Lernfähigkeit und der Möglichkeit komplexe Zusammenhänge zu generalisieren (WERNER 2004) gibt es Einschränkungen in der Transpa-renz hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit sowie der Analysierbarkeit (SRIHARI & SU 2011).
- *Markov Ketten* – Markov Ketten stellen eine Methode zur Abbildung sto-chastischer Systeme dar, bei der ein Folgezustand anhand des aktuellen

Zustands geschätzt wird (BRÉMAUD 2008). Der einfache Zugang mittels der Matrixform ist bei komplexen Systemen gleichzeitig ein Nachteil, da die Analysierbarkeit abnimmt und der Anpassungs- sowie Änderungsaufwand steigt (GRINSTEAD & SNELL 1998).

- *Hidden Markov Modell* – Ein HMM (Hidden Markov Modell) ist ein stochastisches Modell, das einen endlichen Automaten beschreibt (BLUNSON 2004). Das Differenzierungsmerkmal gegenüber Markov Ketten beruht auf der Eigenschaft, dass die Zustände nicht direkt beobachtbar sind (FINK 2003). Stattdessen sind die zustandsbedingten emittierten Beobachtungen von außen beobachtbar und werden folglich für das Training verwendet.
- *Kalman Filter* – Der Kalman Filter dient zur Schätzung interner Zustände auf Basis einer a-priori bekannten mathematischen Beschreibungsstruktur. Dieses Schätzverfahren hat den Vorteil mit verrauschten Signalen umgehen zu können, um vergangene oder auch zukünftige Zustandsinformationen zu schätzen (WELCH & BISHOP 2006).
- *Petri-Netze* – Die Modellierung mittels Petri-Netzen erfolgt mittels definierten Elementen. Die breite theoretische Basis bietet viele Möglichkeiten zur Analyse, simulativen Abbildung sowie Visualisierung von Prozessen.

Anhand der eingangs erwähnten Arbeiten, zusammen mit den Erkenntnissen von ALBERTOS ET AL. (2000), EBERSPÄCHER (1999), HUQ ET AL. (2006), MANNINI & SABATINI (2010) sowie SZCZERBICKA (2012), lässt sich die in Tabelle 4-2 dargestellte qualitative Bewertung gemäß der in Tabelle 4-1 spezifizierten Umgebungscharakteristik ableiten. Hieraus ergibt sich, dass sowohl HMM als auch PN den Anforderungen am besten gerecht werden und zwischen beiden Verfahren kein signifikanter Unterschied festzustellen ist.

Grundsätzlich muss folgende Eigenschaft gelten, um manuelle Prozesse modellieren zu können: die Übergangswahrscheinlichkeiten für Zustandswechsel hängen nur vom Ausgangs- und Zielzustand ab, nicht aber von den Vorgängern. Diese Eigenschaft wird auch als Markov Eigenschaft bzw. Markov-Kette erster Ordnung bezeichnet (KNAB 2000). Für eine genauere Betrachtung werden im Folgenden zusätzliche Kriterien eingeführt, um eine differenziertere Auswahl zu ermöglichen:

- Genauigkeit,

4 Konzeption und Systementwurf

- Schnelligkeit,
- Handhabbarkeit und
- Trainierbarkeit.

Tabelle 4-2: Qualitative Bewertung von Lernverfahren

	Fuzzy Logik	Neuronale Netze	Markov Ketten	Kalman-Filter	Hidden Markov	Petri-Netze
Teilweise beobachtbar	●	●	●	●	●	●
Stochastisch	○	◐	◐	○	●	●
Sequenziell	○	●	●	●	●	●
Dynamisch	●	●	●	●	●	●
Diskret	●	●	●	●	●	●
Multiagent	◐	●	○	○	●	●

Legende

● voll erfüllt ◐ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

Tabelle 4-3 zeigt die zusammengefasste qualitative Gegenüberstellung zwischen HMM und PN basierend auf den Arbeiten von SALIMIFARD & WRIGHT (2001), TURAGA ET AL. (2008) sowie ZHANG & NAGHDY (2006). Aufgrund der Balance aus mittlerer Genauigkeit, hoher Geschwindigkeit und guter Trainierbarkeit wird im Rahmen der weiteren Betrachtung das Hidden Markov Modell verwendet.

Tabelle 4-3: Qualitative Gegenüberstellung von HMM und PN mittels der erweiterten Kriterien

	HMM	PN
Genauigkeit	◐	◐
Geschwindigkeit	●	◐
Handhabbarkeit	◐	○
Trainierbarkeit	◐	◐

Legende

● voll erfüllt ◐ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

4.5.3.4 Vorgehen

Die vorhandenen Beobachtungen der Umgebung beschränken sich auf das Kamerabild und die Position des Montagehauptkörpers. Nicht beobachtbar hingegen ist die Tätigkeit des Menschen. Dies stellt die verdeckte Schicht des HMM dar. Daher wird nachfolgend ein Modell, basierend auf den drei in Abbildung 4-20 dargestellten Ansätzen, entwickelt, mit dem anhand kamerabasierter Beobachtungen des Werkers auf dessen mögliche Tätigkeiten geschlossen werden kann.

Für eine detaillierte Darstellung der Funktionsweise sei an dieser Stelle auf KNAB (2000) und RABINER (1989) verwiesen.

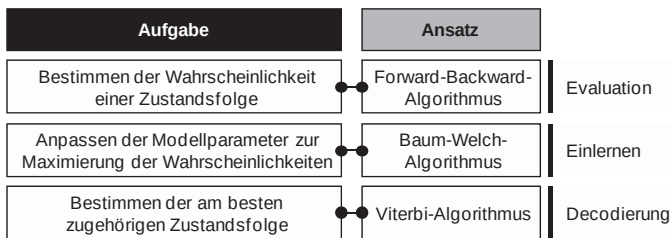


Abbildung 4-20: Zusammenhang zwischen den Teilaufgaben und den Lösungsansätzen (in Anlehnung an RABINER 1989)

In Korrespondenz zu den dargestellten Ansätzen schlägt RABINER (1989) ein Vorgehensmodell bestehend aus drei Lösungsansätzen vor:

- Forward-Backward-Algorithmus,
- Baum-Welch-Algorithmus und
- Viterbi-Algorithmus.

Die möglichen Tätigkeiten ergeben sich aus der Position des Montagehauptkörpers und der Werkerbewegung bzw. -position. Dies setzt die Bedingung voraus, dass die Tätigkeiten anhand prozeduraler Beschreibung a-priori definiert und bekannt sind. So kann durch die Auswertung unterschiedlicher Beobachtungsfolgen unterschieden werden, welche Tätigkeiten der Werker durchführt, oder ob es sich um einen ungeplanten Eintritt in die Montagezelle handelt.

Es werden ausreichend viele Beobachtungsfolgen kreiert, sodass die Modelle im Ausführungsmodul die Tätigkeiten des Werkers mit einer bestimmten Genauigkeit vorhersagen können (vgl. Abbildung 4-21). Praktisch wird dies durch eine

Erstellung von Beobachtungssequenzen für jede vorher definierte Tätigkeit realisiert. Diese dienen anschließend als Grundlage für ein überwachtes Training der Modelle. Im Ausführungsmodul erfolgt die Zuordnung des trainierten Tätigkeitsmodells in Abhängigkeit der vorliegenden Eingangsdaten.

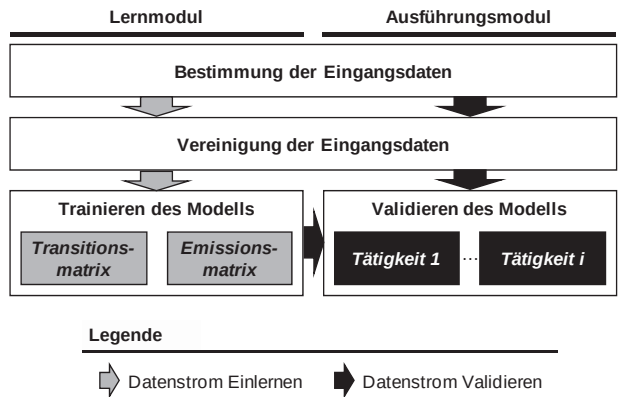


Abbildung 4-21: Vorgehen bei der Ablaufmodellierung zur Erkennung menschlicher Tätigkeiten (SHEN ET AL. 2015)

4.5.3.5 Modellkonzept

Für die Ablaufmodellierung gilt es die Eingangsdaten festzulegen. Im Rahmen der Tätigkeitenidentifikation innerhalb einer Mensch-Roboter-Koexistenz sollen die Tätigkeiten direkt mit dem Ausführungsort, der relativen Position zum Montagehauptkörper sowie der geplanten Prozessdauer assoziiert werden (vgl. Tabelle 4-4 und Abbildung 3-2).

Tabelle 4-4: Übersicht möglicher Tätigkeiten

	Tätigkeitsbeschreibung	Position des Montagehauptkörpers	Dauer
A	keine Störung	beliebig	beliebig
B	kurze, frühe Tätigkeit	früh, mittel	<10 s
C	kurze, späte Tätigkeit	mittel, spät	<10 s
D	lange, frühe Tätigkeit	mittel, spät	>15 s
E	lange, späte Tätigkeit	früh, mittel	>15 s
F	Bewegung im Arbeitsraum	beliebig	beliebig
G	Verharren im Arbeitsraum	beliebig	beliebig

Es lassen sich drei Eingabedaten unterscheiden:

- *Position des Werkers* – Die Werkerposition wird mit dem im Abschnitt 4.5.2.2 spezifizierten Unterteilungsbereich erfasst.
- *Bewegung des Werkers* – Die Erfassung der Werkerbewegung erfolgt über die zyklische, logische Überprüfung der Werkerposition und einer sequenziellen Vorher-Nachher-Betrachtung.
- *Position des Montagehauptkörpers* – Die erfasste Bewegung des Montagehauptkörpers wird als Zeit-Äquivalent angesehen und die assoziierte Montagesequenzlänge wird in fünf gleich große Segmente (Eintritt, frühe Phase, mittlere Phase, späte Phase, Austritt) unterteilt, um eine differenziertere Betrachtung der unterschiedlichen Tätigkeiten zu ermöglichen.

Abbildung 4-22 zeigt einen schematischen Ablauf von der Auswertung der Sensorsignale bis zur Klassifikation der Tätigkeiten. Aus der Anzahl an Einflussgrößen ergibt sich daraus die Gesamtmenge an theoretisch beobachtbaren Zuständen. Somit liegt je nach Bewegungsablauf des Werkers, kombiniert mit der Position des Montagehauptkörpers, eine variierende Beobachtungsfolge vor, mit der rückwirkend auf die durchgeführte Tätigkeit geschlossen werden kann.

Die Kategorisierung dient zur Einordnung und Überführung der Beobachtungszustände S_o in eine Beobachtungssequenz O_T mit zugehöriger Beobachtungslänge T . Hieraus ergeben sich n Hidden Markov Modelle

$$\lambda_n = (A_{HMM,n}, B_{HMM,n}, \pi_{HMM,n}) \quad (4-13)$$

λ	Hidden Markov Modell
A_{HMM}	Transitionsmatrix mit Übergangswahrscheinlichkeiten
B_{HMM}	Emissionsmatrix mit Ausgabewahrscheinlichkeiten
π_{HMM}	Startwahrscheinlichkeit des Prozesses

Diese können durch Beobachtungssequenzen trainiert werden (vgl. Abbildung 4-21) und folglich die zu modellierenden Tätigkeiten beschreiben. Im Schritt Maximierung (vgl. Formel 4-14) wird das Modell λ^* gesucht, welches bei einer bestimmten Beobachtungssequenz O die höchste Wahrscheinlichkeit für eine erkannte Tätigkeit wiedergibt.

$$u^* = \arg \max P(O|\lambda_n) \quad (4-14)$$

mit $1 \leq u^* \leq n$

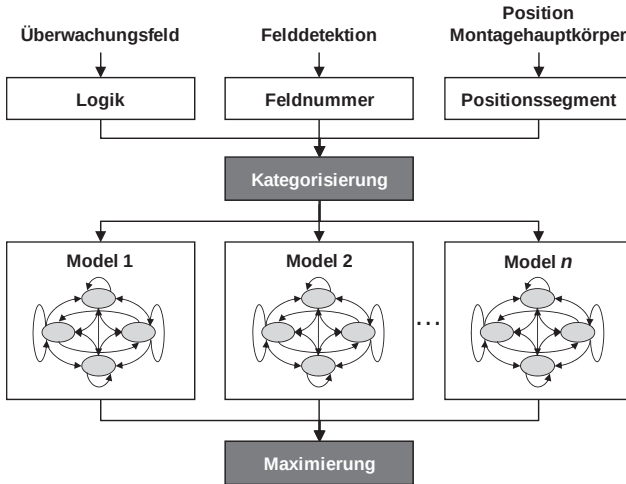


Abbildung 4-22: Schematischer Ablauf des Trainings (SHEN ET AL. 2015)

4.5.3.6 Trainingsphase

Für das Training der Modelle sind Initialschätzungen der Modellparameter A_{HMM} , B_{HMM} , π_{HMM} erforderlich (RABINER 1989). Unter der Annahme, dass keine Störung im Initialzustand auftreten darf, kann auf eine Prozessinitialisierung demzufolge verzichtet werden.

Der Trainingsablauf besteht aus einer Anzahl an Beobachtungssequenzen für alle zu modellierenden Tätigkeiten (vgl. Tabelle 4-4 und Abbildung 4-23). Diese werden nacheinander trainiert. Hierbei ist darauf zu achten, dass eine Trainingssequenz eine Streuung von unterschiedlichen Ein- und Austrittsfeldern beinhaltet, um eine natürliche Varianz innerhalb der Bewegung zur Tätigkeit abbilden zu können. Abbildung 4-23 zeigt in der Sequenz (a)-(c) exemplarisch den Eintritt einer Person in die Szene zur Durchführung einer Tätigkeit und in der Sequenz (d)-(f) den Austritt. Das Training wird in vier Bereiche mit jeweils zehn Trainingssequenzen aufgeteilt. Somit liegen vier trainierte Modelle pro Tätigkeit vor. Die geschätzte Emissionsmatrix B_{HMM} bildet den Ausgang zur Repräsentation

der Tätigkeiten, welche mittels eines Batch-basierten Baum-Welch-Algorithmus iterativ trainiert werden können.

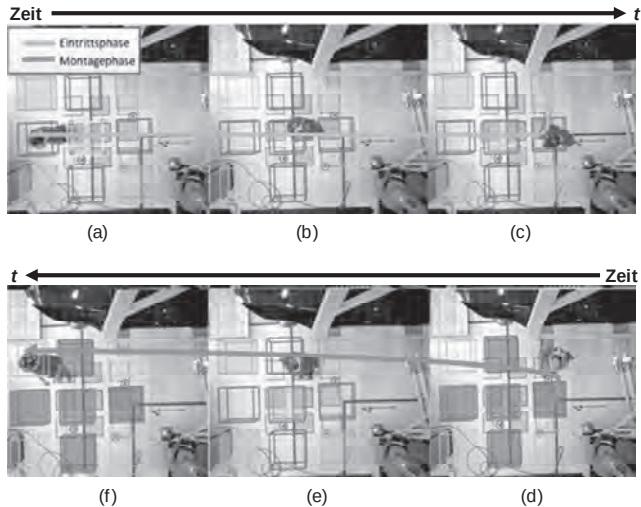


Abbildung 4-23: *Beispiel einer kurzen Tätigkeit;*
(a)-(c) *Eintrittsphase*
(d)-(f) *Austrittsphase*

4.5.3.7 Ausführungsphase

Die Dekodierung beinhaltet die Aufgabe der Wiedererkennung. Ziel ist es zur Laufzeit die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, mit der eine vorliegende Beobachtungsfolge bis zum Beobachtungszustand i für eine Tätigkeit übereinstimmt. Dies geschieht im Ausführungsmodul (vgl. Abbildung 4-21). Eine exemplarische Anwendung soll nachfolgend anhand zweier ausgewählter Tätigkeiten demonstriert werden (vgl. Tabelle 4-4).

Die in Abbildung 4-24 dargestellte lange Tätigkeit wurde bis zum Zeitpunkt A aufgrund einer nicht identifizierbaren Bewegungssequenz nicht korrekt erkannt. Erst durch die lange Verweildauer in Position 3 bis zum Zeitpunkt B konnte die Wahrscheinlichkeit über die Beobachtungsdauer für eine identifizierte Tätigkeit sukzessive gesteigert werden. Ein Abknicken, wie z. B. zum Zeitpunkt C, resultiert aus einer beobachteten verkürzten bzw. längeren Einzelaktion, welche sich mit fortlaufender Beobachtungssequenz wieder anpasst.

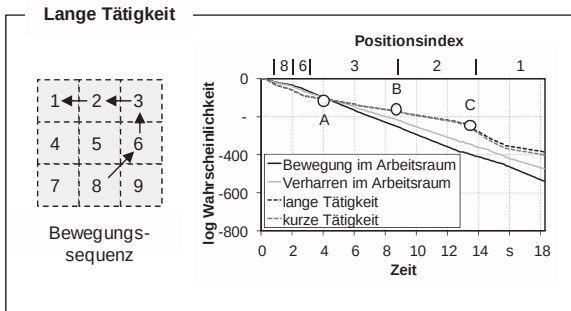


Abbildung 4-24: Exemplarische Bewegungssequenz und Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Tätigkeitsidentifikation am Beispiel einer langen Tätigkeit

Aus Abbildung 4-25 ist zu entnehmen, dass sich bereits am Anfang der Beobachtungssequenz zwei Tendenzen abbilden. Diese entsprechen den beiden zufälligen Tätigkeiten. Dies erscheint logisch, da die relevanten Übergangsfolgen nicht in einer definierten Tätigkeit erfasst und insofern trainiert wurden. Charakteristisch sind allerdings die Zeitpunkte A und B in denen ein ungeplantes Verweilen an Position 3 stattfindet. Diese Verweildauer ist viel kürzer als die Tätigkeitsdauer, sodass keine neue Tätigkeit detektiert wird. So nehmen die Wahrscheinlichkeitsverläufe nach dem Punkt B wieder den vorherigen Verlauf an. Es lässt sich folglich festhalten, dass trotz unvorhergesehener Zwischenaktionen eine Tätigkeit entlang der gesamten Beobachtungsfolge korrekt detektiert werden kann.

Die Tätigkeitenidentifikation dient einer effizienteren kontextbasierten Koordination innerhalb des Koexistenzszenarios. Diese ermöglicht bei korrekter Tätigkeitenidentifikation eine präventive Roboterbahnplanung unter Beachtung der aktuell durchgeführten Tätigkeit und der wahrscheinlich nachfolgenden Tätigkeiten. Sollten jedoch die menschlichen Aktionen nicht mit den vorliegenden Tätigkeitsmodellen übereinstimmen, so wird in diesem kritischen Grenzfall auf die in Abbildung 4-19 dargestellte Aktion-Perzeption-Ebene zurückgegriffen, um eine Kollision im gemeinsamen Arbeitsraum zu vermeiden.

Diese Betrachtung erfordert demnach eine Nachführung des zu betrachtenden kamerabasierten Überwachungsraums, um die im relativen Kamerakoordinatensystem trainierten Tätigkeitsmodelle innerhalb der Fließmontage übertragen zu können und die Identifikation innerhalb des Ausführungsmoduls in ein lokales Problem ohne statische Stützpunkte zu überführen.

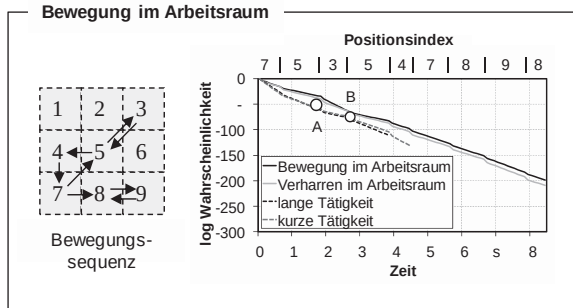


Abbildung 4-25: Exemplarische Bewegungssequenz und Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Tätigkeitsidentifikation am Beispiel einer zufälligen Bewegung

4.5.4 Arbeitsraumsynchronisation

4.5.4.1 Konkretisierung der Aufgabe

Innerhalb eines idealen Systems ohne Latenzzeiten können Ist-Positionen für die Synchronisation zwischen Roboter und Kamerasystem verwendet werden. Jedoch existieren in einem realen System aufgrund von Trägheiten und Rechenlaufzeiten Verzögerungen, die zu berücksichtigen sind. Würde bei jedem Abtastzeitpunkt die vom Roboter übermittelte Ist-Position als Führungsgröße übertragen werden, wäre ein Pfadversatz, vor dem Hintergrund einer unbekannten Synchronisationsstrecke mit veränderlicher Dynamik, gegeben.

Dieser Schleppfehler kann durch Einsatz einer geregelten Trajektorienverfolgung innerhalb einer definierten Grenze gehalten werden. Für die Aufgabe wird folglich eine Regelungsstrategie gesucht, die dynamische Positionsänderungen ausgleicht und somit die Regeldifferenz minimiert. Zusätzlich muss das geregelte System unter Beachtung einer Stellgrößenbegrenzung asymptotisch stabil sein.

Für die formulierten Anforderungen sind statische Regelungsverfahren, wie z. B. PID oder Zustandsrückführung, aufgrund der fehlenden Stellgrößenberücksichtigung als ungeeignet anzusehen. Ein modellgestützter prädiktiver Regler erfüllt die formulierten Anforderungen (CAMACHO & BORDONS 2007, DITTMAR & PFEIFFER 2009). So kann dieser, im Gegensatz zum Riccati-Regler, unter explizi-

ter Berücksichtigung der Stellgröße, diese auf Grundlage eines Gütekriteriums anpassen, um eine Trajektorienverfolgung zu realisieren (ZAMBOU 2005).

4.5.4.2 Modellgestützter prädiktiver Regler

Die Funktionsweise eines modellgestützten prädiktiven Reglers (MPC – Model Predictive Control) basiert auf einer iterativen Optimierung innerhalb eines zukünftigen Zeitfensters (CAMACHO & BORDONS 2007). Abbildung 4-26 zeigt das Funktionsprinzip eines MPC. Hierbei dient das Systemmodell zur stellgrößenabhängigen Prognose des zukünftigen Systemverhaltens innerhalb des Prädiktionshorizonts mit N_p Abtastschritten. Innerhalb des Stellhorizonts mit N_c Abtastschritten und der Bedingung $N_c \leq N_p$ wird eine optimale Stellgrößensequenz mittels einer Gütefunktion für einen gewünschten Verlauf der Regelgröße bestimmt. Nach der Ausführung eines Stellgrößenschritts wiederholt sich der Verlauf und die jeweiligen Horizonte verschieben sich. Für die Anwendung des MPCs innerhalb der Synchronisation ist ein diskretes dynamisches Systemmodell der Kamerastrecke erforderlich (MACIEJOWSKI 2002).

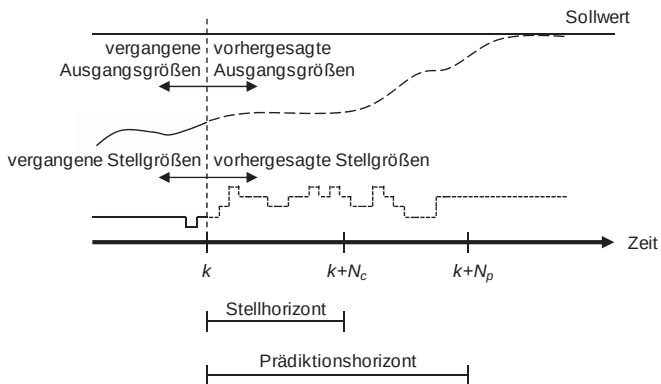


Abbildung 4-26: Funktionsprinzip der modellgestützten prädiktiven Regelung (in Anlehnung an CAMACHO & BORDONS 2007)

4.5.4.3 Kameramodell mittels Systemidentifikation

Im Falle eines konventionellen Antriebs für die Kamerabewegung, bestehend aus Führungsschiene und Motor, kann das Gesamtsystem als Feder-Masse-System betrachtet werden, welches Elastizitäten und die Coulombsche Reibung enthält

(LUTZ & WENDT 2007). Die internen Systemparameter sind unbekannt und müssten theoretisch durch Experimente, wie z. B. eine Frequenzantwort, sukzessive bestimmt werden. Analog zur Robotermodellierung wird auch hier auf eine detaillierte Analyse der Einzelkomponenten verzichtet, mit dem Ziel einen generischen Lösungsansatz aufzuzeigen.

Für die experimentelle Black Box Identifikation wird das bereits eingeführte Subspace Verfahren (vgl. Abschnitt 4.4.6) für ein lineares Zustandsraummodell mit einem Freiheitsgrad verwendet (vgl. Formel 4-5), in welchem der Systemausgang y_c die Ist-Position des Kamerasystems darstellt.

Die Wahl eines geeigneten Systemgrads erfolgt experimentell über einen quantitativen Vergleich anhand eines Testsignalverlaufs und anschließender RMS-Betrachtung. Bei der Wahl des Testsignals ist zu beachten, dass die Stellgrößengrenze nicht erreicht wird, um die Dynamik des Systems nicht verfälscht darzustellen. Aufgrund eines global gültigen Systemverhaltens ist die Verwendung eines Offline-Modells zulässig.

Es ist anzunehmen, dass aufgrund der Systemdynamik ein Modellgrad von mindestens $n = 3$ (inkl. Filter) als sinnvoll erachtet wird, um eine geeignete mathematische Approximation aller Eigenschaften zu erhalten.

Abbildung 4-27 illustriert die exemplarisch identifizierten Modelle mit unterschiedlichen Systemgraden. Es ist ersichtlich, dass die Primäranforderung nach einer genauen Approximation erfüllt ist, sodass als Auswahlkriterium gemäß der vorab formulierten Forderung ein minimaler Systemgrad (vgl. Abschnitt 4.4.5) zum Tragen kommt. Zwar liefert eine Systemordnung von $n = 1$ die höchste Modellgüte, jedoch limitiert diese Modellannahme die Abbildung der zu erwartenden Systemeigenschaften. Die Ordnung $n = 4$ bietet den besten Kompromiss zwischen geringem Systemgrad sowie guter Approximation und wird demnach für nachfolgende Betrachtungen ausgewählt.

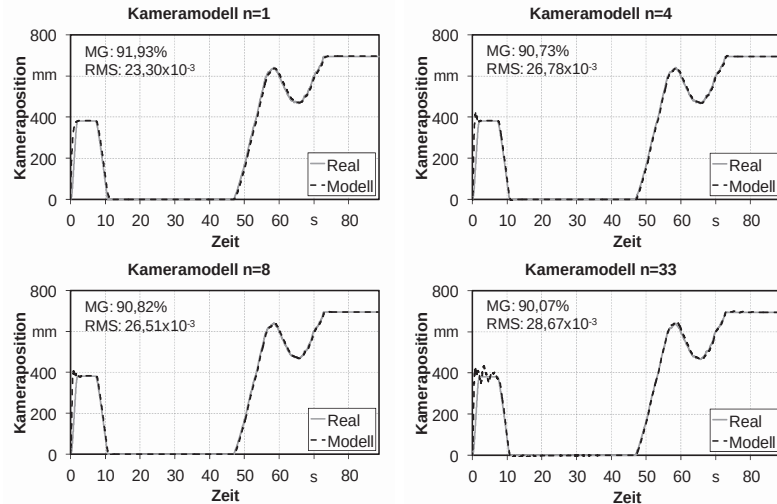


Abbildung 4-27: Auszug aus Systemidentifikationsergebnissen mit unterschiedlichen Systemordnungen und Gütewerten

4.5.4.4 Definition der Führungsgröße

Für die Arbeitsraumüberwachung ist es wichtig, das Roboterwerkzeug über eine Vorwärtskinematik zu berücksichtigen und sowohl das Kamera- als auch das Basis-Koordinatensystem über eine statische Referenzmessung aneinander anzugleichen. Deshalb soll sich im Zentrum des Kamerabilds der TCP des zu verwendenden Endeffektors befinden (vgl. Abbildung 4-28).

Aus dem Schätzvektor der kartesischen Roboterpositionen kann der Gradient in Bewegungsrichtung des Montagehauptkörpers abgeleitet werden. Dieser stellt die Schrittweite der einzelnen Positionen dar, aus welcher der aktivierte Bewegungszustand des Roboters ermittelt werden kann (vgl. Abschnitt 4.7). Jedoch ist die prozedurale Information für die Kamerasynchronisation nicht entscheidend. Viel wichtiger ist der Betrag des Gradienten, der folgende Fälle

- Oszillation,
- Normalfahrt,
- niedrige Beschleunigung oder

- hohe Beschleunigung

spezifiziert.

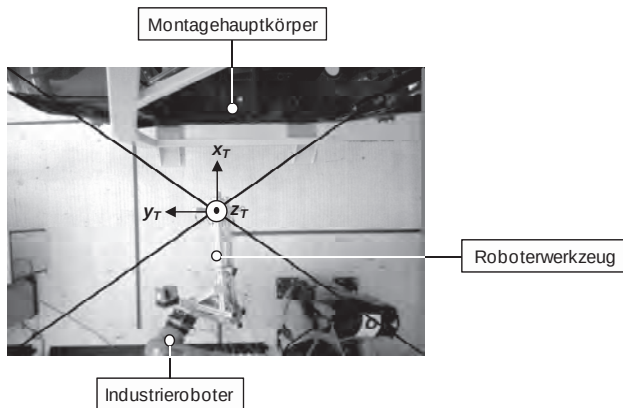


Abbildung 4-28: TCP im Bildmittelpunkt zur visuellen Überprüfung der korrekten Referenz zwischen dem Kamera- und Roboter-Koordinatensystem

4.5.4.5 Regelungsaufgabe

Zunächst müssen vor dem Einsatz eines modellprädiktiven Regelungsverfahrens die systemrelevanten Bedingungen hinsichtlich vollständiger Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit überprüft werden (FÖLLINGER & KONIGORSKI 2013). Ein MPC Einsatz erfordert eine Prädiktion mit der die laufende Optimierung für einen zukünftigen Zeithorizont durchgeführt werden kann. Hier kann, analog zum Roboter, auf den bereits eingeführten linearen Kalman-Filter zurückgegriffen werden. Gemeinsam mit der Grundidee lässt sich somit die optimierte Führungsgrößenregelung mittels folgenden Ausdrucks spezifizieren.

$$\min J(\Delta u, k) = \sum_{j=1}^{N_p} (w_{c,k+j} - \hat{y}_{c,k+j})^2 + g \sum_{j=1}^{N_c} (\Delta u_{c,k+j-1})^2 \quad (4-15)$$

- J Gütefunktion
- Δu_c Stellgrößenänderung Kamera
- w_c Führungsgröße (referenzierte Prädiktion des Roboterausgangs)
- y_c Regelgröße (Ausgang Kamera)
- g Gewichtungsfaktor
- N_p Prädiktionshorizont
- N_c Stellhorizont bzw. Steuerungshorizont
- k Zeitschritt

Konkret handelt es sich um die laufende Minimierung einer Gütefunktion, die die summierte prädizierte Regeldifferenz und die Stellgrößendifferenzensumme betrachtet. So kann durch eine Festlegung von Stellgrößengrenzen das quadratische Gütefunktional optimiert werden (vgl. Abschnitt 4.7.4.8). Für die zyklische Auswertung bieten sich integrierte Solver der verbreiteten Softwarepakete wie MATLAB® sowie LabVIEW® an.

Die Ermittlung der Reglerparameter erfolgt anhand eines konventionellen Vorgehens über eine Variation der Horizonte (MACIEJOWSKI 2002, MAYNE ET AL. 2000). Anhand Abbildung 4-29 wird deutlich, dass eine Synchronisation für ein beliebig dynamisches Geschwindigkeitsprofil ohne Rückkopplung zu einem maximalen Fehler von weniger als 20 mm führt. Da dieser Wert deutlich unter einer normativ geforderten Armauflösung liegt, kann auf eine Erweiterung des MPC durch eine zusätzliche Feedbackschleife sowie eine Vorsteuerung zur Genauigkeitssteigerung verzichtet werden. Durch die Wahl eines größeren Prädiktionshorizonts kann erfahrungsgemäß das Systemverhalten verbessert werden, da das Gütefunktional für einen größeren Zeithorizont ideal einer definierten Führungsgröße folgt (GRÜNE & PANNEK 2011).

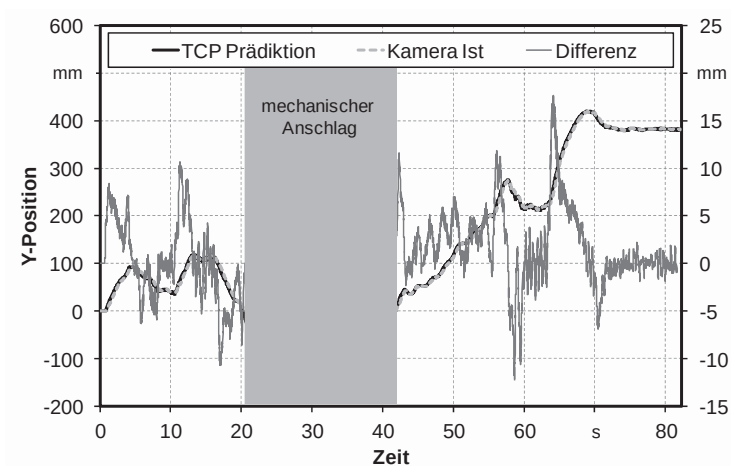


Abbildung 4-29: Modellprädiktive Regelung der Kameraposition zur Synchronisation an den Roboter-TCP

4.5.5 Zwischenfazit

Die Arbeitsraumüberwachung und -synchronisation besteht aus den drei sequenziellen Schritten:

- Positionserkennung,
- Ablaufmodellierung und
- Arbeitsraumsynchronisation.

Innerhalb der Positionserkennung wurde ein Vorgehen für die Arbeitsraumsegmentierung vorgestellt, mit der unbekannte Objekte innerhalb des Arbeitsraums in der Fließmontage detektiert und die Positionsinformation über eine logische Verknüpfung dem Statechart-Modell des Roboters zur Verfügung gestellt werden kann.

Weiterführend dient die vorgestellte Ablaufmodellierung der Identifikation manueller Werkertätigkeiten. Anhand trainierter Bewegungsmuster mittels eines Hidden Markov Modells werden bekannte tätigkeitsbasierte Bewegungssequenzen mit realen Beobachtungssequenzen verglichen und hieraus eine Schätzung der sensorisch erfassten Tätigkeit vorgenommen. Diese Information kann unter

Berücksichtigung eines formellen Montageplans zur prozessorientierten Koordination der Roboterbewegungen weiterverwendet werden.

Der Schritt Arbeitsraumsynchronisation stellt ein Regelungskonzept für einen prädiktiven Regler für eine Synchronisation der Kameraantriebseinheit an die Roboterbewegungen vor. Die Modellierung der Antriebseinheit erfolgt anhand eines linearen Zustandsraummodells auf Basis des Subspace Identifikationsverfahrens. Die Reglerparameter für die Kamerabewegung können über eine Variation des Prädiktions- und Stellhorizonts ausgelegt werden, um eine Synchronisation an beliebige Roboterbewegungen vorzunehmen.

4.6 Umgebungsmodell

4.6.1 Allgemeines

Eine situationsbasierte Roboterreaktion erfordert die Kenntnis über Umgebungsobjekte mitsamt ihren Positionen und Ausrichtungen innerhalb des Arbeitsraums. Im Gegensatz zu durchgängigen Informationsmodellen, basierend auf Industrie 4.0, bei der diese Informationsklassen dezentral vorhanden und verknüpfbar sind (REINHART ET AL. 2013, ZUEHLKE 2010), können laut SUPPA (2008) mittels eines Inside-Out-Verfahrens die realen geometrischen Beziehungen einer Szene unter Verwendung eines robotergeführten Sensors flexibel erstellt, aktualisiert und abgelegt werden. Somit können durch Anreicherung lokaler dezentraler Informationsgehalte die Umgebungsinformationen sukzessive detailliert werden.

Nach SHEN & REINHART (2013B) lassen sich hier zwei Verfahren unterscheiden:

- *Exploration* – Sind keine a-priori Informationen des Arbeitsraums (z. B. CAD-Daten) vorhanden, so ist die Aufgabe der Perzeption, die Umgebungsinformationen mittels Sensorsystemen, wie z. B. Kamera oder Laserscanner, aufzunehmen und zu verarbeiten. Hierbei sind entweder Tiefeninformationen durch das Messprinzip wie in den Arbeiten von (KERN 2003, RUSS 1995) bereits verfügbar oder werden durch die Einführung einer Disparitätsfunktion bestimmt (BACHMANN 2010, SCHARSTEIN & SZELISKI 2002).
- *Mapping* – Sind die CAD-Daten der Umgebungsobjekte vorhanden, so bedarf es einer schnellen Identifikation, gefolgt von einer Referenzierung der Objekte innerhalb der Karte. Somit besteht die Aufgabe in der Mini-

mierung der Abweichungen zwischen realer und virtueller Welt (MARUYAMA ET AL. 2008).

Unter der Annahme, dass CAD-Daten eine Grundlage in der Planungsphase von Produktionssystemen darstellen (JONAS 2000, LINNER 2002), ihre Konsistenz zur realen Welt in der Betriebsphase jedoch Diskrepanzen unterliegt (PATRON 2005), bietet das Mapping Verfahren einen schnelleren sowie flexibleren Zugang zur Umgebungsmodellierung und wird im Folgenden weiter betrachtet. Die Verwendung markerbasierter Systeme wird aufgrund der Bedingung nach einer permanenten Sichtbarkeit der Marker, welche eine signifikante Einschränkung für die industrielle Praxis darstellt, nicht berücksichtigt.

4.6.2 Konkretisierung der Aufgabe

4.6.2.1 Anforderungskriterien

Die Detektion von Umgebungsobjekten erfordert deren messtechnische Erfassung. Hierfür existiert ein breites Band an Messprinzipien, die in berührende und berührungslose Systeme unterteilt werden (GROTE ET AL. 2011). Für die Generierung von Umgebungs-scans bietet sich im Zusammenhang robotergeführter Sensorsysteme der Einsatz berührungsloser, optischer Sensoren an. Neben der Bauform sind folgende Kriterien für die Auswahl zu berücksichtigen:

- *Messbereich* – Zur Durchführung der Messaufgabe in einer wirtschaftlich vertretbaren Zeit ist es notwendig eine hinreichend große Anzahl an Messpunkten in einer minimalen Zeitspanne zu erfassen. Von besonderer Bedeutung ist das Verhältnis zwischen Messbereich und Roboterarbeitsraum, um die Anzahl erforderlicher Scans zu begrenzen.
- *Messauflösung* – Die laterale sowie transversale Auflösung bestimmt neben der Tiefenauflösung die Fähigkeit bis zu drei Freiheitsgrade zu erfassen und gleichermaßen zwischen benachbarten Messwerten zu unterscheiden. Darüber hinaus stellt die Messpunktverteilung einen entscheidenden Faktor dar, da in Abhängigkeit von der gegebenen Anordnung (räumliche, punktuelle, linienhafte Verteilung) zusätzliche Sensorbewegungen zur räumlichen Erfassung notwendig sind.

- *Messgeschwindigkeit* – Die Frequenz mit der ein Sensor misst wird als Messgeschwindigkeit bezeichnet und gibt die Anzahl der Messungen innerhalb eines festen Zeitraums wieder.
- *Berechnungsaufwand* – Der Ressourcenbedarf zur Verarbeitung der Rohsensordaten (z. B. Filter, Signalverarbeitung, etc.) wird als Berechnungsaufwand bezeichnet und charakterisiert eine Messung anhand der erforderlichen Rechenschritte sowie des erforderlichen Speicherbedarfs.
- *Messgenauigkeit* – Eine Minimierung von Messabweichungen vom wahren Messwert führt zu einer erhöhten Messgenauigkeit. Es ist zu erwarten, dass der Gesamtfehler zum einen aus der Varianz der Roboterbahngenauigkeit und zum anderen aus der Sensorungenauigkeit herführt.

4.6.2.2 Auswahl Messverfahren

Aktive Systeme strahlen Energie gezielt auf die zu untersuchende Szene, um durch Sensormessungen aus der Reflektion die Entfernung zu ermitteln (WERTHSCHÜTZKY 2008). Passive Systeme hingegen bestimmen die Daten durch indirektes Rekonstruieren der Szenerie (EL-HAKIM ET AL. 1995). Die benötigte Energie wird entweder vom Objekt selbst abgestrahlt (z. B. Infrarot-Strahlung) oder durch die Umgebung bereitgestellt (z. B. Beleuchtung des Raums). Der Vorteil aktiver optischer Systeme liegt somit in ihrem universellen berührungslosen Einsatz (SANTOCHI & DINI 1998) sowie ihrer Robustheit gegenüber Umgebungseinflüssen. Im Folgenden werden drei Verfahren näher betrachtet:

- *Triangulation* – Die Triangulation verwendet trigonometrische Funktionen zur Entfernungsbestimmung mittels Lichtwellen. Sie bietet die Möglichkeit mehrdimensionale Messungen für unterschiedliche Materialien und einen großen Messbereich durchzuführen.
- *Laufzeitmessung* – Die Laufzeitmessung verknüpft die Messzeit von Lichtimpulsen proportional zur Tiefeninformation und ermöglicht somit die Abdeckung eines großen Messbereichs bei kleinen Messzeiten. Den Vorteilen stehen die vorhandenen Defizite gegenüber, die beim simultanen Einsatz mehrerer Quellen zu Störeinflüssen führen können.
- *Interferometrie* – Bei kleinen Messbereichen und für hochgenaue Messaufgaben bietet sich die Interferometrie an, die durch Auswertung der Phasendifferenz des ausgesendeten und zurückgestrahlten Lichts eine

Auflösung im Nanobereich ermöglicht. Eine hohe Abhängigkeit vom Brechungsindex sowie die Einschränkung, nur relative Wegänderungen messen zu können, stellen die wesentlichen Nachteile dar.

Eine wie in Tabelle 4-5 dargestellte qualitative Bewertung anhand der vorab definierten Bewertungskriterien zeigt, dass sich keine eindeutige Tendenz für ein Messprinzip aufzeigt. Die Laufzeitmessung bietet die entscheidenden Vorteile eines großen Messbereichs und einer hohen Messgeschwindigkeit, sodass die Umgebungsmodellierung durch eine minimale Anzahl an Roboterbewegungen durchgeführt werden kann und im Folgenden weiter betrachtet wird.

Tabelle 4-5: Qualitative Bewertung der Messprinzipien

	Triangulation	Laufzeitmessung	Interferometrie
Messbereich	●	●	○
Messauflösung	●	●	●
Messgeschwindigkeit	●	●	●
Berechnungsaufwand	●	●	●
Messgenauigkeit	●	●	●

Legende

● voll erfüllt ● teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

4.6.3 Mapping

4.6.3.1 Allgemeines

Ziel des Mappings ist es, Korrespondenzen zwischen den Umgebungsmessungen und den a-priori vorhandenen CAD-Daten herzustellen und deren geometrische Randbedingungen an die vorliegende Szene anzupassen (SHEN & REINHART 2013B). Abbildung 4-30 illustriert den Prozessablauf für das Mapping, welches in den folgenden Abschnitten näher beschrieben wird.

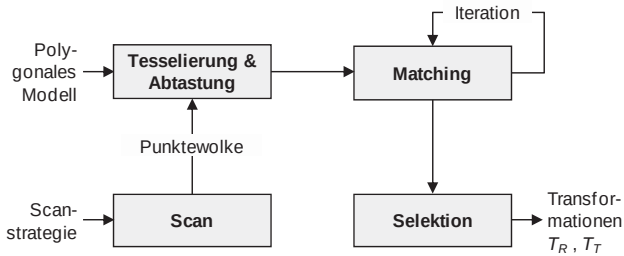


Abbildung 4-30: Prozessablauf für das Mapping

4.6.3.2 Scan

Im ersten Schritt erfolgt der Scan bzw. die sensorische Erfassung der Umgebungsobjekte. Das Ergebnis der Laufzeitmessung besteht aus Punktwolken vorhandener Objekte aus Sicht des Sensorkoordinatensystems. Die Referenzierung mit dem globalen Koordinatensystem zur Identifikation der extrinsischen Sensorparameter kann z. B. mittels einer Hand-Auge-Kalibrierung durchgeführt werden (SALLINEN & HEIKILÄ 2000).

4.6.3.3 Tesselierung & Abtastung

Im anschließenden zweiten Schritt erfolgt die Vorverarbeitung vorhandener CAD-Objekte. Der Einsatz approximierender polygonaler Modelle auf Basis von Dreiecksfacetten bietet eine einfache Verarbeitungsmöglichkeit (LIN & GOTTSCHALK 1998, SPITZWEG 2009). Hier stellt die STL-Schnittstelle (Surface Tessellation Language) einen industriell verbreiteten Standard dar, welcher in gängigen CAD-Systemen integriert ist und durch den sich die Modellerstellung automatisieren lässt. Durch Spezifikation eines relativen Dichtewertes kann eine flächenbezogene Punkteverteilung definiert werden, um innerhalb einer Fläche eine künstliche Punktwolke für den darauf folgenden Matchingvorgang zu erzeugen. Das Ergebnis ist ein virtuelles Punktemodell.

4.6.3.4 Matching

Die Identifikation von Punktekorrespondenzen aus Objekt- und Messdaten ermöglicht im darauffolgenden Schritt beide Datensätze mittels Transformationsmatrizen ineinander zu überführen. Hierbei werden an das Verfahren folgende qualitative Anforderungen gestellt:

- *Robustheit gegenüber Dichteschwankungen* – Die Messpunktverteilung ist parameterabhängig, wie z. B. Messabstand oder Verfahrensgeschwindigkeit des Sensors, und kann daher variierende Punktedichten aufweisen. Das Matching soll daher möglichst unabhängig von lokal unterschiedlichen Punktedichten arbeiten und eine Erkennung gewährleisten.
- *Robustheit gegenüber Messungenauigkeiten* – Messungen sind grundsätzlich fehlerbehaftet. Zwar ist durch den Einsatz eines Filters der Einfluss des stochastischen Anteils zu reduzieren, jedoch geht damit oftmals auch ein Informationsverlust einher. Um dieses zu vermeiden, wird daher gefordert, dass das Verfahren fehlerbehaftete Messwerte verarbeiten kann.
- *Teilflächenkompatibilität* – Da eine Rundummessung aus allen Sichtwinkeln nicht umsetzbar ist, muss davon ausgegangen werden, dass immer nur Teilflächen des Objekts sichtbar sind und folglich erkannt werden können. Daraus resultiert die Forderung, dass das Verfahren in der Lage sein muss, mit einer hinreichend großen Teilfläche die Bestimmung einer korrekten Objektposition und -orientierung zu gewährleisten.
- *Universalität* – Das Verfahren soll in der Lage sein, beliebige Objekte ähnlicher Größe zu erkennen. Daraus folgt, dass ein Gütemaß zur Repräsentation der Erkennung erforderlich ist und somit eine anschließende Bewertung oder einen Vergleich zulässt.

Eine Klassifikation sowie einen bewerteten Überblick an Matchingverfahren geben SALVI ET AL. (2007) und WANG & SONG (2009). Das ICP Verfahren (Iterative Closest Points) eignet sich in diesem Zusammenhang insbesondere für die Verarbeitung von Punktwolken (SALVI ET AL. 2007). Durch nächste Nachbarsuche und Transformation werden zwei Punktwolken (p_i, q_i) schrittweise aneinander angenähert, um die Übereinstimmung sukzessive zu verbessern (vgl. Abbildung 4-31). Es wird ein Minimum der quadratischen Funktion

$$\varepsilon(T_R, T_T) = \sum_i (T_R p_i + T_T - q_i)^2 \quad (4-16)$$

T_R Rotationsmatrix
 T_T Translationsmatrix
 q_i, p_i Punktwolken

gesucht. Zur Bestimmung der Einzeltransformationen nach jedem Iterationsschritt wird eine euklidische Punkt-zu-Punkt Minimierung mit Singulärwert-

zerlegung verwendet (KJER & WILM 2010). Die nächste Nachbarsuche erfolgt mittels Überführung in einen k-d-Baum (KJER & WILM 2010, BENTLEY 1975). Für eine detaillierte Darstellung der formalen Optimierungslösung sei auf HORN (1987) verwiesen.

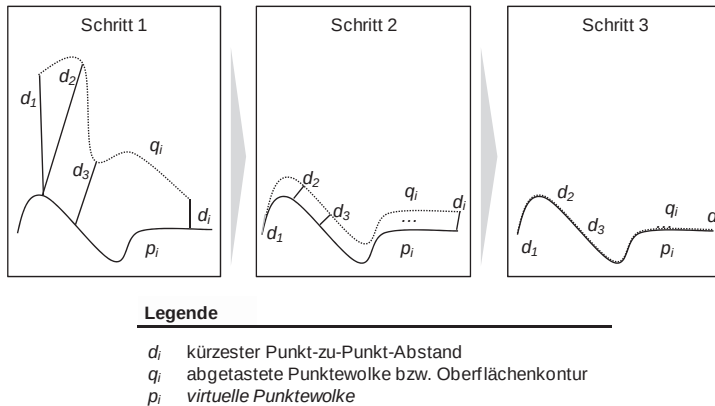


Abbildung 4-31: Schematischer Ablauf des ICP Verfahrens;
die Kontur q_i schmiegt sich durch iterative Distanz-
minimierung sukzessive an die Grundkontur p_i an

Bei gleichen Punktwolken konvergiert die Summe der Abstände im Verlauf der Iterationen gegen Null. Als Vorteile sind das schnelle Konvergenzverhalten (BESL & MCKAY 1992) sowie die Robustheit gegenüber Messfehlern und Ausreißern zu nennen (RUSINKIEWICZ & LEVOY 2001). Demgegenüber steht der Nachteil einer lokalen Optimierung (RUSINKIEWICZ & LEVOY 2001), sodass die geforderte Teilflächenkompatibilität nicht gegeben ist.

4.6.3.5 Iteration

Zur Kompensation des fehlenden globalen Konvergenzverhaltens aufgrund des begrenzten Sensorsichtfelds, bietet sich die Einführung variabler Ausgangspositionen an. Hierfür soll die Annahme gelten, dass sich die Umgebungsobjekte in einer ebenen Gleichgewichtsposition befinden und somit nur einen Drehfreiheitsgrad um die z-Achse besitzen. Das virtuell abgetastete Punktemodell wird in mehreren Erkennungsschritten erst verschoben und danach um eine festgelegte

Schrittweite verdreht. Diese Kombination aus Vor-Translation sowie Vor-Rotation wird als Vor-Transformation bezeichnet.

- *Vor-Rotation* – Die Verdrehung wird bei mehreren Durchläufen nacheinander um die z-Achse erhöht, sodass das Anschmiegen des Messbereichs an das virtuelle Punktemodell aus mehreren Ausgangspositionen durchgeführt wird.
- *Vor-Translation* – Die Vortranslation verschiebt das virtuelle Punktemodell, sodass die Optimierung aus Richtung des Lasers erfolgt. Hierzu wird der Punktwolkschwerpunkt zwischen Laserstartpunkt sowie Schwerpunkt des Punktemodells translatorisch verschoben.

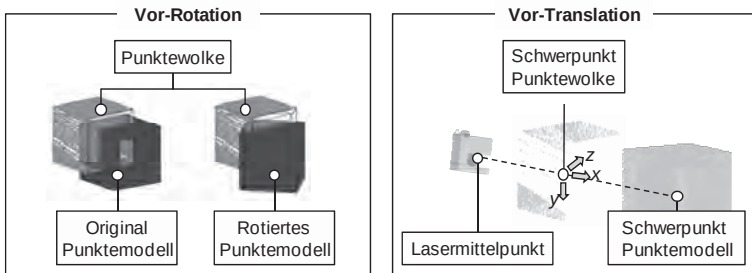


Abbildung 4-32: Schematische Darstellung einer Vor-Transformation bestehend aus Vor-Rotation und Vor-Translation

Nach jedem Iterationsschritt wird die neue Anordnung als Ausgangssituation für das Matching mit dem ICP Verfahren verwendet.

4.6.3.6 Selektion

Der Algorithmus wird in mehreren Iterationsschritten mit dem Ziel durchlaufen, die Punktwolke des Messbereichs mit dem virtuellen Punktemodell anzupassen. Die Definition eines Schwellwerts als Referenz limitiert die Iterationsanzahl und spezifiziert das Auswahlkriterium. Die ICP-Transformationsparameter werden gemeinsam mit den Parametern der Vor-Transformation für die Ermittlung der Matrizen T_R und T_T des Objekts verwendet.

4.6.4 Simplifizierung

Abhängig von der Objektkomplexität und -größe ist es empfehlenswert, Umgebungsobjekte für die weitere Verwendung zu vereinfachen (SPITZWEG 2009). Dies bedeutet, dass die Netzkomplexität reduziert wird, um den Rechenaufwand gering zu halten. Der Simplifizierungsprozess berücksichtigt die spezifischen Eigenschaften der Ursprungsnetze (z. B. geometrischer Abstand, Aussehen etc.) und versucht diese priorisiert beizubehalten (MICHIGAN TECH 2010). Im Folgenden werden die drei konsekutiven Schritte

- Arbeitsraumsegmentierung
- Netzvereinfachung
- Sichtbarkeit

kurz erläutert.

4.6.4.1 Arbeitsraumsegmentierung

Die Arbeitsraumbegrenzung des Industrieroboters oder des Prozesses begrenzt die Dimension der zu modellierenden Umgebungsobjekte, sodass durch Schnittvereinfachung der Arbeitsraum segmentiert wird (vgl. Abbildung 4-33).

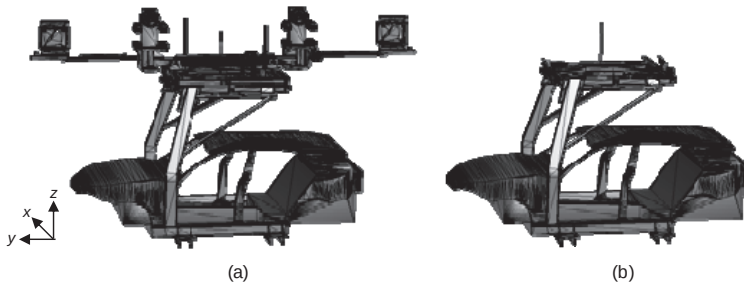


Abbildung 4-33: Karosseriemodell aus tesselierten Dreiecksfacetten;
(a) Originalmodell,
(b) nach der Arbeitsraumsegmentierung entlang der z-Achse
mittels einer xy-Schnittebene

4.6.4.2 Netzvereinfachung

Die wesentlichen Anforderungen für eine Netzvereinfachung sind:

- *Effizienz* – Der Algorithmus soll in der Lage sein, komplexe Modelle schnell zu vereinfachen.
- *Qualität* – Die Annäherungen des Algorithmus sollen hohe Wiedergabetreue zum originalen Modell behalten.

In diesem Kontext bietet die etablierte Methode der Kantenkontraktion (GARLAND & HECKBERT 1997) einen effizienten Weg. Dabei werden, wie in Abbildung 4-34 gezeigt, zwei anliegende Knoten durch Kanteneliminierung zu einem neuen Knoten zusammengefasst, um die Dreiecksfacettenzahl iterativ zu reduzieren.

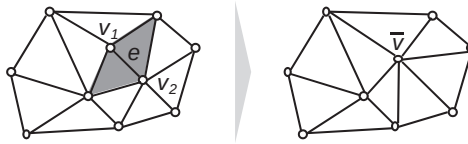


Abbildung 4-34: Kantenkontraktion durch Eliminierung der Kante „e“ und Zusammenführung der Knoten v_1 und v_2 zu $\bar{v}$ (in Anlehnung an KEßLER 2008)

Hierbei wird die eulersche Beziehung eines konvexen Polyeders

$$v - e + f = 2 \quad (4-17)$$

- v Anzahl Ecken
 e Anzahl Kanten
 f Anzahl Flächen

nicht verändert, sodass die Netztopologie durch die Retriangulation erhalten bleibt (FLOATER 2002). Abbildung 4-35 illustriert, dass Modelle mit zunehmender Vereinfachung größere Verzerrungen aufweisen. Hierbei definiert der Vereinfachungsfaktor n_{red} die Relation zwischen der Facettenanzahl des simplifizierten Objekts und der ursprünglichen Dreiecksanzahl. Erfahrungsgemäß können Vereinfachungsfaktoren zwischen 0,2 bis 0,1 verwendet werden, sodass eine Reduktion der Facettenanzahl von über 80 % erzielt werden kann.

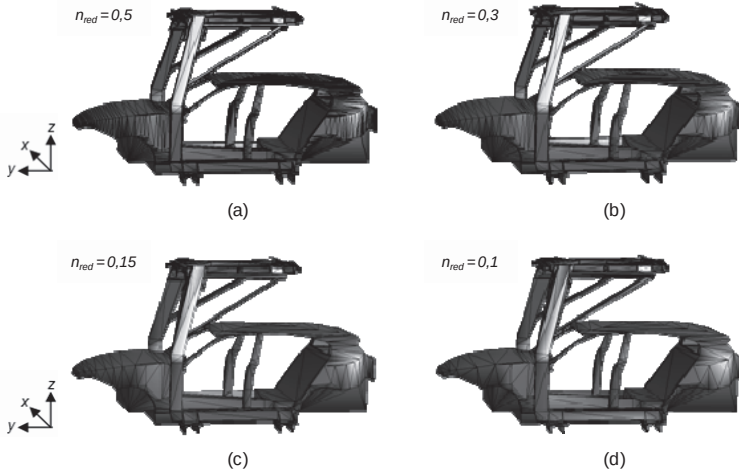


Abbildung 4-35: Karosserie mit verschiedenen Vereinfachungsraten

4.6.4.3 Sichtbarkeit

Die Eliminierung nicht verwendeter Objekte ermöglicht, wie in Abbildung 4-36 dargestellt, eine zusätzliche Modellvereinfachung. Mittels Backface Culling (AKENINE-MÖLLER ET AL. 2010) kann die optisch nicht sichtbare Seite mittels des Skalarprodukts zwischen TCP-Richtungsvektoren und Normalenvektoren der Objektfacetten identifiziert und eliminiert werden. Dieser Schritt kann folglich ein zusätzliches Vereinfachungspotenzial von über 50 % beinhalten.

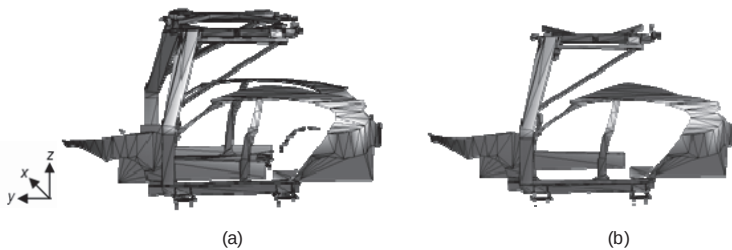


Abbildung 4-36: Vereinfachtes Karosseriemodell;
(a) nach Backface Culling
(b) nach Arbeitsraumsegmentierung entlang der x-Achse

4.7 Roboterbahnplanung

4.7.1 Allgemeines

Ziel dieses Abschnitts ist die Auslegung eines Bahnplanungskonzepts, unter Zugrundelegung der bereits vorgestellten Module, zur Durchführung der förderbandsynchronen Montage bei gleichzeitiger Kollisionsvermeidung und, falls erforderlich, anschließender Re-Synchronisation. Zunächst soll ein Überblick über die in Abbildung 4-37 dargestellten Einzelfunktionen des Roboters in Hinblick auf die in den Abschnitten 3.2 und 3.4 vorgestellten Anforderungen gegeben werden. Innerhalb der Roboterbahnplanung werden Geschwindigkeiten anstelle von Beschleunigungen verwendet. Dies hat verschiedene Gründe. Zum einen ist die Notwendigkeit nicht gegeben, Befehle komplett vor auszuplanen. Zum anderen ist bei Betrachtung der Umgebung und der sich daraus ergebenden kinematischen Bedingungen, die Vorgabe einer Geschwindigkeit einfacher als die Betrachtung von Kräften und Momenten, was für eine Vorgabe von Beschleunigungen notwendig wäre.

Für die Ausführung einer geregelten Bahn sind folgende Funktionen, welche in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden, mit ansteigender Priorität zu erfüllen (vgl. Abbildung 4-37):

- *Bahnplanung* – Die Bahnplanung erstellt eine Folge von Punkten, die vom Tool Center Point (TCP) des Roboters zur Durchführung seiner Aufgabe abgefahren werden soll.
- *Bahnregelung* – Unter Kenntnis der Gelenkpositionen berechnet dieses Modul vorläufige Sollgeschwindigkeiten der Roboterachsen, um die Synchronisation zum Montagehauptkörper einzuhalten oder ortsflexibel wiederherzustellen.
- *Bahnanpassung* – Die kollisionsvermeidende Bahnanpassung modifiziert die vorliegenden Sollgeschwindigkeiten so, dass dem geregelten Roboter die kollisionsfreien Gelenk-Sollgeschwindigkeiten vorgegeben werden. Diese werden final dem Roboter für die Bewegung zur Verfügung gestellt.

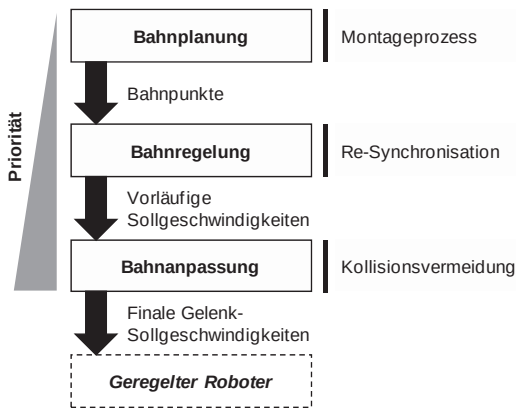


Abbildung 4-37: Dreistufige Roboterbahnplanung für den geregelten Roboter innerhalb der Mensch-Roboter-Koexistenz

4.7.2 Bahnplanung – Montageprozess

Der ungestörte, ortsflexible Montageprozess repräsentiert den Nominalfall und basiert auf einer Referenztrajektorie, die für den Roboter bei einem unbewegten Montagehauptkörper erstellt werden kann (LANGE ET AL. 2008). Diese wird im Anschluss mit der Förderbewegung des Montagehauptkörpers überlagert. Somit setzt sich die Generierung einer Sequenz von Sollpositionen nach WERNER (2009) aus folgenden Teilschritten zusammen, bei der aufgrund der gleichen Anzahl an Abtastschritten das Geschwindigkeitsprofil erhalten bleibt:

- Auslesen der programmierten Soll-Position aus der Referenztrajektorie,
- Korrektur der Soll-Position durch Sensorwerte und
- Rückwärtstransformation in die Roboterfreiheitsgrade.

Das Ergebnis dieser Schritte ist in Abbildung 4-38 schematisch dargestellt und zeigt eine um die Bewegung des Montagehauptkörpers verschobene Punktesfolge $P_{i,j}$ entlang positiver y -Richtung. Der gesamte Montageprozess ist vereinfacht eine vektorielle Überlagerung der Förderbewegung mit der eigentlichen Montagebewegung. Die Bahn wird dabei in zwei konsekutive Phasen unterteilt: eine Positionierungsphase, bei der Position sowie Orientierung variabel sein können sowie eine Einbau- bzw. Montagephase, mit prozessrelevanter Einhaltung von Positionen sowie Orientierungen.

Die eindeutige Spezifikation der gewünschten Roboterbahn erfolgt über eine Punktefolge $P_{i,j}$, die mittels einer kinematischen Rückwärtstransformation in eine Sollwertfolge θ_{soll} für die Roboterachsen überführt wird. Dies ist erforderlich, da aufgrund kinematischer Kopplungen der Roboterhandachsen eine Regelung im kartesischen Raum grundsätzlich eine aufwendige Mehrgrößenregelung erfordert (SICILIANO & KHATIB 2008).

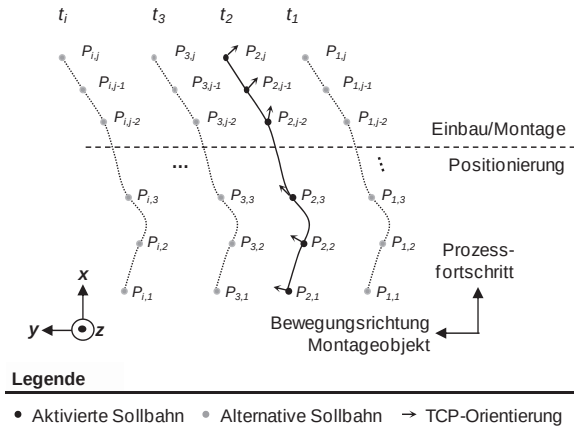


Abbildung 4-38: Schematische Draufsicht auf die verschobene Referenzbaubahn entlang der Objektbewegung in positiver y -Richtung

4.7.3 Bahnregelung – Re-Synchronisation

4.7.3.1 Nominalfall

Im Fall eines nominalen Montagevorgangs ohne Störung ist es die Aufgabe der Bahnregelung, die Sollgeschwindigkeiten zu bestimmen und diese der Robotersteuerung zu übergeben. Die reine Verwendung einer geschwindigkeitsbasierten Regelung unter Verwendung von Stützpunkten hat den Nachteil wechselnder Beschleunigungen. Mittels einer Prädiktion (vgl. Abschnitt 4.4.7) in Kombination mit einem Interpolationsverfahren, basierend auf Splines oder Polynomen, lässt sich vorrausschauend das erforderliche Geschwindigkeitsprofil bestimmen und rekursiv für jeden Zyklus aktualisieren. Dies verhindert ein ruckartiges Be-

schleunigen des Roboters, welches zu einer gefahrbringenden Situation führen könnte.

Mittels eines linearen achssynchronen Positionsreglers in der Form

$$\dot{\theta}_{soll} = k_p [\theta_{soll} - (\hat{\theta}_{Rob} - \theta)] \quad (4-18)$$

mit der Reglerkonstante k_p und der prädizierten Gelenkstellung $\hat{\theta}_{Rob}$ lässt sich ein Einregeln der Position ohne Schwingungen realisieren. Die Prädiktion, basierend auf einem linearen Kalmanfilter, dient der Kompensation interner Filtereigenschaften innerhalb der Robotersteuerung.

4.7.3.2 Reaktion bei Synchronisationsverlust

Die Einhaltung der Einbaubahn repräsentiert eine Kernfunktion und besitzt eine hohe Relevanz für die Systemverfügbarkeit des Gesamtsystems. Bei einem sicherheitsbedingten Synchronisationsverlust zwischen Roboter und Montagehauptkörper sind zwei Fälle anhand der Phasen Positionierung und Einbau zu unterscheiden:

- *Positionierung* – Im ersten Fall geht die Synchronisation entlang der Förderrichtung verloren. Infolgedessen muss der Roboter nach Beendigung des Zustandsmoduls Bahnanpassung den nächsten Sollpunkt auf einer verschobenen Einbaubahn lokalisieren und abhängig von der räumlichen Distanz beschleunigen. Das Zustandsmodul der Bahnregelung zur Durchführung einer Re-Synchronisation wird so lange wiederholt (vgl. Abbildung 4-39), bis der Roboter wieder auf der richtigen dynamischen Einbaubahn angelangt ist. Hierbei ist es entscheidend, dass die Re-Synchronisation unabhängig von Ort und Position durchgeführt wird und sich ausschließlich an prozeduralen Parametern orientiert.
- *Einbau* – Beim Eintritt in die Montagephase ist ein beliebiger Synchronisationsverlust aufgrund einer möglichen Kollision mit dem Montagehauptkörper nicht mehr zulässig. Folglich muss eine Überlagerung in Förderrichtung beibehalten werden. Durch eine Formulierung kinematischer Randbedingungen hinsichtlich der Freiheitsgrade kann ein relativer Stillstand aus Sicht des Montagehauptkörpers realisiert und somit die Gefahr für eine Kollision reduziert werden.

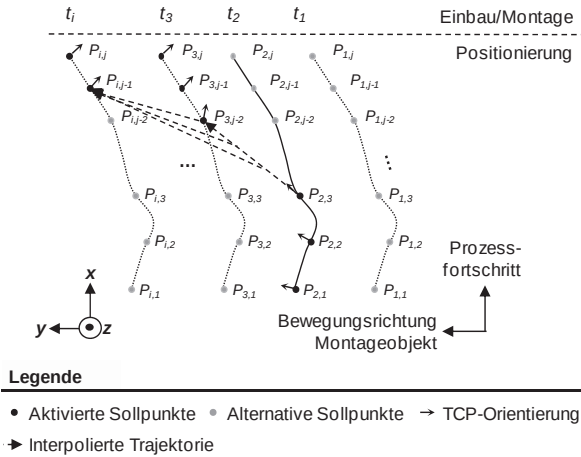


Abbildung 4-39: Schematische Draufsicht auf die Bahn für eine Re-Synchronisation, bei der Stützpunkte von mehreren Solltrajektorien innerhalb der Positionierungsphase verwendet werden

4.7.4 Bahnanpassung – Kollisionsvermeidung

4.7.4.1 Anforderungskriterien

Für die Auswahl einer geeigneten Reaktionsstrategie zur kollisionsfreien Bahnanpassung bedarf es eines systematischen Vorgehens, sodass zunächst grundlegende Entscheidungskriterien definiert werden sollen. Die Vielzahl existierender Ansätze mit unterschiedlichen Funktionalitäten erfordert zur Differenzierung eine Anforderungskategorisierung. Einen bewährten Ansatz aus der Produktentwicklung stellt das Kano-Modell dar, mit dem Merkmalsausprägungen auf den drei Ebenen Grund-, Qualitäts- bzw. Leistungsmerkmale sowie Wunschmerkmale im Hinblick auf Funktionserfüllung sowie Kundenzufriedenheit erfasst werden können (LINDEMANN 2009).

In der Literatur sind verschiedene Verfahren zur kollisionsfreien Bahnplanung zu finden. Unterschieden wird zwischen Online- und Offline-Verfahren (BORGOLTE 1991). Eine Unterscheidung ist ferner darin zu treffen, ob in der Bahnplanung lediglich lokale Bedingungen aufgestellt und eingehalten werden, die für den

aktuellen Zeitpunkt gelten, oder ob in jedem Zeitschritt eine komplette kollisionsfreie Bahn bis zum Zielpunkt geplant wird.

Die Anforderungen an die Kollisionsvermeidung lassen sich folgendermaßen anhand der drei Ebenen definieren und kategorisieren:

Grundmerkmale

- *Kollisionsfreiheit* – Die Funktion der Kollisionsfreiheit ist eine Kernherausforderung und gewährleistet ein Abbremsen des Roboterarms bei einem erwarteten Kontakt.
- *Echtzeitfähigkeit* – Die Ausführungszeit muss ausreichend gering sein, um eine echtzeitfähige Online-Anwendung zu ermöglichen.
- *Dynamische Hindernisse* – Es muss eine Möglichkeit bestehen, dynamische Objekte innerhalb der Online-Bahnplanung zu berücksichtigen.

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- *Bahngeschwindigkeit* – Aufgrund normativer Richtlinien liegt der Grenzwert bei max. 250 mm/s. Diese Forderung ist im Hinblick auf die maximal realisierbare Roboter Geschwindigkeit von mehr als 2 m/s von geringer Relevanz und wird daher als Qualitätsmerkmal eingestuft.
- *Allgemeingültigkeit* – Eine allgemeingültige Lösung ermöglicht den Transfer des Vorgehens auf verschiedene Montage- und Anwendungsszenarien, aber auch unterschiedliche Robotertypen.

Wunschmerkmal

- *Systemhalt* – Die Möglichkeit des „Hängenbleibens“ in einem lokalen Minimum stellt den Systemhalt dar. Aufgrund der unabhängigen Dynamik innerhalb des Multiagentensystems kann dieser Fall ausgeschlossen werden.

4.7.4.2 Auswahl eines geeigneten Verfahrens

Nachdem im vorherigen Abschnitt die entscheidungsrelevanten Kriterien definiert wurden, erfolgt nun eine Vorstellung, Bewertung und Auswahl existierender Verfahren mit dem Ziel auf dieser Basis das grundsätzliche Vorgehen sowie den methodischen Rahmen einzugrenzen.

- *Potenzialfeldmethode* – Durch eine Umweltmodellierung werden Potenzialfelder und somit virtuelle Kräfte auf die Roboterarme erzeugt, aus deren Wirkung eine kollisionsfreie Bahn resultiert. Grundlegende Erkenntnisse wurden in der Arbeit von KHATIB (1986) vorgestellt. Ein vielfach genanntes Problem dieser Methode ist auch das „Hängenbleiben“ in lokalen Minima der Potenzialfunktionen. Dadurch kann der Roboterarm unter Umständen in einer Position verbleiben, selbst wenn er noch nicht am Zielpunkt angekommen ist.
- *RRT und PRM* – Beide Verfahren ähneln sich aufgrund ihres globalen Charakters und haben das Ziel, in jedem Zeitschritt eine komplette kollisionsfreie Bahn bis zum Zielpunkt zu planen. Bei RRTs (Rapidly-Exploring Random Trees) werden von Start- und Zielkonfiguration zufällige Punkte solange zu einem Start- und Ziel-Baum hinzugefügt bis eine kollisionsfreie Verbindung realisiert ist. Im Unterschied dazu wird bei PRMs (Probabilistic Roadmaps) ein Netzwerk von Punkten mit kollisionsfreien Verbindungen im Vorhinein erstellt, auf das online zurückgegriffen werden kann (CHOSSET AL. 2005).
- *RAMP* – VANNOY & XIAO (2008) stellen das Real-Time Addaptive Motion Planning vor, welches Ähnlichkeiten zu einem genetischen Algorithmus aufweist. Hierbei wird stets eine Grundpopulation von Trajektorien bereitgestellt. Durch Operationen, wie Mutation eines Trajektorienpunkts oder paarweisem Tausch von Trajektorienhälften, wird die Population stetig verändert. Die Trajektorie wird anhand von adaptiven Kriterien ausgewählt, die sich beim Eintreten eines unerwarteten Hindernisses verändern können. Dabei wird durch Gruppierung der Trajektorien in Unterpopulationen eine Diversität an Reaktionsoptionen realisiert.
- *Methode nach BOSSCHER & HEDMAN (2011)* – Die hohe Regelungskomplexität eines Industrieroboters, basierend auf einem System 2. Ordnung, wird in einem Ansatz von BOSSCHER & HEDMAN (2011) reduziert, indem für ein vorgeregeltetes Robotersystem eine Vorgabe von Gelenkgeschwindigkeiten erfolgt. Objekte werden paarweise auf Kollisionsgefahr geprüft und dadurch geometrische Betrachtungen, sogenannte Collision Points (CP) mit minimalem Abstand zu benachbarten Objekten, ermittelt. Mittels Randbedingungen können die Bewegungsgeschwindigkeiten über eine Optimierungsfunktion skaliert werden.

Zur Bestimmung des am besten geeigneten Verfahrens zur Kollisionsvermeidung dient eine in Tabelle 4-6 zusammengefasste qualitative Bewertung gemäß der Anforderungsliste aus Abschnitt 4.7.4.1. Aufgrund der durchgängigen Erfüllung der eingangs geforderten Grundmerkmale ist das Verfahren nach BOSSCHER & HEDMAN (2011) zu bevorzugen und wird an die Problemstellung adaptiert.

Tabelle 4-6: Qualitative Bewertung der Möglichkeiten für die Kollisionsvermeidung

	Potenzialfeld	RRT/PRM	RAMP	Bosscher & Hedman
Grundmerkmale				
Kollisionsfreiheit	●	●	●	●
Echtzeitfähigkeit	●	◐	◐	●
Dynamische Hindernisse	◐	◐	◐	●
Leistungsmerkmale				
Bahngeschwindigkeit	◐	●	●	●
Allgemeingültigkeit	◐	●	●	◐
Wunschmerkmal				
Systemhalt	○	●	●	●

Legende

● voll erfüllt ◐ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

4.7.4.3 Kinematik

Ausgehend von der im Abschnitt 4.4.3 vorgestellten Notation wird in diesem Zusammenhang die Roboterpose X_{TCP} im Basis-Koordinatensystem in einen Positions- und Orientierungsanteil unterteilt, die jeweils eine Funktion in Abhängigkeit der Gelenkkoordinaten θ darstellt.

$$X_{TCP} = \begin{bmatrix} r_{TCP} \\ \varphi_{TCP} \end{bmatrix} = f(\theta) \quad (4-19)$$

r_{TCP} Position des TCP

φ_{TCP} Orientierung des TCP

Durch Differenzierung ergibt sich hieraus folgender Zusammenhang:

$$\dot{X}_{TCP} = \begin{bmatrix} \dot{r}_{TCP} \\ \dot{\varphi}_{TCP} \end{bmatrix} = J_{TCP}(\theta)\dot{\theta} \quad (4-20)$$

mit

$$J_{TCP}(\theta) = \frac{\partial X_{TCP}}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} J_{X,TCP} \\ J_{\omega,TCP} \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

bei der $J_{TCP}(\theta)$ die Jakobimatrix des Roboter-TCPs repräsentiert.

4.7.4.4 Bahnanpassung mittels virtueller Ablenkungskraft

Die Bahnanpassung beinhaltet die Online-Berechnung der finalen Gelenk-Sollgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung des Umgebungsmodells zur Einhaltung einer kollisionsfreien Bahn (vgl. Abbildung 4-40). Als Grundlage dient die geplante Sollgeschwindigkeit aus der Bahnregelung

$$v_{BA} = \begin{bmatrix} v_{BR,trans} \\ \omega_{BR,rot} \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

Die Betrachtung von Geschwindigkeiten erfolgt im Bezug zu vorhandenen Umgebungsobjekten im kartesischen Raum, sodass etwaige Bedingungen nicht für den achsspezifischen Fall formuliert werden können. Dies erfordert ein zweistufiges Vorgehen:

- Bestimmung der finalen TCP-Sollgeschwindigkeiten und
- Bestimmung der finalen Gelenk-Sollgeschwindigkeiten mittels Rückwärtstransformation.

Die eigentliche Aufgabe der Bahnanpassung ist die Einleitung eines Ausweichvorgangs. Das Bahnanpassungsmodul stellt die Synthese eines Verfahrens dar, bei der das Konzept von BOSSCHER & HEDMAN (2011) um einen Kernaspekt von SINGH ET AL. (1996) erweitert wird. Hiernach wird ein Roboter nicht von Hindernissen abgestoßen, sondern abgelenkt, sodass eine partielle Umfahrung von Hindernissen ermöglicht wird. Von dieser Idee ausgehend werden zwei Erweiterungen vorgenommen.

- Das Ausweichen durch das Fahren einer vordefinierten Kurve ist im begrenzten Arbeitsraum nicht sinnvoll. Vielmehr kann eine bevorzugte Ausweichrichtung weg vom Ursprung des Kollisionsobjekts angegeben werden. Für ein Hindernis existiert sozusagen eine Art von Wegweisern, die eine Ausweichrichtung angeben, und nur aktiv sind, falls die ursprüngliche Wunschbewegung auch auf ein Hindernis zeigt.

- Der Effekt soll stärker ausgeprägt sein, je näher sich ein Objekt einem Roboter annähert (vgl. Formel (4-24)). Die Berechnung eines Ablenkungsterms, der in die Sollgeschwindigkeit des TCPs eingeht, geschieht über die Modellierung einer virtuellen Ablenkungskraft F_{BA} für die Bahnanpassung.

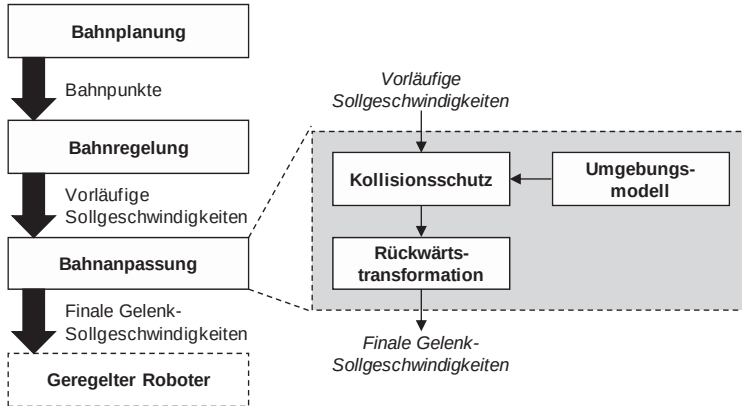


Abbildung 4-40: Modul Bahnanpassung

Für die virtuelle Ablenkungskraft gilt folgender Zusammenhang:

$$F_{BA} = |F_{BA}|e_{BA} \quad (4-23)$$

$|F_{BA}|$ Betrag der virtuellen Ablenkungskraft F_{BA}
 e_{BA} Richtung der virtuellen Ablenkungskraft F_{BA}

Der Betrag der Ablenkungskraft soll den relativen Abstand zwischen aktueller Roboterposition und Werker in der Umgebung berücksichtigen. So lässt sich unter Kenntnis eines parametrisierbaren Reaktionsabstands d_r , welcher das geschwindigkeitsabhängige Bremsverhalten des Roboters widerspiegeln kann, der Betrag der Ablenkungskraft wie folgt definieren:

$$|F_{BA}| = \sum_{k=0} \delta_{BA,k} (v_{BR,trans} e_{s,k}) \frac{\ln\left(\frac{d_{s,k}}{d_r}\right)}{\ln\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (4-24)$$

$$\text{mit } \delta_{BA,k} = \begin{cases} 1 \forall i \mid d_{s,k} < d_r \wedge v_{BR,trans} e_{s,k} > 0 \\ 0 \forall i \mid d_{s,k} \geq d_r \wedge v_{BR,trans} e_{s,k} \leq 0 \end{cases}$$

- δ_{BA} Entscheidungsfaktor für die Bahnanpassung
- $v_{BR,trans}$ translatorische Sollgeschwindigkeit für die Bahnanpassung
- d_s kürzester Abstand zwischen Roboter und Umgebungsobjekten
- e_s Richtung des Oberflächenabstands d_s
- d_r Reaktionsabstand
- k Zeitpunkt

Hierbei bewirkt die Fallunterscheidung, dass nur Umgebungselemente in die Summenbildung eingehen, deren Abstand zum TCP kleiner als der Reaktionsabstand d_r ist. Der Logarithmus glättet die Ablenkungskraft, sodass plötzliche Objektbewegungen nicht zu ruckartigen Roboterbewegungen führen.

Die Richtung der Ablenkungskraft e_{BA} bestimmt sich über die Werkerposition r_{Werker} sowie die Position des TCPs r_{TCP} zu

$$e_{BA} = \frac{r_{Werker} - r_{TCP}}{|r_{Werker} - r_{TCP}|} \quad (4-25)$$

Zusammengefasst gilt folglich für die vorläufige Sollgeschwindigkeit des TCPs unter Berücksichtigung eines variablen Verstärkungsfaktors k_{BA} :

$$v'_{BA} = \begin{bmatrix} v_{BR,trans} + k_{BA} F_{BA} \\ \omega_{BR,rot} \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

4.7.4.5 Optimierungsfunktion

In diesem Abschnitt erfolgt die Ermittlung der kollisionsfreien Gelenksollgeschwindigkeiten. Hierbei soll mittels einer Optimierung möglichst die vorgegebene TCP-Sollgeschwindigkeit $v_{BA,Soll}$ eingehalten werden. Die gesuchte finale Sollgeschwindigkeit wird als Optimierungsvariable $x = v_{BA,Final}$ bezeichnet und stellt mit der Jakobimatrix folgenden Zusammenhang dar:

$$x = J_{TCP} \dot{\theta} \quad (4-27)$$

Das quadratische Gütemaß wird über die Funktion

$$G = \frac{1}{2} (x - v'_{BA})^T Q (x - v'_{BA}) \quad (4-28)$$

- G Gütemaß für die Optimierung
 x Optimierungsvariable
 v'_{BA} kürzester Abstand zwischen Roboter und Umgebungsobjekten
 Q Gewichtungsmatrix (Standard: Einheitsmatrix)

ausgedrückt und führt zum Optimierungsproblem

$$\min G = \frac{1}{2} x^T Q x + f^T x \quad (4-29)$$

mit

$$f = -Q v'_{BA} \quad (4-30)$$

Dieses Optimierungsproblem kann mittels analytischer oder numerischer Methoden der quadratischen Optimierung (z. B. Langrange-Funktion oder Active Set Method) unter Berücksichtigung spezifizierter linearer Gleichungs- und Ungleichungsbedingungen der Form

$$Ax = b \quad (4-31)$$

und

$$Ax \leq b \quad (4-32)$$

minimiert werden (NOCEDAL & WRIGHT 2006, LI 2012). Diese Randbedingungen entstammen dreier Gruppen, welche im Folgenden näher vorgestellt werden:

- Integration des Umweltmodells,
- Kollision und
- Arbeitsraumgrenzen.

4.7.4.6 Randbedingung I: Integration des Umgebungsmodells

Wie eingangs beschrieben, werden für die Umgebungsmodellierung Geometrieprimitiva verwendet, um Objektoberflächen mit einer geringen Objektzahl abzubilden (vgl. Abschnitt 4.6). Aufgrund der hohen Komplexität in der Darstellung dynamischer Objekte, wie z. B. Werker oder Industrieroboter, soll das Vorgehen um die beiden Primitiva Kugel sowie Zylinderkugel erweitert werden. Diese wurden bereits von ROSSMANN (1993) zur Modellierung von Roboterarmen verwendet. Wie in Abbildung 4-41 dargestellt, wird eine Zylinderkugel aus einem Zylinder mit jeweils an den Enden aufgesetzten Halbkugeln gebildet und durch die Mittelpunkte A und B sowie einen Zylinderradius r beschrieben

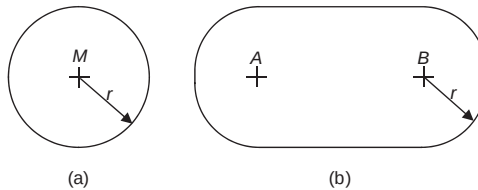


Abbildung 4-41: Seitenansicht einer (a) Kugel und (b) Zylinderkugel

Die Modellierung eines Roboterarms bis zum Werkzeugflansch kommt mit je sechs Objekten aus. Die Ober- und Unterarme des Roboters sind durch je eine dynamische Zylinderkugel dargestellt. Am Roboterwerkzeug sind mehrere Objekte übereinander. Die zugrunde liegende Idee ist, dass dadurch bestimmte Objektkombinationen beim Montagevorgang deaktiviert werden können.

4.7.4.7 Randbedingung II: Kollision

Existierende Verfahren zur Kollisionsvermeidung basieren auf kinematischen Bedingungen (BOSSCHER & HEDMAN 2011). Dabei soll durch eine Optimierung die von der Bahnanpassung vorgegebene Sollgeschwindigkeit möglichst eingehalten werden.

Befinden sich zwei Objekte in nächster Nähe, so soll eine weitere Annäherung, die zu einer Kollision führen würde, ausgeschlossen werden. Aus der geometrischen Betrachtung ergibt sich der kürzeste Abstand d_s der Objektoberflächen. Dieser wird anschließend mit dem geschwindigkeitsabhängigen Reaktionsabstand d_r zur Ermittlung der Randbedingung verglichen. Die Wahl einer subjektiv angenehmen Annäherungsgeschwindigkeit ist Gegenstand vieler Arbeiten, wie

z. B. KULIĆ & CROFT (2007), THIEMERMANN (2005), BORTOT (2014) und ARAI ET AL. (2010), auf die im Weiteren nicht näher eingegangen wird. BOSSCHER & HEDMAN (2011) schlagen, im Falle von $d_s < d_r$, eine skalare maximale Annäherungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit eines zweiten wählbaren Einstellparameters v_0 vor, der die maximale Annäherungsgeschwindigkeit einstellt:

$$v_{max} = \frac{v_0}{\ln\left(\frac{1}{2}\right)} \ln\left(\frac{d_r - d_s}{d_r}\right) \quad (4-33)$$

Die Annäherungsgeschwindigkeit der Oberflächen wird mit der Geschwindigkeit von *CPs* angenähert (BOSSCHER & HEDMAN 2011). Diese entspricht bei einer Kugel dem Kugelmittelpunkt, bei einer Zylinderkugel dem Punkt auf der Mittelachse, welcher der kürzesten Verbindungslinie am nächsten ist und bei einem Dreieck dem Schwerpunkt (vgl. Abbildung 4-41).

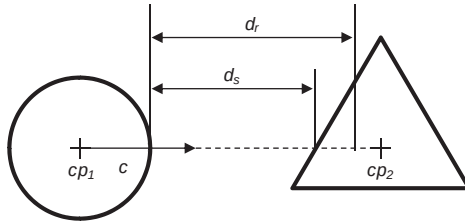


Abbildung 4-42: Kollisionsbetrachtung zwischen Kugel und Dreieck

Wie in Abbildung 4-42 dargestellt, zeigt der Normaleneinheitsvektor c von cp_1 nach cp_2 . Folglich lautet die Bedingung für die Annäherungsgeschwindigkeit

$$-c^T(\dot{r}_{cp2} - \dot{r}_{cp1}) \leq v_{max} \quad (4-34)$$

mit den Ortsvektoren r_{cp} der Collision Points bzw. deren Geschwindigkeiten.

Unter Kenntnis der Jakobimatrix der *CPs* kann unter Verwendung von Formel (4-27) diese mittels der Gleichung

$$\dot{r}_{cpi} = J_{cpi} \dot{\theta} \quad (4-35)$$

und

$$\dot{\theta} = J_{ges}^{-1}x \quad (4-36)$$

in einen Zusammenhang mit dem Optimierungsvektor x überführt werden. Durch Einsetzen in die Ungleichungsbedingung (4-35) ergibt sich eine Randbedingung für das vorab formulierte Optimierungsproblem (4-29) zu

$$A = -c^T(J_{cp2} - J_{cp1})J_{ges}^{-1} \quad (4-37)$$

sowie

$$b = v_{max} \quad (4-38)$$

Hier entspricht die Jacobimatrix für den CP eines Kugelobjekts der des Mittelpunkts sowie beim Dreieck der des Schwerpunkts. Im Fall einer Zylinderkugel, die über die Gleichung $y = r_A + (r_B - r_A)\mu$ definiert ist, ergibt sich die Jacobimatrix des CP zu

$$J_{cp} = J_A(1 - \mu) + J_B\mu \quad (4-39)$$

Dadurch lassen sich Umgebungsobjekte, deren Positionen oder Geschwindigkeiten mess- bzw. beobachtbar sind, in die Optimierung vektoriell integrieren.

Darüber hinaus müssen in bestimmten Situationen gezielt Objektpaare zur Erstellung von Bedingungen für die Roboterbewegung weggelassen werden. Dies ist bei folgenden Objektkombinationen der Fall:

- Weit voneinander entfernte Objekte, deren gegenseitige Kollision ausgeschlossen ist;
- Benachbarte Objekte, die als Modell permanent kollidieren.

Des Weiteren muss der Anforderung Rechnung getragen werden, dass innerhalb der Montage besondere Situationen vorliegen, bei denen weitere Kombinationen situationsbedingt ausgeschlossen werden müssen.

4.7.4.8 Randbedingung III: Arbeitsraumgrenzen

Sind für die Gelenkwinkel θ Schranken und für die Gelenkwinkelgeschwindigkeiten $\dot{\theta}$ Grenzen (θ_{min} , θ_{max} bzw. $\dot{\theta}_{max}$) vorgegeben, gilt es diese ebenfalls für die Optimierung zu berücksichtigen.

Die Einführung eines vorgegebenen Begrenzungsvektors $\dot{\theta}_{max}$ mit einem parametrisierbaren Grenzbereich Φ_{Grenze} erlaubt die Formulierung einer stetigen Übergangsfunktion, um abrupte Roboterbewegungen und somit Schwingungen am Roboterendeffektor zu vermeiden. Aufgrund einer reinen Betrachtung von Geschwindigkeiten bedarf es der Verknüpfung beider Bedingungen mittels eines Vektors

$$\dot{\theta}_{Grenze,i} = \frac{\theta_{max,i} - \theta_i}{\Phi_{Grenze}} \dot{\theta}_{max,i} \quad \forall i \mid \theta_i > \theta_{max,i} - \Phi_{Grenze} \quad (4-40)$$

und $\theta_i < \theta_{max,i}$

mit der die Elemente von $\dot{\theta}$ begrenzt werden.

Wurde von einem Gelenkwinkel der gültige Arbeitsbereich verlassen, wird dieser durch die Funktion

$$\dot{\theta}_{Grenze,i} = 0 \quad \forall i \mid \theta_i > \theta_{max,i} \quad (4-41)$$

limitiert, während für die übrigen Elemente

$$\dot{\theta}_{Grenze,i} = \dot{\theta}_{max,i} \quad \forall i \mid \theta_i < \theta_{max,i} - \Phi_{Grenze} \quad (4-42)$$

gilt. Dadurch lässt sich eine zusätzliche Randbedingung für die oberen Schranken in der erforderlichen Form

$$\dot{\theta} = J_{ges}^{-1} \dot{x} \leq \dot{\theta}_{Grenze} \quad (4-43)$$

formulieren. Die Aufstellung der Randbedingung für die unteren Schranken erfolgt hierzu analog.

Anhand der vorgestellten Randbedingungen kann das Optimierungsproblem der Bahnanpassung spezifiziert werden, um eine kollisionsfreie Trajektorienmodifikation zur Laufzeit zu realisieren.

4.8 Zusammenfassung des Konzepts

Aufbauend auf den in Kapitel 3 dargestellten Systemanforderungen wurde in Kapitel 4 ein Gesamtkonzept vorgestellt, welchem ein aus zwei Systemen bestehendes Synchronisationskonzept zugrunde liegt. Es beinhaltet neben der Synchronisation zwischen Roboter und Montagehauptkörper ebenfalls eine Synchronisation zwischen Roboter und kamerabasiertem Überwachungsraum für die Objektdetektion, welche nicht verloren gehen darf. Jedoch kann ein reaktives Roboterverhalten, wie z. B. eine Kollisionsvermeidung, einen solchen Synchronisationsverlust herbeiführen. Um dies zu vermeiden, wird ein prädiktives Regelkonzept für eine Arbeitsraumsynchronisation entworfen.

Ein Ansatz zur Koordination manueller und automatisierter Prozesse wird durch eine Ablaufmodellierung manueller Tätigkeiten beschrieben. Diese ermöglicht eine wahrrscheinlichkeitsbasierte Erkennung manueller Tätigkeiten und dient somit als Grundlage für eine kontextbezogene Tätigkeitenkoordination.

Die Integration von Umgebungsmodellen basiert auf einen robotergeführten optischen Sensor. Mittels Punktwolken und einem Iterative Closest Points Verfahren werden Umgebungsmodelle an das Roboterkoordinatensystem referenziert und anschließend vereinfacht.

Das vorgestellte Vorgehen für die Roboterbahnplanung setzt sich aus drei hierarchisch angeordneten Teilmodulen zusammen, welche über ein gemeinsames Statechart-Modell miteinander verknüpft sind. Infolge der Förderbewegung des Montagehauptkörpers wird die Montageaufgabe mittels einer Trajektorienschar laufend aktualisiert. Unter Berücksichtigung des Umgebungsmodells wird zyklisch eine Bahnmodifikation für die Kollisionsvermeidung vorgenommen.

Das Gesamtkonzept adressiert die identifizierten Problemstellungen. Neben einem allgemeinen Vorgehen werden durch die durchgängige Konzeption der Funktionalitäten methodische Schritte zur Auswahl und Auslegung einzelner Module beschrieben und somit eine Allgemeingültigkeit gewährleistet. Dieses Gesamtkonzept gilt es im Folgenden prototypisch umzusetzen und hinsichtlich der Anwendbarkeit zu untersuchen.

5 Systemaufbau und -erprobung

5.1 Einführung

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Gesamtkonzept für eine Mensch-Roboter-Koexistenz innerhalb einer Fließmontageanwendung wird anhand eines prototypischen Versuchsaufbaus und eines Anwendungsbeispiels evaluiert. Ein wichtiger Aspekt war ein flexibler Systementwurf, der es ermöglicht, neue Hardware- oder Software-Komponenten hinzuzufügen oder bestehende auszutauschen. Insbesondere beim Roboter wurden die erforderlichen Softwarefunktionalitäten abstrahiert entworfen, um ein herstellerunabhängiges Systemkonzept zu realisieren.

Für die Evaluation wurde der Sitzeinbau aus der Automobilindustrie als Referenzprozess für den Industrieroboter gewählt. Dieser erfordert aufgrund der Dimensionen des Montageobjekts den Einsatz eines Industrieroboters mit großer Traglast, sodass ein berührungsloses Verfahren für die Arbeitsraumüberwachung notwendig ist. Der betrachtete Prozess beinhaltet ausschließlich das Platzieren des Sitzes in den Karosserieinnenraum, nicht aber das Verschrauben. Für den menschlichen Mitarbeiter sind Inspektionsarbeiten, wie z. B. Sichtkontrollen sowohl im Vorder- als auch im Hinterradbereich, angedacht, die einen Eintritt in den Arbeitsraum erfordern.

5.2 Systemaufbau

5.2.1 Übersicht

Der realisierte prototypische Versuchsaufbau für eine Mensch-Roboter-Koexistenz innerhalb der Fließmontage basiert auf dem Grundsystem von WERNER (2009) und wurde am *iwb* Anwenderzentrum Augsburg realisiert und in Betrieb genommen. Die Pilotanlage besteht, wie in Abbildung 5-1 zu sehen ist, aus folgenden Teilkomponenten:

- Elektrohängebahn mit PKW-Karosse,
- Vertikalknickarmroboter mit Endeffektor,
- Kamerasystem mit Bildverarbeitung,

- Laserscanner und
- Robotersteuerung und Echtzeitsystem.

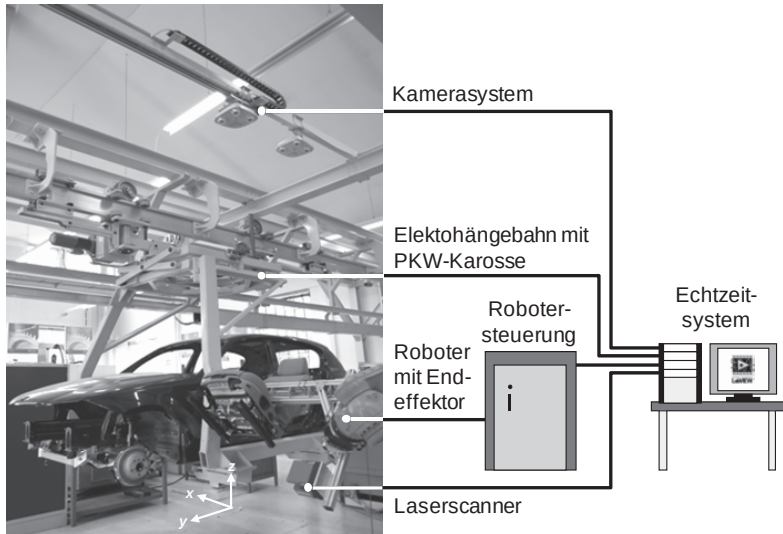


Abbildung 5-1: Versuchsaufbau für die Mensch-Roboter-Koexistenz am Beispiel der Sitzmontage

5.2.2 Elektrohängebahn mit PKW-Karosserie

Für die Positionserfassung des Montagehauptkörpers – einer BMW E81 Fahrzeugkarosserie – wurde ein optisches Distanzmessgerät vom Typ Leuze ODSL 30 verwendet. Die Verfahrensgeschwindigkeit der Elektrohängebahn ist stufenlos verstellbar und beträgt maximal 0,1 m/s auf einer Gesamtstrecke von 5 m. Die Steuerung basiert auf einer Siemens Simatic® Steuerung.

5.2.3 Vertikalknickarmroboter mit Endeffektor

Beim eingesetzten Industrieroboter handelt es sich um einen KUKA KR 180-2 Serie 2000 mit einer Nenntaglast von 180 kg, einem Arbeitsraum von 55,0 m³ sowie einer Positionswiederholgenauigkeit von $\pm 0,06$ mm bei einer maximalen TCP-Geschwindigkeit von 2 m/s (KUKA ROBOTER GMBH 2004). Die manuelle

Bedienung des Industrieroboters erfolgt über KUKA Robot Language (KRL) mittels des Eingabegeräts KUKA Control Panel (KCP).

Im Zuge der Umsetzung wurde entsprechend des Vorgehens nach VDI 2221 ein Endeffektor für die Sitzhandhabung unter Berücksichtigung der nachfolgenden prozeduralen sowie geometrischen Anforderungen realisiert (vgl. Abbildung 5-2):

Prozessanforderungen

- Hohe Steifigkeit
- Sitz in definierter Position halten
- Flexibilität bei der Aufnahme verschiedener Sitztypen

Geometrische Anforderungen

- Kompakte Bauform
- Geringes Gewicht
- Einfache Montierbarkeit
- Keine scharfen Kanten/Spitzen

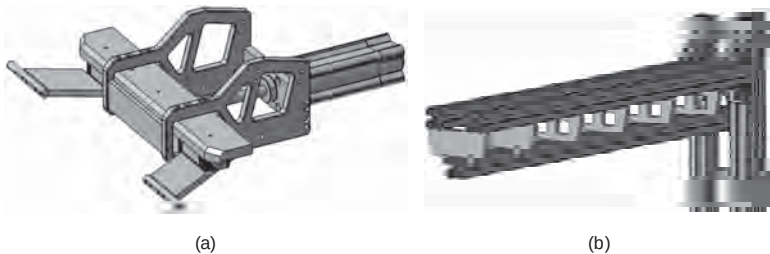


Abbildung 5-2: Endeffektor für die roboterbasierte Sitzmontage;
 (a) Greiferbaugruppe
 (b) Ausleger mit Versteifungselementen

Der Endeffektor besteht aus einer Greiferbaugruppe und einem Ausleger (vgl. Abbildung 5-2). Die Greifeinheit arbeitet mit einem pneumatischen Kniehebelprinzip (vgl. Abbildung 5-2 a) zur formschlüssigen Fixierung des Sitzes zwischen Sitzfläche und Rückenlehne gegen Kippen. Der Ausleger ist, wie aus Abbildung 5-2 b ersichtlich, in einen horizontalen und einen vertikalen Abschnitt

unterteilt. An dem horizontalen Abschnitt befindet sich die Greiferanbindung und im vertikalen Abschnitt die Roboterflanschverbindung.

5.2.4 Kamerasystem

Das Kamerasystem besteht aus zwei modifizierten Sicherheits-Überwachungskameras vom Typ Pilz SafetyEYE®, die über dem Arbeitsraum installiert sind. Eine Funktion zur Erkennung von Referenzmarkern wurde aus der Bildverarbeitung entfernt, um bewegliche Räume abbilden zu können. Der Überwachungsbereich ist aus Kamerasicht statisch und wird direkt mit den Ein- und Ausgängen der Steuerungseinheit verbunden, sodass ein Eindringen von Objekten detektiert wird und die Räume logisch miteinander verknüpft werden können. Die Synchronisierung wurde mittels einer 2 m langen Linearache auf Basis einer Pilz PMCprimo® Motion Control realisiert.

5.2.5 Laserscanner

Im Rahmen der Demonstratoranlage kam ein Laserscanner vom Typ Leuze ROD4 plus® für die Umgebungserfassung zum Einsatz. Im Gegensatz zum Punktlaser wird der Laserstrahl bei einem Laserscanner durch optische Elemente periodisch abgelenkt, sodass in jeder Winkelstellung eine Messung durchgeführt wird. Dies ermöglicht eine zweidimensionale Raumabtastung in einem Winkelbereich von 190° bei einer Wiederholfrequenz von 50 Hz..

5.2.6 Robotersteuerung und Echtzeitsystem

Die Regelung des Roboters erfolgt über ein externes, dediziertes Echtzeitsystem. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Der Roboter ist mit einer KUKA KRC2® Steuerung ausgestattet und kommuniziert über eine Ethernet-Verbindung mit dem Echtzeitsystem. Das Softwarepaket KUKA Ethernet RSI XML (Robot Sensor Interface, Extensible Markup Language) ermöglicht eine pseudo-echtzeitfähige Punkt-zu-Punkt-Verbindung für die Befehlsübertragung.

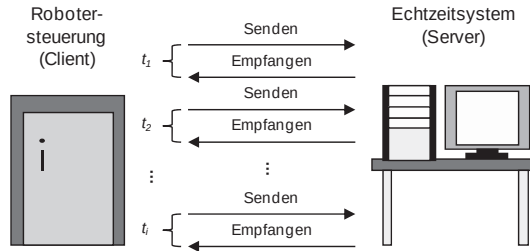


Abbildung 5-3: Datenaustausch zwischen KUKA-Industrieroboter und externem Echtzeitsystem

5.3 Kommunikationsarchitektur

5.3.1 Übersicht

Eine detaillierte Darstellung der realisierten Kommunikationsarchitektur kann der Abbildung 5-4 entnommen werden. Das Echtzeitsystem repräsentiert den zentralen Kommunikationsknoten zur Steuerung des Gesamtprozesses.

Zur Gewährleistung einer stabilen Kommunikation zwischen den Komponenten und dem Echtzeitsystem wurde jede Kommunikation auf einem separaten Kanal mit einer dedizierten Netzwerkkarte realisiert, um etwaige Bandbreitenbegrenzungen sowie Verzögerungen aufgrund von variierenden Kommunikationszyklen zu vermeiden.

Das Design und die Implementierung des Statechart-Modells sowie der Regelungsstrukturen werden auf einem Entwicklungs-PC innerhalb NI LabVIEW durchgeführt und für die Ausführung auf ein 4-Kern-Echtzeitsystem übertragen. Der zweite Entwicklungs-PC mit MATLAB dient im Hintergrund als Support System für die Auslagerung und Durchführung von Matrixoperationen sowie dem Training des HMM.

Zwischen beiden Kamerasystemen ist jeweils eine Kamerasteuerung für die Bildauswertung zwischengeschaltet. Bidirektionale digitale I/O-Signale oder Informationen über die Arbeitsraumüberwachung werden über einen zentralen Hub ausgetauscht. Die Bewegungssteuerung für die Kamerasynchronisation erfolgt mittels Registereinträgen basierend auf einer MODBUS/TCP-Schnittstelle.

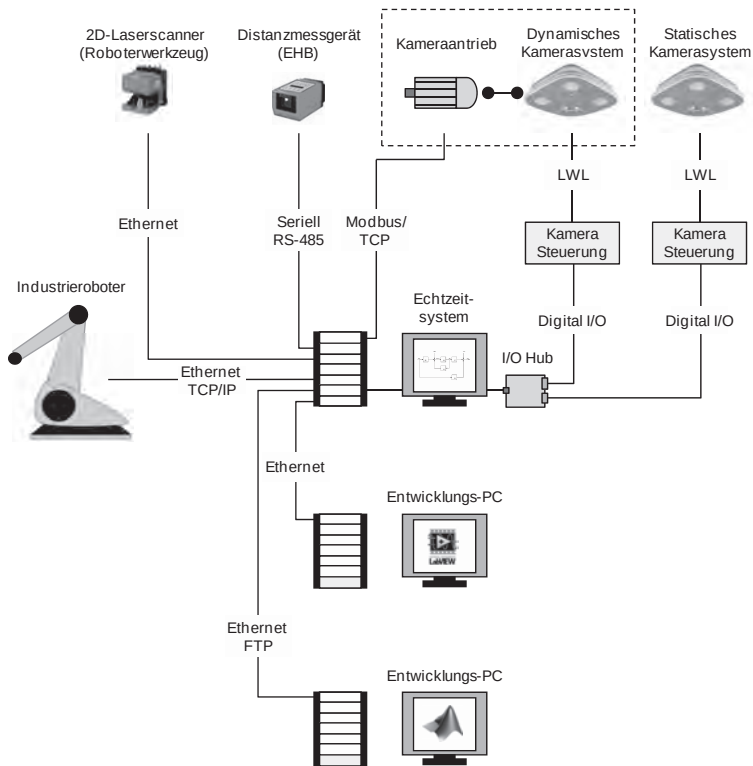


Abbildung 5-4: Kommunikationsarchitektur

5.3.2 Schnittstellen

5.3.2.1 RSI – Robot Sensor Interface

Die Datenpakete zwischen der Robotersteuerung und dem Echtzeitsystem werden mittels einer TCP/IP-Verbindung zyklisch ausgetauscht. Das externe System repräsentiert hierbei den Server, wohingegen die Robotersteuerung als Client agiert (EDBERG & NYMAN 2010). Auf dieser Basis kann eine direkte Trajektorienmodifikation über einen konfigurierbaren ASCII XML-String während der Roboterbewegung in Echtzeit erfolgen.

Die Zuverlässigkeit in der Datenübertragung wird durch einen informationstechnischen Handschlag realisiert. Hierbei wird bei einer bestehenden Kommunikati-

on der IPOC (Input-Process-Output-Counter) bzw. Interpolationstakt verwendet. Der vom Roboter gesendete IPOC muss vom externen System innerhalb einer vorgegebenen Zeitschranke (4 ms bzw. 12 ms) zurückgeschickt werden, um die Empfangsbereitschaft zu bestätigen und einen weiteren Datenaustausch fortzusetzen. Dies ermöglicht eine taktbasierte Pseudo-Echtzeitfähigkeit in der Datenverbindung.

5.3.2.2 Modbus/TCP

Bei einer Modbus/TCP Verbindung handelt es sich um eine offene Client-Server-Kommunikation (KLASEN ET AL. 2010). Basierend auf dem Ethernet Standard TCP/IP werden Header, Funktionscode und Prozessdaten zyklisch übertragen (DIN IEC 61158), wobei die beiden letzteren zusammen die Protocol Data Unit (PDU) bilden. Der Funktionscode definiert die Datenübertragung, sodass je nach Befehl innerhalb des Datenmodells diskrete Ein- oder Ausgänge sowie Eingangs- und Ausgangsregister geschrieben oder übertragen werden und somit ein herstellerunabhängiges Mapping möglich ist (KLASEN ET AL. 2010). Innerhalb des Versuchsaufbaus stellt das Echtzeitsystem den Server dar und der Kameraantrieb den Client.

5.3.2.3 Interprozesskommunikation

Die Anzahl an unterschiedlichen integrierten Komponenten mit jeweils individuellen Signalverarbeitungsfrequenzen zwischen zwei Knoten bedingt eine asynchrone Kommunikation (BATES & GREGORY 2000). Infolgedessen kann aufgrund der nebenläufigen parallel ausgeführten Prozesse eine Latenzzeit in der Datenverarbeitung durch Blockier- und Wartezeiten entstehen. Dieses würde die Stabilität sowie die Gesamtfunktionalität beeinträchtigen. Mittels des Einsatzes der Shared Memory Technik wird ein simultaner Zugriff auf zentrale Daten innerhalb der Interprozesskommunikation gewährleistet (ZAIDAN 2012, STEVENS 1999).

5.4 Anwendungsbeispiel

5.4.1 Einführung

In diesem Abschnitt wird anhand der drei vorab eingeführten Fälle die Funktionsfähigkeit der Anlage aufgezeigt:

- *Förderbandsynchrone Montage* – Der Nominalfall entspricht einem unge störten roboterbasierten Montagevorgang ohne Arbeitsraumteilung und beinhaltet Phase I als Transferbewegung außerhalb sowie Phase II als Einfädelbewegung innerhalb der PKW-Karosse.
- *Koexistenz*:
 - *Kollisionsvermeidung* – Der Fall Kollisionsvermeidung bedingt den Eintritt einer Person in den gemeinsamen Arbeitsraum. Die Detektion sowie die anschließende Kollisionsvermeidung können abhängig von der Montagephase zu einem Synchronisationsverlust führen.
 - *Re-Synchronisation* – Geht die Prozesssynchronisation innerhalb Phase I verloren, wird diese durch das Bahnregelungsmodul wiederhergestellt, sodass der Montageprozess innerhalb des vorgesehenen Bandabschnitts zu Ende geführt werden kann.

5.4.2 Förderbandsynchrone Montage

Innerhalb von Phase I werden die Roboterbewegungen mit der Förderbewegung der PKW-Karosse synchronisiert (3 m/min), um in der Phase II die Einfädelbewegung in den PKW-Innenraum durchzuführen und den Montagevorgang abzuschließen. Der im Rahmen dieser Arbeit definierte Nominalfall beinhaltet keine Arbeitsraumteilung zwischen Mensch und Roboter. Das Kollisionsvermeidungsmodul in der dreistufigen Roboterbahnplanung wird folglich nicht aktiviert. Der Montageprozess entstammt dem Bahnplanungsmodul (vgl. Abschnitt 4.7.2) und kann aus Abbildung 5-5 entnommen werden.

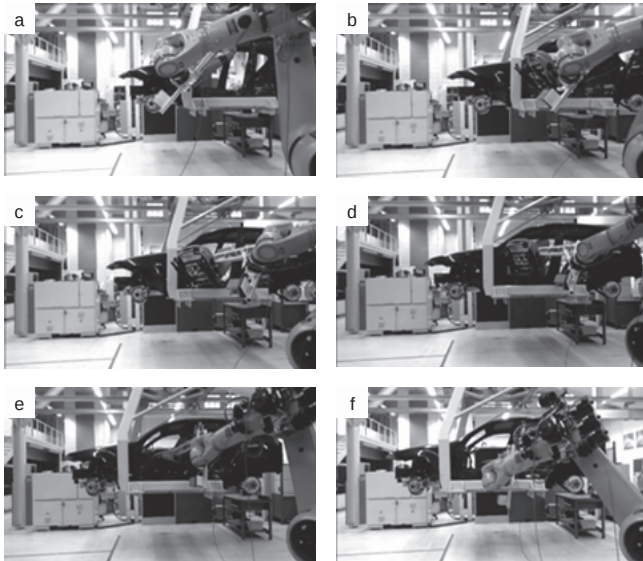


Abbildung 5-5: Bildsequenz für den nominalen Montageprozess;
 (a)-(c) Phase I: Positionierung
 (d)-(f) Phase II: Montage

5.4.3 Koexistenz

Die Koexistenz wird in Abbildung 5-6 dargestellt. In Phase I des Prozesses synchronisiert sich der Roboter mit der sich bewegenden PKW-Karosze (3 m/min) über das Bahnplanungsmodul. Gleichmaßen ist die Kameraeinheit mittels einer modellprädiktiven Regelung an die prädierten Roboterpositionen synchronisiert. Dieser anfängliche Nominalfall kann aus Abbildung 5-6 a und b und die korrespondierende Roboterbewegung in Förderrichtung (y-Richtung) kann aus Abbildung 5-7 Abschnitt 1 entnommen werden.

Abbildung 5-6 c zeigt den Eintritt einer Person in den gemeinsamen Arbeitsraum. Dieser wird durch das Kamerasystem detektiert und aktiviert dadurch Trigger im Statechart-Modell. Dies führt dazu, dass Randbedingungen für die Bahnanpassung verwendet werden, bei der die ursprüngliche Trajektorie die Gültigkeit verliert und durch Geschwindigkeitsskalierungen verändert wird. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit dem Zielobjekt (Karosze) näher zu kommen, ohne die durch den Menschen induzierte Randbedingung zu verletzen, wird

der Roboter in die Schleichfahrt versetzt und bis zum Halt verlangsamt. Das führt wiederum zu einem Synchronisationsverlust, welcher aus Abbildung 5-7 Abschnitt 2 entnommen werden kann.

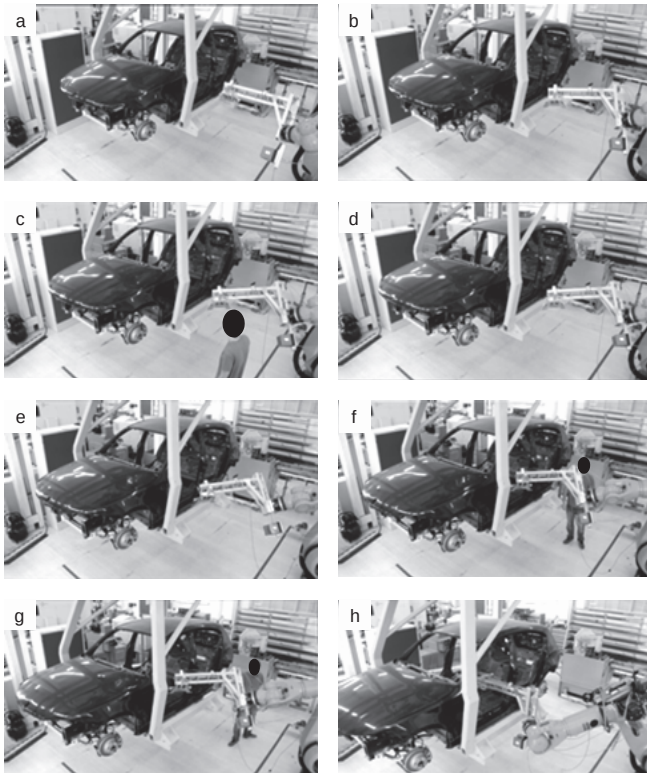
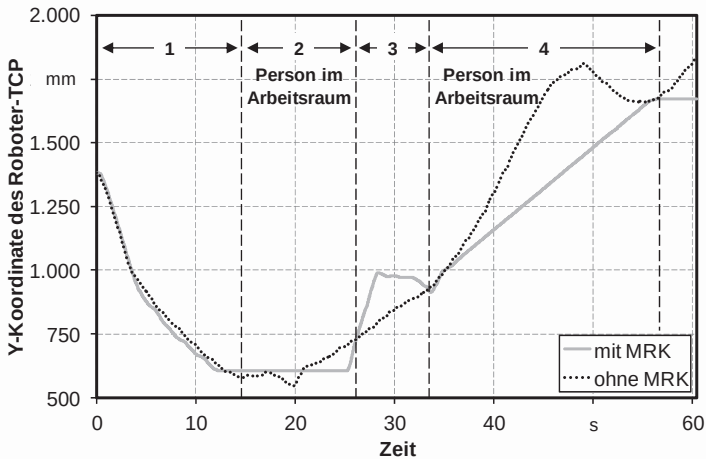


Abbildung 5-6: *Bildsequenz für die Koexistenz;
(a)-(b) Prozessesstart und Synchronisation
(c) Eintritt einer Person in Phase I in den Arbeitsraum und
Synchronisationsverlust infolge der Bahnanpassung
(d)-(e) Re-Synchronisation
(f)-(g) Eintritt einer Person in Phase II in den Arbeitsraum
und Synchronfahrt ohne Fortführung der Einbaubahn
(h) Wiederaufnahme des Montageprozesses*

Abbildung 5-6 d und e illustrieren den Austritt einer Person aus dem gemeinsamen Arbeitsraum. Das Kamerasystem detektiert keine Objekte mehr im gemein-

samen Arbeitsraum, sodass dem Bahnanpassungsmodul keine kinematischen Randbedingungen mehr unterliegen. Aufgrund des erfolgten Synchronisationsverlusts bedarf es einer Re-Synchronisation, bei der das Bahnregelungsmodul versucht innerhalb der Phase I auf die aktivierte Solltrajektorie zu gelangen. Hierzu wird, wie eingangs erwähnt, ein Interpolationsverfahren eingesetzt, bei welchem die Bewegungen der Roboterachsen entlang der linearen Schrittweite iterativ einer definierten Zielposition auf einer zukünftigen Bahn angenähert werden. Der Vorgang einer Re-Synchronisation kann der Abbildung 5-7 Abschnitt 3 entnommen werden.



- ① Synchronisierungsphase
- ② Synchronisationsverlust Roboter-Montagehauptkörper
- ③ Re-Synchronisation
- ④ Synchronfahrt

Abbildung 5-7: Vergleich der Roboterbahnkurve mit und ohne MRK

Nach Abschluss der Re-Synchronisationsphase tritt im weiteren Prozessverlauf nach Abschluss von Phase I, wie aus Abbildung 5-6 d und e zu entnehmen, eine Person wieder in den gemeinsamen Arbeitsraum ein. Neben der Randbedingung einer Nichtannäherung kann eine konventionelle Schleichfahrt aufgrund der Karosseriebewegung nicht mehr durchgeführt werden. Hierbei wird der Roboter

in eine Synchronfahrt gezwungen, bei der die Bewegungsfreiheitsgrade sowohl in globaler x - als auch in z -Richtung zur Gefährdungsreduktion blockiert werden. Hierdurch können, wie in Abbildung 5-7 Abschnitt 4 dargestellt, ein sicherheitskritischer Kontakt bzw. eine Quetschung von Werker und Industrieroboter, aber auch zwischen Montagehauptkörper und Industrieroboter vermieden werden.

Verlässt der Mitarbeiter im Anschluss den gemeinsamen Arbeitsraum, so wird, wie in Abbildung 5-6 g ersichtlich, die nominale Prozessfolge wieder aufgenommen und weitergeführt. Der Mitarbeiter kann in die Zelle eintreten und bedarfsorientiert an beiden Seiten des Roboters kleine Tätigkeiten, wie. z. B. Messungen oder auch Sichtprüfungen, durchführen. Aufgrund des flexiblen Charakters der Roboteraufgabe und -trajektorie kann der Roboter dafür sorgen, dass ein allzeit reduziertes Gefährdungsrisiko vorliegt. Die Auswirkungen eines situationsbedingten Synchronisationsverlusts können durch das dreistufige Bahnplanungsmodul limitiert werden, indem die Aufgabe zyklisch neu angepasst wird und die Re-Synchronisationsfunktion zu einer ortsflexiblen Wiederherstellung der Synchronisation zwischen Industrieroboter und Montagehauptkörper führt.

5.5 Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbetrachtung

5.5.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt sollen Methoden und Maßnahmen dargelegt werden, um die Sicherheit des Gesamtsystems zu gewährleisten und somit einen Technologietransfer in die Anwendung zu ermöglichen. Die eingangs formulierte Anforderung Standardkomponenten einzusetzen hatte das Ziel, eine hohe Übertragbarkeit der generisch entwickelten Funktionalitäten zu realisieren. Diese eingesetzten Komponenten ermöglichen jedoch keine Ausführung unter sicherheitskritischen Bedingungen. Das im Funktionsprototyp verwendete Echtzeitsystem sowie die integrierten Schnittstellen sind auf dem Gebiet der sicherheitsgerichteten Auslegung in der Form nicht zulässig. Grundsätzlich sollte daher auf bereits zertifizierte Hardware-Komponenten, wie z. B. Micro-Controller, sowie fehlersichere Kommunikationsschnittstellen (SafetyNet p oder openSAFETY) zurückgegriffen werden.

5.5.2 Erforderliche Sicherheit

Entsprechend der in der DIN EN ISO 12100 beschriebenen Methodik zur Risikobeurteilung können etwaige Gefährdungen identifiziert sowie klassifiziert werden. Ebenfalls wird von der IEC 61508 eine Safety-FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) vorgeschlagen. In der folgenden Betrachtung sollen ausschließlich die mechanischen Gefährdungen durch den Roboter weiter verfolgt werden. Gemäß der möglichen Schäden infolge von Unfällen durch den Roboter, ist nach dem Risikographen in DIN EN ISO 13849 ein Performance Level PL_r (required) von d, basierend auf Einschätzungen der Verletzungskriterien, für das System erforderlich. Dieser korrespondiert mit einem Sicherheits-Integritätslevel der Stufe 2 entsprechend der IEC 61508. Die Architektur der KRC2-Robotersteuerung entspricht bereits den gestellten Anforderungen, sodass eine weiterführende Betrachtung der vorgelagerten Operationen und Systemmodule ausreichend ist. An dieser Stelle ist erneut zu betonen, dass eine konstruktive Vermeidung aller Gefährdungen nicht realisierbar ist, sodass erweiterte Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

5.5.3 Entwicklungsmaßnahmen

Die Entwicklung sowie der Betrieb sicherheitsrelevanter Komponenten erfordert eine standardisierte und systematische Auslegung der angestrebten Systemfunktionen. Hierbei gibt die DIN EN ISO 13849 unter Beachtung der ISO 12100 sowie ISO 14121 Hinweise und bietet bewährte iterative Vorgehensmodelle, die im Rahmen einer Systemgestaltung einzuhalten und zu dokumentieren sind.

Die vollständige Nachvollziehbarkeit der verwendeten Algorithmen innerhalb sicherheitsbezogener eingebetteter Systeme ist unbedingt erforderlich, um Wartungen oder Systemaktualisierungen durchführen zu können. Dies setzt ebenfalls die durchgängige Transparenz der sicherheitsgerichteten Funktionen voraus und schließt folglich die Integration von offenen System- oder Funktionsbibliotheken aus, deren struktureller Aufbau, Lesbarkeit sowie Verständlichkeit oftmals nicht in vollem Umfang vorliegen und somit die nachweisliche Sicherheit nicht gewährleistet werden kann.

5.5.4 Auslegung

Nach SMITH & SIMPSON (2004) kann anhand des geforderten Performance Levels PL_r die erforderliche Architektur abgeleitet werden. In diesem Fall muss mindes-

tens eine Struktur der Kategorie 2 bis 4 vorliegen, um einen Performance Level d abbilden zu können (vgl. Abbildung 5-8). Entsprechend DIN EN ISO 13849 erfolgt die Charakterisierung der Kategorien hinsichtlich dreier Eingangsgrößen:

- *Mittlere Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall $MTTF_d$* – Die $MTTF_d$ ist eine Kennzahl und repräsentiert den Kehrwert der Ausfallrate. Ein gefahrbringender Ausfall bedeutet den Verlust der Sicherheitsfunktionalität. Ein Vorgehen zur quantitativen Ermittlung dieses Werts innerhalb einer Architektur ist das Parts-Count Verfahren (SMITH & SIMPSON 2004), bei dem mittels eines Blockschaltbilds die herstellerseitig angegebenen Einzelausfallraten der verwendeten Komponenten zu einer mittleren Gesamtausfallrate kombiniert wird.
- *Diagnosedeckungsgrad DC_{avg}* – Der DC_{avg} wird als Fehlererkennungsrate innerhalb des Systems verstanden und gibt an, wie effizient die durchgeführten Systemtests sind. Er wird durch das Verhältnis aus erkannten gefahrbringenden Fehlern zu allen gefahrbringenden Fehlern ermittelt.
- *Fehler gemeinsamer Ursache CCF* – Der CCF bezeichnet Ausfälle mehrerer Komponenten infolge einer einzelnen Fehlerursache. Die seitens der DIN EN ISO 13849 vorgeschlagenen Maßnahmen werden mittels einer Punkteverteilung bewertet und nach vollständiger Umsetzung aufsummiert. Zur Erfüllung des CCF -Kriteriums sind 65 von 100 möglichen Punkten nachweislich zu erreichen.

Aus Abbildung 5-8 kann entnommen werden, dass eine einkanalige Ausführung ausreicht, um den erforderlichen Performance Level d zu erreichen. Hierfür bedarf es einer konkreten Betrachtung der drei Eingangsgrößen.

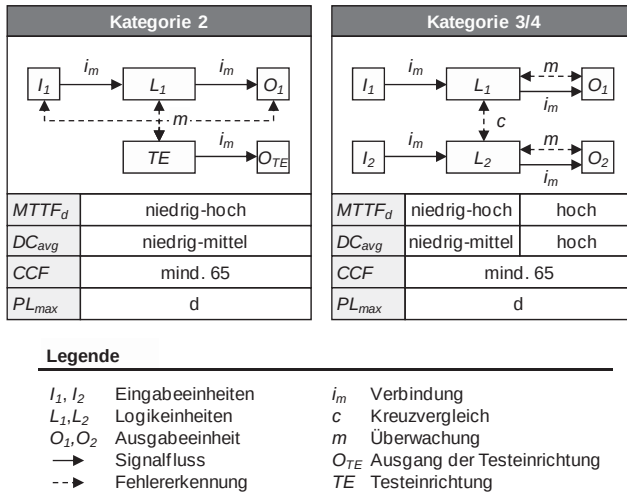


Abbildung 5-8: Schematische Architekturen für Sicherheitskategorie 2 und 3/4 mit denen ein Performance Level d erreicht werden kann

5.5.5 Testroutinen

Die Integration von logischen Testroutinen stellt eine übergreifend bewährte Maßnahme dar, um die erforderliche Verfügbarkeit eines Gesamtsystems, bestehend aus mehreren Einzelsystemen, zur Erfüllung einer sicherheitsgerichteten Funktion zu gewährleisten (KOVÁCS ET AL. 2006). Demnach sind unter anderem folgende Prüfverfahren in das Anlagenkonzept zu integrieren:

- *Initial test* – Vor jedem Programmstart erfolgt eine Selbstüberprüfung der integrierten Logik und Rechenschritte anhand vordefinierter Kontrolltabellen mit definierten Erwartungswerten. Diese umfasst neben den Transformationsmatrizen ebenfalls die Optimierungsfunktion für die Bahnanpassung.
- *Idle test* – Innerhalb von Nebenzeiten können wiederkehrende Programmtests mittels Dummy-Werten durchgeführt werden, die im Roboterstillstand aufgerufen werden und folglich keinen Einfluss auf das Gesamtgefährdungsrisiko der Anlage haben. Hierdurch kann zur Systemlaufzeit die korrekte Funktionalität der Operationen bestätigt und somit eventuelle Komponentenfehler identifiziert werden.

- *Cross functional test* – Die Einbindung einer diversitären Redundanz ermöglicht den kreuzweisen Vergleich von Zwischenwerten, wie z. B. der ermittelten Roboter gelenksollgeschwindigkeiten, innerhalb des Prozessablaufs. Durch diesen zyklischen Abgleich können neben zeitlichen Verzögerungen innerhalb der Datenverarbeitung infolge der Kommunikationsarchitektur ebenfalls Speicherfehler detektiert werden.

5.6 Fazit

Kapitel 5 beschreibt die Realisierung des Systems für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage am Beispiel einer roboterbasierten Vordersitzmontage. Das zentrale Element stellt ein Echtzeitsystem dar. Dieses ist sowohl für die Signalverarbeitung als auch für die Robotersteuerung zuständig. Ein wichtiger Aspekt innerhalb der Realisierung ist der durchgängige Einsatz handelsüblicher Komponenten und die Verwendung von standardisierten Informationsschnittstellen und Protokollen für die Kommunikation zwischen den beteiligten Komponenten.

Die ausgeführte Roboterbahn wird durch ein dreistufiges Vorgehen online ermittelt und basiert auf der Modifikation einer vorhandenen Referenzbahn. Durch die Erfassung des Menschen im Arbeitsraum und der Position des Montagehauptkörpers wird die Regelungsaufgabe kontinuierlich zustandsbasiert aktualisiert und auf den Roboter übertragen.

Unter Einsatz einer modellbasierten Kamerasynchronisation an den TCP des Roboters kann das Risiko einer Verdeckung des zu überwachenden Raums innerhalb des Bandsegments minimiert und die Arbeitsraumüberwachung mittels geringen Hardware-Aufwands realisiert werden.

Die Kombination der Module Bahnregelung und Bahnanpassung für den Roboter ermöglicht einen adaptiven ortsflexiblen Montageprozess ohne die Verwendung statischer Fixpunkte im Raum. Sicherheitsbedingte Abweichungen vom Nominalprozess infolge eines bevorstehenden Kontakts zwischen Roboter und Mensch werden vom System ausgeglichen, sodass ein sicherheits- und prozesskritischer Not-Halt vermieden werden kann.

Das Kapitel schließt mit einer Sicherheitsbetrachtung am Beispiel des realisierten Prototyps anhand einschlägig normativer Vorgehensmodelle und beinhaltet konkrete Umsetzungsmaßnahmen.

6 Bewertung

6.1 Allgemeines

Die Evaluation des Gesamtsystems zur Absicherung technischer Funktionalitäten in Hinblick auf die vorab formulierten Anforderungskriterien dient als erster Bewertungsschritt. Gleichmaßen erfordert dies die Betrachtung der wirtschaftlichen Effizienz unter Zugrundelegung vergleichbarer Alternativszenarien.

Zur Beurteilung des wirtschaftlichen Systemeinsatzes ist es von besonderer Bedeutung, Alternativen gegeneinander abzuwägen, um somit eine gut fundierte Investitionsentscheidung fällen zu können. Für die durchgängige Beurteilung einzelner Investitionsoptionen werden anhand definierter Randbedingungen und Annahmen Kostenrechnungen durchgeführt. Darauf basierend erfolgt die Gegenüberstellung der jeweiligen wirtschaftlichen Kennzahlen als Indikator für einen effektiven Kapitaleinsatz. Im Folgenden sollen drei Alternativen miteinander verglichen werden:

- *Manuelle Montage (M)* – Die manuelle Montage spiegelt den aktuellen Stand der Technik in der automobilen Endmontage wider, in der alle Arbeitsschritte von Mitarbeitern mittels Einsatzes von Handhabungsgeräten, wie z. B. Balancern, durchgeführt werden. Pro durchzuführende Aufgabe ist ein Bandabschnitt entsprechend einer Karosserielänge erforderlich.
- *Vollautomation (A)* – Eine konstante Förderbewegung des Montagehauptkörpers ermöglicht eine förderbandsynchrone Montage. Da keine Arbeitsraumteilung vorgesehen ist, muss die Zelle mittels Schutzzäunen o. Ä. gegen einen Werkereintritt abgesichert sein. Befindet sich der Roboter auf einer Linearachse, so ist der benötigte Bandabschnitt, aufgrund der Sicherheitszonen, länger als die effektive Taktlänge. Die Inspektionsaufgaben werden entweder an einer vor- oder nachgelagerten Arbeitsstation durchgeführt.
- *MRK in der Fließmontage (MRK)* – Die Arbeitsraumteilung innerhalb einer kontinuierlichen Fließmontage charakterisiert diese Alternative. Durch die Integration einer berührungslosen Arbeitsraumüberwachung können die manuellen Inspektionsaufgaben parallel in einem sich überlappenden Bandbereich durchgeführt werden. Der erforderliche Flächenbedarf entspricht der effektiven Taktlänge.

Neben der Funktionserfüllung sowie der Wirtschaftlichkeit stellen monetär nicht bewertbare Größen, wie z. B. die Flexibilitätssteigerung, eine wichtige Position dar. Jedoch sind diese nur bedingt quantifizierbar und es ist äußerst diffizil diese in eine vergleichbare Einheit zu formulieren (NYHUIS ET AL. 2008). Die Anwendung eines komparativen Vergleichs bietet sich in diesem Fall an, um Realisierungsalternativen in Bezug auf einen Status quo gegeneinander abzuwägen und so deren Flexibilitätsattribute anhand relativer Faktoren erfassen zu können.

6.2 Technische Bewertung

6.2.1 Funktionsbewertung

Im Folgenden werden die funktionalen Vorteile des MRK-Systems aufgezeigt und diskutiert:

- *Ortsflexible förderbandsynchrone Montage* – Die roboterbasierte Montage erfolgt förderbandsynchron, sodass auf Pufferzonen für den Ein- und Auslauf verzichtet werden kann (WERNER 2009). Die Synchronisation zwischen dem Roboter und dem Montagehauptkörper erfolgt ortsflexibel, sodass für den Start des Montageprozesses keine definierte Warteposition angefahren werden muss. Dadurch wird ebenfalls die positionsunabhängige Re-Synchronisation ermöglicht, bei der nach einem Synchronisationsverlust diese umgehend wiederhergestellt werden kann. Diese Funktion wird durch die Arbeitsraumbegrenzung des Roboters limitiert, sodass nach Überschreiten einer maximalen Verzögerungszeit der Montageprozess nicht weiter fortgeführt werden kann.
- *Kollisionsvermeidung* – Die Sicherheitsfunktion ist für die Detektion einer Person im Arbeitsraum geeignet, indem diese Informationen für die Bahnanpassung verwendet werden. Dieser Ansatz der synchronisierten Arbeitsraumüberwachung hat das Ziel, eine berührungslose Mensch-Roboter-Koexistenz in einem ortsflexiblen Arbeitsraum zu ermöglichen. Die Bahnanpassung wird formal durch Optimierungsgrenzen eingeschränkt, um ein beliebiges – und möglicherweise unvorhersehbares – Umfahren infolge der Kollisionsvermeidung auszuschließen. Die Approximation des Menschen durch einfache Geometrieprimitiva ermöglicht eine schnelle Berechnung zur Laufzeit, limitiert jedoch die eindeutige Unterscheidung der Arme vom Torso. Durch die laufende Geschwindigkeitsanpassung ist

eine, im Vergleich zu berührenden Systemen, höhere Systemakzeptanz zu erwarten, da Werker in ihrer Aufgabendurchführung nicht beeinträchtigt und beeinflusst werden. Ist ein physischer Kontakt im Arbeitsraum erwünscht, so müssen die zusätzlichen Gefährdungen explizit analysiert und in einem erweiterten Ansatz mit berücksichtigt werden.

- *Synchronisation* – Bezogen auf den Montageprozess müssen variable Bandgeschwindigkeiten sowie Kollisionen zwischen dem Roboter und dem Montagehauptkörper betrachtet werden. Ersteres wird durch eine kontinuierliche Positionssynchronisation entschärft. Infolge eines detektierten Fehlers innerhalb der Positionserfassung sowohl von System I als auch System II im Sinne eines störungstoleranten Sensorsystems (WERNER 2012), muss ein kontrolliertes (synchronisiertes) Stillsetzen von Montagehauptkörper und Roboter eingeleitet werden, da sowohl prozesseitige als auch sicherheitstechnische Grundfunktionalitäten nicht mehr gewährleistet werden können. Bei dynamischen Roboterbewegungen darf die kumulierte Nachgiebigkeit des Endeffektors von max. ± 10 mm (Durchbiegung und Torsion) nicht vernachlässigt werden.
- *Tätigkeitsidentifikation* – Die Erkennung menschlicher Tätigkeiten bildet eine Grundvoraussetzung zur koordinierten Arbeitsraumeilung innerhalb der Mensch-Roboter-Koexistenz. Der Aspekt der Koordination lässt sich bei einfachen kurzen Tätigkeiten über eine Ablaufsteuerung realisieren. Bei komplexen längeren Tätigkeiten mit variablen Abläufen und Reihenfolgen der Einzeltätigkeiten ist der Einsatz von Lernverfahren zur Erfassung von Tätigkeitssequenzen notwendig, um den aktuellen Tätigkeitsfortschritt für den Roboter beobachtbar zu machen. Neben der Wiedererkennung einer gelernten Tätigkeit bietet dieses Verfahren ebenfalls die Möglichkeit, Tätigkeiten zu generalisieren, um somit subjektive Ausprägungen bei der Aufgabendurchführung zu berücksichtigen. Dies verspricht eine individuelle Koexistenz und eine Anpassung des Arbeitsplatzes an unterschiedliche Mitarbeiterpräferenzen.
- *Sicherheit* – Das prototypisch umgesetzte Systemkonzept berücksichtigt grundlegende normative Richtlinien für die MRK. Entsprechend der ISO 13849 ist eine qualitative Bewertung der integrierten Sicherheitsfunktionen notwendig. Die anzunehmende Gefährdungsstufe für alle möglichen Gefahren entspricht den Kategorien c oder d. Daher ist sowohl eine sensorische Arbeitsraumüberwachung, eine sichere Robotersteuerung sowie ei-

ne diversitär redundante Informationsverarbeitung innerhalb des Anlagenkonzepts (vgl. Abschnitt 5.5) erforderlich.

6.2.2 Flexibilitätsbewertung

Im Folgenden werden die Flexibilitätsvorteile einer MRK innerhalb der Fließmontage in einem relativen Vergleich mit den beiden eingangs erwähnten Alternativen manuelle Montage und Vollautomation evaluiert.

- *Flächenproduktivität* – Der Verzicht auf trennende Schutzeinrichtungen führt zu einer effektiveren Flächennutzung sowie zu einer erhöhten Flächenproduktivität. Infolge überlappender Arbeitsbereiche kann eine vereinfachte Prozessplanung für variantenreiche Montagesysteme mit variierenden Arbeitsinhalten durchgeführt werden. Diese Eigenschaft lässt eine optimierte übergreifende Kapazitätsauslastung erwarten und führt zu weiteren direkten Kostenvorteilen.
- *Störungstoleranz* – Die Möglichkeit Störungen, wie z. B. Bandstillstände, innerhalb der Endmontage bei Werkereintritt zu vermeiden, bietet einen entscheidenden Vorteil gegenüber konventionellen Automationslösungen, die sicherheitskritische Situationen durch einen Nothalt entschärfen. So können Driftbereiche für Mitarbeiter flussauf- oder -abwärts flexibler ausgelegt und in Anspruch genommen werden, um komplexe Tätigkeiten vorzubereiten, aufzuholen oder um Nacharbeiten durchzuführen. Die Möglichkeit für den Roboter eine beschriebene Aufgabe laufend zu aktualisieren verschafft dem Montagesystem die Fähigkeit, auf ungeplante Situationen innerhalb der Linie reagieren zu können.
- *Mitarbeiterorientierung* – Durch die Einbindung eines Roboters in die Montagelinie ist eine Reduzierung der Arbeitsbelastung zu erwarten. Neben einer Verringerung des Banddrucks sinkt darüber hinaus ebenfalls die physische Belastung durch die angepassten Aufgabeninhalte, sodass die manuellen Tätigkeiten in der Summe ergonomischer werden. Damit einhergehend ist das System aufgrund der gestiegenen Zeitspreizungsoption zum Anlernen von Mitarbeitern besser geeignet. Eine Aneinanderreihung mehrerer Koexistenz-Stationen birgt zudem das Potenzial, höherwertigere Arbeitsplätze bei gleichbleibender Produktivität zu realisieren und führt somit zu einer gesteigerten Mitarbeiterzufriedenheit.

- *Inbetriebnahme und Konfiguration* – Ein Vorteil ist die Nutzung von Umgebungsmodellen innerhalb der MRK. Veränderungen innerhalb der Linie und der direkten Umgebung erfordern keine aufwendigen Programmänderungen, sodass Anpassungen der Randbedingungen das Rahmenwerk nicht verändern und dadurch die im Statechart spezifizierten Funktionalitäten nicht betroffen sind. Des Weiteren führt der Einsatz beweglicher Kamerasysteme innerhalb einer Fließmontagelinie zu einem aufwandsarmen Sensoreinsatz und stellt somit, im Vergleich zu einem Mehrkamerasystem entlang der kompletten Montagelinie, eine kostengünstige Lösung dar.
- *Universalität und Erweiterbarkeit* – Ein wichtiger Aspekt im Systementwurf ist die generische Lösungsbeschreibung, sodass ein Transfer des Systemkonzepts auf andere Montageaufgaben möglich ist. Gleichermäßen bietet die Funktion der Kollisionsvermeidung ebenfalls die Möglichkeit einen zweiten Industrieroboter hinzuzufügen, um eine flexible und gleichermaßen produktive Roboter-Roboter-Koexistenz zu realisieren. Diese birgt den Vorteil, dass die steuerungstechnische Integration von Timing-Aufgaben zur Koordination und Kollisionsvermeidung vermieden werden kann, da durch die produktunabhängige Online-Bahnanpassung diese automatisiert im Hintergrund durchgeführt wird.

Aus Tabelle 6-1 lässt sich ableiten, dass die MRK innerhalb der Fließmontage gegenüber der manuellen Montage Vorteile hinsichtlich der erwähnten Aspekte aufweist. Neben einer erhöhten Flächenproduktivität ist ebenfalls die gestiegene Störungstoleranz (insbesondere im Vergleich zur Vollautomation) zu nennen, die eine höhere Spreizung von Tätigkeiten zur Abdeckung variantenreicher und ungeplanter Tätigkeiten ermöglicht. Dies führt insbesondere zu einer robusteren Produktanlaufphase, bei der die Prozesssicherheit noch nicht das Nominalniveau erreicht hat, die laufenden Betriebskosten hingegen bereits vollständig anfallen.

Tabelle 6-1: *Relative Flexibilitätsbewertung der Realisierungsalternativen*

	M	A	MRK
Flächenproduktivität	⇒	↘	↗
Störungstoleranz	⇒	↘	↗
Mitarbeiterorientierung	⇒	⇒	↗
Inbetriebnahme und Konfiguration	⇒	↘	↗
Universalität und Erweiterbarkeit	⇒	⇒	↗

Legende

⇒ Referenz ↘ flexibler ↗ inflexibler

6.3 Wirtschaftliche Bewertung

6.3.1 Kostenstruktur

Bei der monetären Bewertung soll zunächst ein Betrachtungsrahmen festgelegt werden, mit dem ein quantitativer Vergleich möglich ist. Daher soll zunächst auf die Kostenstruktur der Investitionsentscheidung eingegangen werden. Anhand folgender Punkte kann eine einheitliche Struktur für die nachfolgende Betrachtung geschaffen werden:

Fixkosten

- Hardwarekosten
- Realisierungskosten

Variable Kosten

- Betriebskosten

Die Fixkosten teilen sich in die Punkte Hardwarekosten (HK), welche die zu tätigende Investition repräsentiert, und die damit einhergehenden Realisierungs-kosten (RK) auf. Diese beschreiben, als relativer Anteil der Hardwarekosten, die erforderlichen Realisierungsumfänge in Form von Programmierung (30%), Inbetriebnahme (10%) und Projektierung (15%) und schließen ebenso zusätzliche Aufwände für Tests, Freigabe und Dokumentation mit ein (vgl. Tabelle 6-2). Aus

der Betrachtung ausgeschlossen werden variantenunabhängige Investitionen, wie die Anlagentechnik mitsamt der Förderstrecke, die für alle drei Varianten gelten und folglich als Zwangsinvestition betrachtet werden kann.

Tabelle 6-2: Kostenübersicht der Realisierungsalternativen

	Manuelle Montage	Voll- automation	MRK
Hardwarekosten (HK)			
Roboter mit sicherer Steuerung	- €	60.000,00 €	60.000,00 €
Endeffektor / Balancer	25.000,00 €	10.000,00 €	10.000,00 €
Sensor (Arbeitsraumüberwachung)	- €	- €	50.000,00 €
Laserscanner	- €	- €	5.000,00 €
Werkzeuge (z.B. Messmittel)	10.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €
Schutzzäune	- €	15.000,00 €	- €
Steuerung	- €	- €	10.000,00 €
Software-Lizenzen	- €	- €	10.000,00 €
ZS Hardwarekosten	35.000,00 €	90.000,00 €	150.000,00 €
Realisierungskosten (RK)			
Programmierkosten (30% HK)	10.500,00 €	27.000,00 €	45.000,00 €
Inbetriebnahmekosten (10% HK)	3.500,00 €	9.000,00 €	15.000,00 €
Projektierung (15% HK)	5.250,00 €	13.500,00 €	22.500,00 €
ZS Realisierungskosten	19.250,00 €	49.500,00 €	82.500,00 €
Fixkosten	54.250,00 €	139.500,00 €	232.500,00 €
Betriebskosten (BK)			
Personalkosten (50.000 € p. MA, 3-Schicht)	300.000,00 €	150.000,00 €	200.000,00 €
Wartungskosten (5% HK)	1.750,00 €	4.500,00 €	7.500,00 €
Raumkosten (25.000 € pro Station)	50.000,00 €	50.000,00 €	25.000,00 €
Verzinsung (10% HK)	1.750,00 €	4.500,00 €	7.500,00 €
Abschreibung (Nutzungsdauer 5 a)	7.000,00 €	18.000,00 €	30.000,00 €
Energie, Betriebsstoffe (5% HK)	1.750,00 €	4.500,00 €	7.500,00 €
ZS Betriebskosten	362.250,00 €	231.500,00 €	277.500,00 €
Laufende Kosten pro Jahr	362.250,00 €	231.500,00 €	277.500,00 €

Aus der Kostenübersicht in Tabelle 6-2 wird anhand der aufgeführten Positionen die hohe Kapitalbindung beim Robotereinsatz (Vollautomation sowie MRK), bei gleichermaßen geringen Betriebskosten (BK), ersichtlich. Die Unterschiede bei den laufenden Kosten, bei einem angenommenen 3-Schicht-Betrieb, begründen sich durch die Diskrepanz im Personalbedarf. Während in der manuellen Variante sowohl die Montage- als auch die Inspektionsaufgabe vom Werker durchgeführt wird, erfolgt bei den Alternativen A und MRK nur die Inspektionsaufgabe manuell. Gleichermäßen führt die hohe Kapitalbindung bei diesen beiden Alternativen, bei einer Nutzungsdauer von fünf Jahren, zu höheren Kapitalkosten in Form von Zins- als auch Abschreibungskosten. Ein weiterer Unterschied liegt in

den Raumkosten, die aufgrund der höheren Flächenproduktivität der MRK-Variante dort ebenfalls einen geringeren Wert darstellen.

6.3.2 Kostenvergleichsrechnung

Zum Vergleich der vorliegenden Alternativen dient eine Kostenvergleichsrechnung unter Betrachtung der getroffenen Annahmen. Hierbei muss als Prämisse gelten, dass die Ausbringung aller drei Alternativen gleich ist, sodass eine reine Fokussierung auf die Kosten zulässig ist (BECKER 2013). Der Rechnung zugrunde liegt eine lineare Abschreibung bei einer 5-jährigen Nutzungsdauer ohne signifikanten Liquidationsresterlös. Mittels

$$K = HK + RK + BK * n \quad (6-1)$$

K Kostenwert
 HK Hardwarekosten
 RK Realisierungskosten
 BK Betriebskosten
 n Nutzungsdauer

wird der kumulierte Kostenwert über den kompletten Nutzungszeitraum bestimmt, welcher in Abbildung 6-1 für das betrachtete Beispiel dargestellt ist.

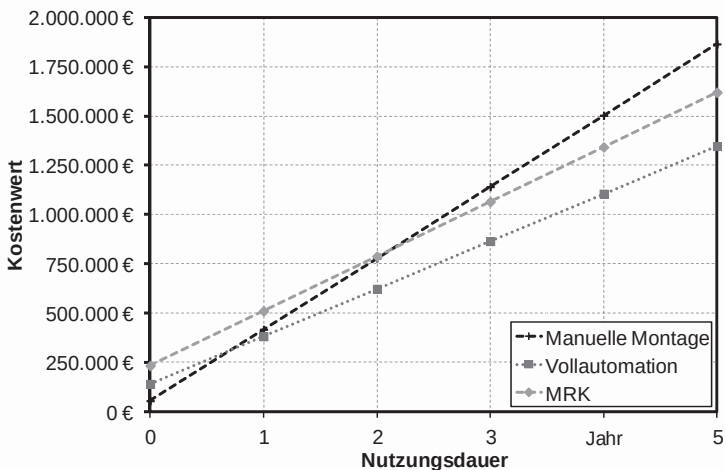


Abbildung 6-1: Kostenwertvergleich über den Nutzungszeitraum

Anhand des kumulierten Kostenwerts aller drei Varianten über die prognostizierte Nutzungsdauer von fünf Jahren wird deutlich, dass die MRK-Variante einen geldwerten Vorteil gegenüber der manuellen Montage nach dem zweiten Jahr aufweist, jedoch gegenüber der Vollautomation aufgrund höherer Hardware- und Betriebskosten im Nachteil ist. Dies bestätigt die grundsätzliche Annahme, dass eine Vollautomation bei einer langen Serienproduktion die wirtschaftlich attraktivste Option darstellt.

Vorerst nicht berücksichtigt wurde der Aspekt, dass sowohl in der manuellen Montage als auch in der MRK-Variante im Falle von Nacharbeiten oder variierenden Arbeitsumfängen diese Tätigkeiten einfach in das bestehende System integriert werden können, wohingegen dieses bei der Vollautomation, aufgrund trennender Schutzeinrichtungen, nicht möglich ist. Dieser Aspekt wird im Abschnitt 6.3.5 noch untersucht.

6.3.3 Kosteneinfluss Personal

Im Folgenden wird am realisierten Beispielszenario die Wirtschaftlichkeit der Investitionsalternativen miteinander verglichen mit dem Ziel, allgemeingültige Aussagen abzuleiten. Abbildung 6-2 illustriert das Ergebnis der konventionellen Kostenvergleichsrechnung in Abhängigkeit der Personalkosten (100% entspricht 50.000 € / MA-Jahr) für die MRK-Variante im Vergleich zur manuellen Montage.

Es zeigt sich, dass eine starke Abhängigkeit von den Personalkosten vorliegt. Daher werden zur differenzierteren Betrachtung drei Bereiche eingeführt, die im Folgenden detaillierter beschrieben werden:

- *Bereich I* – Der erste Bereich betrachtet industrialisierte Wirtschaftsregionen, wie z. B. Westeuropa und Nordamerika. Der zunehmende Fachkräftemangel als direkte Folge des demographischen Wandels führt unmittelbar zu einem kontinuierlichen Anstieg der Personalkosten. Daher ist anzunehmen, dass die Personalkosten einen verstärkten Einfluss auf diese Standorte haben werden, sodass die Amortisierungsdauer maximal bei 1,5 Jahren liegt.
- *Bereich II* – Der zweite Bereich repräsentiert Wirtschaftsregionen unter dem europäischen Durchschnitts-Lohnniveau. Beispielhaft sind z. B. osteuropäische Staaten zu nennen. Mit einer kalkulatorischen Amortisationsdauer zwischen 1,5 – 2,5 Jahren stellt die Investition keine attraktive Op-

tion dar. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich infolge wirtschaftlicher Entwicklungen die Lohnkosten dem Bereich I zunehmend angleichen, sodass eine gleitende Automatisierung der Fertigung ein essentielles Mittel darstellt, diesen Standort für die Folgeproduktgeneration ebenfalls konkurrenzfähig zu gestalten.

- **Bereich III** – Der dritte Bereich entspricht den BRICs. Hier ist die Investitionstätigkeit am unattraktivsten und wird erst relevant sobald das Lohnniveau innerhalb der Regionen einen Schwellwert von ca. 50% von Bereich I erreicht hat, sodass ein Amortisationszeitraum von knapp 3 Jahren möglich ist.

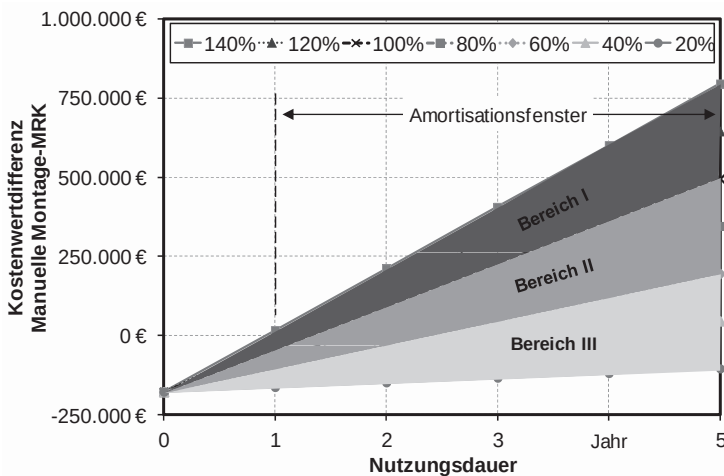


Abbildung 6-2: Kostenwertdifferenz für eine MRK-Variante im Vergleich zur manuellen Montage in Abhängigkeit variabler Personalkostenniveaus (100% = 50.000 €/a)

Es wird deutlich, dass die MRK-Variante in den Bereichen I und II einen wirtschaftlichen Vorteil im Vergleich zur manuellen Montage besitzt und ein Betrieb nur in diesen Bereichen sinnvoll ist. Unterstützt wird dies durch den Aspekt der erforderlichen Mitarbeiterqualifikation für den Betrieb eines MRK-Systems, welcher in den Bereichen I und II aufgrund der industriellen Durchdringung als durchschnittlich höher einzustufen ist.

6.3.4 Kosteneinfluss Hardware

Am Beispiel einer MRK ist es ersichtlich, dass das Anlagenkonzept einen höheren Hardware- und Investitionsaufwand als die manuelle Montage mit sich zieht. Daher soll im Folgenden eine detaillierte Betrachtung zur Identifikation eines Grenzkostensatzes erfolgen (vgl. Abbildung 6-3), um eine differenziertere Aussage zur wirtschaftlichen Attraktivität der dargestellten Systemlösung treffen zu können.

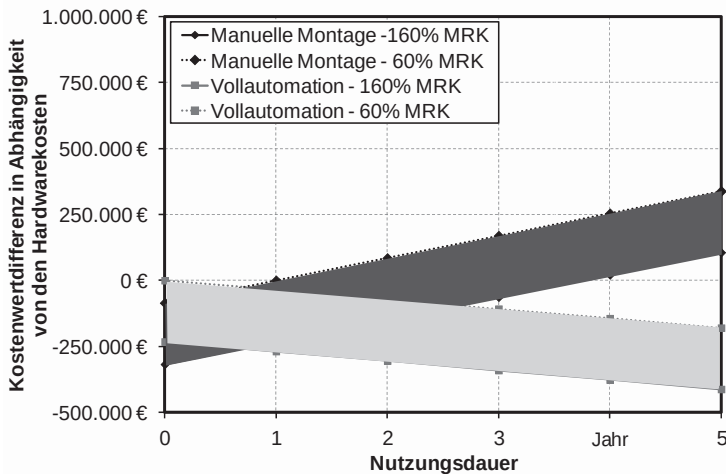


Abbildung 6-3: Kostenwertdifferenz für eine MRK im Vergleich mit der manuellen Montage und der Vollautomation in Abhängigkeit unterschiedlicher Fixkostenniveaus

Abbildung 6-3 zeigt die Kostendifferenz in Abhängigkeit relativer Fixkosten innerhalb eines Preiskorridors von +60 % und -40 % zur Realisierung der MRK-Variante. Hierdurch können Skaleneffekte bei der monetären Evaluation bei einem produktionsweiten Roll-Out im Vergleich zu einer Einzelplatzentscheidung berücksichtigt werden. Aus dieser Betrachtung können zwei Grenzfälle in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit abgeleitet werden:

- Selbst bei erhöhten Anschaffungs- und Realisierungskosten (+60 %) kann die Wirtschaftlichkeit des betrachteten MRK-Systems im Vergleich zur manuellen Montage aufgrund des zuvor beschriebenen Betriebskosteneffekts als gegeben angesehen werden. Hieraus ergibt sich sogar für die

MRK-Variante mit +60 % Realisierungskosten ein zu erwartender Amortisationszeitraum von unter 4 Jahren.

- Unter der Annahme, dass die Mehrkosten zwischen MRK und Vollautomation zum Großteil durch die Sensoren, die Sicherheitstechnik sowie deren Programmierung und Inbetriebnahme veranschlagt werden, lässt sich ableiten, dass die MRK-Variante im Vergleich zur Vollautomation allgemein unwirtschaftlicher erscheint. Dieser Effekt wird durch steigende Fixkosten weiter verstärkt. Es ist erkennbar, dass eine Kostenwertdifferenz von ca. 250.000 € zwischen einer MRK-Variante und einer Vollautomation bis zum dritten Betriebsjahr vorliegt, die es gilt im Folgenden näher zu betrachten.

6.3.5 Kosteneinfluss Verfügbarkeit

Im Falle erforderlicher Nacharbeiten oder variabler Arbeitsumfänge infolge von Produktveränderungen ist entlang des Produktlebenszyklus mit zusätzlichen Kosten zu rechnen. Hierfür ist eine Fallunterscheidung vorzunehmen:

- *Manuelle Montage* – Innerhalb der manuellen Montage werden zusätzliche Arbeitsumfänge durch einen flexiblen Springereinsatz realisiert, sodass im Wesentlichen nur Personalkosten entstehen.
- *Vollautomation* – Der Einsatz trennender Sicherheitseinrichtungen limitiert einen Springereinsatz. Um dennoch Nacharbeiten durchführen zu können sind folglich zwei Möglichkeiten gegeben:
 - *Bandstillstand* – Ein Stillsetzen des Montagebandes ermöglicht die Integration zusätzlicher ungeplanter Tätigkeitsumfänge durch Werker.
 - *Pufferstationen* – Zusätzliche Arbeitsumfänge können an ausgewählten Pufferstationen mit Ein- und Auslaufstation von Werkern durchgeführt werden. Diese Stationen müssen folglich vorab geplant und bereitgehalten werden. Des Weiteren limitiert die konsequente Einhaltung des Montagevorranggraphs die Einsatzmöglichkeit dieser Lösung.
- *Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage* – Innerhalb der MRK-Variante erfolgt die Integration variabler Arbeitsumfänge analog zur manuellen Montage.

Tabelle 6-3 gibt einen Überblick über die Kostenpunkte infolge zusätzlicher ungeplanter Arbeitsumfänge. Die bei der Vollautomation resultierenden Stillstandskosten (SK) beziehen sich auf die Betriebskosten der vor- und nachgelagerten Bandsegmente. Diese werden oftmals in Bandsegmenteinheiten bestehend aus fünf Segmenten mit anschließendem Puffer zusammengefasst (KRATZSCH 2000). So hat ein Verfügbarkeitsdefizit eines Segments eine Auswirkung auf die gesamte Einheit und bei Pufferleerlauf ebenfalls auch auf vor- und nachgelagerte Einheiten.

Tabelle 6-3: Kostenpunkte durch zusätzliche Arbeitsumfänge

	Vollautomation	MRK
Verfügbarkeit		
Verfügbarkeit pro Bandsegmenteinheit ohne MRK	99,50%	
Anzahl Bandsegmenteinheiten*	11 + 0	10 + 1
Verfügbarkeitsbereich einer Automationsstation**	99,50% - 97,50%	
Betriebskosten (pro Jahr und Bandeinheit)		
Betriebskosten (mit einer Automations-/MRK-Station)	840.000,00 €	1.000.000,00 €
Betriebskosten (rein manuell)	900.000,00 €	

* Segmenteinheiten manuell + Segmenteinheiten mit einer Automations- / MRK-Station

** eine Segmenteinheit infolge Nacharbeit bzw. variierender Tätigkeiten

Unter der Annahme, dass die an den Nachbarstationen rein manuelle Tätigkeiten durchgeführt werden, ergibt sich hieraus ein Jahresbetriebskostensatz von ca. 180 T€ pro Station und folglich ein Betriebskostensatz von ca. 900 T€ pro Bandeinheit (vgl. Tabelle 6-2). Demnach kann aus einer Verfügbarkeitsbetrachtung basierend auf den in Tabelle 6-3 dargestellten Annahmen geschlussfolgert werden, dass eine Verfügbarkeitsdifferenz von 1 % zwischen einer MRK-Station und Automationsstation Stillstandskosten von ca. 95 T€ zur Folge haben kann (vgl. Abbildung 6-4).

Berücksichtigt man dieses Flexibilitätspotenzial in der Kostenvergleichsrechnung aus Abschnitt 6.3.2, so ergibt sich auf dieser Basis Abbildung 6-5. Der Kostenwertkorridor repräsentiert die Kostenstreuung für die Vollautomation in Abhängigkeit von einer Verfügbarkeitsänderung von 1 %. Hieraus wird ersichtlich, dass der wirtschaftliche Vorteil einer MRK-Variante im direkten Vergleich zur Vollautomation gegeben ist und mit steigender Anzahl an Bandsegmenten steigt.

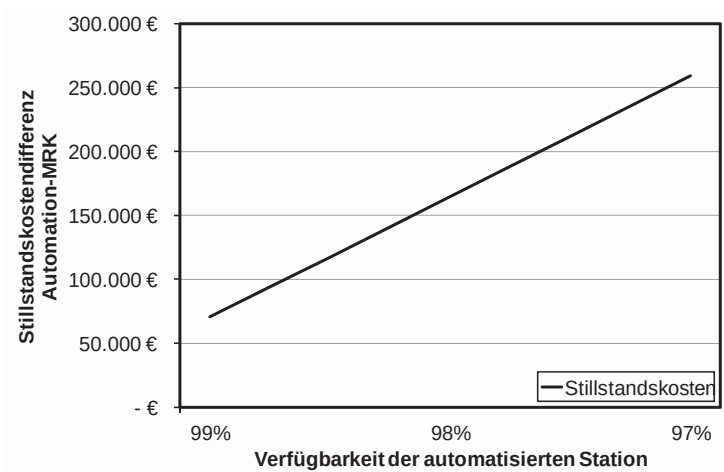


Abbildung 6-4: Stillstandskostendifferenz zwischen MRK- und Automationsstation

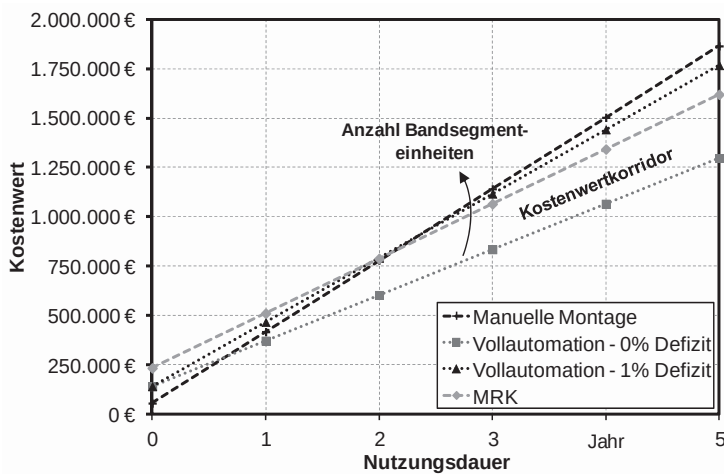


Abbildung 6-5: Kostenwertvergleich über den Nutzungszeitraum unter Berücksichtigung der Verfügbarkeitsdifferenz der automatisierten Station

6.4 Fazit

Kapitel 6 dieser Arbeit betrachtet die technische und wirtschaftliche Bewertung des umgesetzten Anlagenkonzepts für eine Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage. Neben einer Diskussion der Funktionserfüllung auf Basis der in Kapitel 3 definierten allgemeinen Anforderungen werden die zu erwartenden Flexibilitätsvorteile durch eine relative Bewertung des implizierten Nutzens in die Systembewertung integriert.

Die wirtschaftliche Evaluierung des Systems erfolgt anhand zweier Referenzszenarien. Die eingeführte Kostenstruktur betrachtet für alle Szenarien neben Einmalaufwänden in Form von Fixkosten ebenfalls die laufenden Betriebskosten. Die Rentabilitätsuntersuchung setzt eine Betrachtung unter vergleichbaren Realisierungsoptionen mit erforderlichen Grundinvestitionen (wie z. B. die Elektrohängbahn) voraus, welche in den Realisierungskosten nicht mehr gesondert auftauchen.

Auf Basis einer Kostenvergleichsrechnung können die jeweiligen finanziellen Aufwände in Abhängigkeit von variablen Lohn- und Hardwarekosten abgeschätzt werden. Hier zeigt sich, dass der wirtschaftliche Nutzen, selbst unter erschwerten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen gegenüber einer manuellen Montage, hoch ist und bereits bei einer Einsatzdauer von zwei Jahren die Wirtschaftlichkeit des Systems als gegeben angesehen werden kann.

Im Vergleich mit einer vollautomatisierten Montage wird deutlich, dass sowohl die Fix- als auch die Betriebskosten einer MRK-Variante höher sind. Durch eine erweiterte Betrachtung der Systemverfügbarkeit infolge ungeplanter zusätzlicher Arbeitsumfänge wird der geldwerte Vorteil einer flexiblen Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage ersichtlich.

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung

Fließmontagesysteme stellen aufgrund der hohen Flexibilität und Produktivität eine dominierende Organisationsform zur manuellen Montage variantenreicher Großserienprodukte dar. Angesichts des demographischen Wandels und der kontinuierlich steigenden Flexibilitätsanforderungen an zukünftige Montagesysteme ist davon auszugehen, dass dies zu einem Paradigmenwechsel führt. Dem Vorteil einer hohen Prozesssicherheit von Roboterstationen in der Fließmontage stehen Defizite gegenüber. Die menschliche Flexibilität, insbesondere bei variierenden Arbeitsinhalten, wird von Robotern bei Weitem nicht erreicht. Ein Verweilen des Werkers auf dem Förderband führt zum Eindringen in die Roboterzelle und somit zu einer Stillsetzung der Linie. Trotz vielfältiger technischer Ansätze fehlt es an geeigneten Systemen, die den komplexen Anforderungen für eine Arbeitsraumteilung zur Erlangung eines optimalen Automatisierungsgrads moderner Fließmontagelinien gerecht werden.

Die vorliegende Arbeit leitet aus dieser Aufgabenstellung die Zielsetzung ab, auf Basis einer Mensch-Roboter-Koexistenz die Systemflexibilität von Fließmontagesystemen zu steigern. Ausgehend von einer Anforderungsanalyse wird ein Entwicklungsvorgehen für ein modulares Systemkonzept für eine Mensch-Roboter-Koexistenz innerhalb von Fließmontageanwendungen vorgestellt.

Die Definition erforderlicher Funktionen bildet mit den identifizierten Problemstellungen die Basis für das Systemkonzept und die Ableitung modularer Lösungsbausteine. Eine allgemeine Betrachtung der Arbeitsraumteilung erlaubt die Spezifikation zweier Synchronisationssysteme. Neben der prozessrelevanten Synchronisation zwischen Roboter und Montagehauptkörper existiert eine zweite sicherheitsrelevante Synchronisation zwischen dem Roboter und einem kamera-basierten Überwachungsraum.

Ein Kernproblem der Synchronisation ist der unbekannte Charakter der Roboterbewegungen infolge der situationsspezifischen Kollisionsvermeidung. Auf Basis eines identifizierten Robotermodells kann die Robotertrajektorie zur Laufzeit prädiziert und vorrausschauend in eine modellprädiktive Führungsgrößenregelung für ein verfahrenbares Kamerasystem integriert werden. Dies ermöglicht somit

einen effizienten Ressourceneinsatz für einen großen Überwachungsbereich bei gleichzeitiger Vermeidung von Abschattungen innerhalb des Arbeitsraums.

Ein Ansatz zur verbesserten Koordination manueller und automatisierter Tätigkeiten basiert auf dem Agentenprinzip. Die Ablaufmodellierung wird durch die Assoziation bekannter Tätigkeiten mit Hidden Markov Modellen beschrieben und anhand definierter Beobachtungsfolgen trainiert. Dies ermöglicht die probabilistische Tätigkeitenidentifikation und bildet die Grundlage für eine kontextbezogene Aufgabenkoordination anstelle von rein beobachtungsbasierten Reaktionen.

Für eine automatisierte Erstellung von Umgebungsmodellen für die Roboterbahnplanung wird ein Vorgehen unter Einsatz eines robotergeführten Sensors nach dem Lichtlaufprinzip vorgestellt. Unter Anwendung des Iterative Closest Points Verfahrens kann eine geometrische Beziehung zwischen erfassten Punktwolken der Objekte und CAD-Daten ermittelt und diese in ein Umgebungsmodell überführt werden. Hierbei stellt der abschließende Simplifizierungsprozess zur Reduktion der Modellkomplexität ein wichtiges Kernelement dar.

Das Vorgehen für eine roboterbasierte kollisionsfreie Bahnplanung in der Fließmontage setzt sich aus drei konsekutiven hierarchisch angeordneten Modulen, basierend auf einer Trajektorienschar, zusammen. Durch eine Kombination von Randbedingungen zur Berücksichtigung maximaler Arbeitsräume und Geschwindigkeiten werden innerhalb einer zyklischen Optimierungsfunktion Geschwindigkeitsvektoren ermittelt, um die Roboterbewegungen bis hin zur Kollisionsvermeidung zu modifizieren. Gleichmaßen wird durch die kontinuierliche Förderbewegung des Montagehauptkörpers die Montageaufgabe laufend aktualisiert, sodass deren ortsflexible Fortführung sichergestellt werden kann.

Die prototypische Umsetzung des Gesamtkonzepts erfolgt anhand eines Fallbeispiels aus der Automobilbranche. Das vorgestellte Szenario umfasst die förderbandsynchrone Sitzmontage am Beispiel einer Automobilkarosserie als Montagehauptkörper. Als Basis dient eine informationstechnische Kommunikationsarchitektur zur Abbildung der prozeduralen Datenflüsse und Schnittstellen, um eine herstellerunabhängige generisch-funktionale Struktur zu realisieren. Betrachtet wird neben einer ungestörten automatisierten Montage ebenfalls eine Mensch-Roboter-Koexistenz, bei der ein Mitarbeiter in den Arbeitsraum eindringt. Eine sicherheitstechnische Betrachtung des realisierten Prototyps sowie das Aufzeigen von konkreten Umsetzungsschritten für einen industriellen Einsatz beschließen das Kapitel.

In der technischen Systembewertung werden neben den Funktionen der Kollisionsvermeidung und der Re-Synchronisation ebenfalls die zu erwartenden qualitativen Flexibilisierungseffekte betrachtet. Die wirtschaftliche Bewertung fokussiert einmalige und laufende monetäre Aufwände anhand des gewählten Fallbeispiels und zeigt, dass mit einer Mensch-Roboter-Koexistenz neben einem kurzfristigen Kostenvorteil auch ein langfristiger Flexibilitätsvorteil innerhalb der Fließmontage zu erwarten ist.

7.2 Ausblick

Anhand der Erkenntnisse des erforschten Systemkonzepts lassen sich weitere Aspekte für fortführende Forschungsarbeiten identifizieren und ableiten. Zunächst besteht die Möglichkeit Überwachungsbereiche flexibler zu gestalten, um eine situative Adaption der zu überwachenden Räume zu erreichen. Dies führt zu einer potenziell effizienteren Arbeitsraumteilung. Weiterführend ist die Koppelung eines berührenden mit einem berührungslosen Überwachungssystem eine vielversprechende Alternative, um unterschiedliche variable Tätigkeiten und Kooperationsformen innerhalb eines gemeinsamen Arbeitsraumes miteinander kombinieren zu können.

Gleichermaßen bietet sich die Möglichkeit, das bestehende System auf eine Multi-Roboter-Multi-Mensch-Koexistenz (MRMMK) zu erweitern und einen fließenden Übergang hin zu Multi-Agentensystemen mit hohen Aufgabendichten zu erreichen. Dies ermöglicht ebenso einen Transfer in Richtung Standmontagesysteme zur Integration leistungsgewandelter oder ungelernter Arbeitskräfte durch eine situative Identifikation von kognitiven sowie physischen Assistenzbedarfen.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass eine Arbeitsraumteilung von jeder Person, aufgrund des variierenden Erfahrungsgrads, unterschiedlich wahrgenommen wird. Daher stellt die kombinierte Betrachtung des menschlichen Empfindens mit den objektiven Funktionalitäten im Sinne von Natural User Interfaces einen vielversprechenden Ansatz dar. Dieser ermöglicht eine nutzerindividuelle Funktionsadaption an persönliche Bedürfnisse und Präferenzen, um auf dieser Basis individuelle Kooperationsarbeitsplätze mit signifikanten Produktivitäts- als auch Flexibilitätsvorteilen zu entwerfen. Diese Maßnahmen versprechen eine höhere Akzeptanz und ermöglichen folglich eine Vervielfachung der potenziellen Anwendungsgebiete sowie die Erschließung weiterer Branchen.

8 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3446425958.

ADAMY 2007A

Adamy, J.: Fuzzy Logik, Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen. 2. Aufl. Aachen: Shaker 2007. ISBN: 978-3832265564.

ADAMY 2007B

Adamy, J.: Systemdynamik und Regelungstechnik II. Aachen: Shaker 2007. ISBN: 978-3832260026.

AKENINE-MÖLLER ET AL. 2010

Akenine-Möller, T.; Haines, E.; Hoffman, N.: Real-time rendering. 3. Aufl. Natick, Mass: Peters 2010. ISBN: 978-1568814247.

AKERKAR & SAJJA 2010

Akerkar, R.; Sajja, P.: Knowledge-based systems. Sudbury, Mass: Jones and Bartlett 2010. ISBN: 978-0763776473.

ALAMI ET AL. 2006

Alami, R.; Albu-Schäfer, A.; Bicchi, A.; Bischoff, R.; Chatila, R.; De Luca, A.; De Santis, A.; Giralt, G.; Guiochet, J.; Hirzinger, G.; Ingrand, F.; Lippiello, V.; Mattone, R.; Powell, D.; Sen, S.; Siciliano, B.; Tonietti, G.; Villani, L.: Safe and Dependable Physical Human-Robot Interaction in Anthropic Domains: State of the Art and Challenges. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) / Robotics Society of Japan (RSJ) (Hrsg.): International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006). Peking / China, 09.-15. Oktober 2006. Piscataway: IEEE Press 2006, S. 1-16, ISBN: 978-1424402588.

ALBERTOS ET AL. 2000

Albertos, P.; Sala, A.; Olivares, M.: Fuzzy Logic Controllers. XV Congreso Espanol Sobre Tecnologias Y Logica Fuzzy (2000). Punta Umbría / Spanien, 03.-05. Februar 2010, S. 1-23.

ALBU-SCHÄFFER ET AL. 2007

Albu-Schäffer, A.; Haddadin, S.; Ott, C.; Stemmer, A.; Wimböck, T.; Hirzinger, G.: The DLR Lightweight Robot – Design and Control Concepts for Robots in Human Environments. Industrial Robot: An International Journal (2007) 34, S. 376-385.

ARAI ET AL. 2010

Arai, T.; Kato, R.; Fujita, M.: Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly. CIRP Annals – Manufacturing Technology 59 (2010) 1, S. 5-8.

ARGALL & BILLARD 2010

Argall, B. D.; Billard, A. G.: A Survey of Tactile Human-Robot Interactions. Robotics and Autonomous Systems 58 (2010) 10, S. 1159-1176.

ARMBRUSTER ET AL. 2001

Armbruster, H.; Kirner, E.; Kinkel, S.: Neue Kundengruppen für Industrieroboter. In: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (Hrsg.): Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung 2001.

AUTOMATIONSPRAXIS 2014

Automationspraxis: Roboter rücken in die Nähe des Menschen. Leinfelden-Echterdingen: Konradin 2014. < http://www.automationspraxis.de/home/-/article/33568397/39658916/Roboter-r%C3%BCcken-in-die-N%C3%A4he-des-Menschen/art_co_INSTANCE_0000/maximized/ > – 20.08.2014.

BACHMANN 2010

Bachmann, A.: Dichte Objektsegmentierung in Stereobildfolgen (Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010. ISBN: 978-3866445413.

BARBEY ET AL. 1992

Barbey, J.; Feige, M.; Kahmeyer, M.; Willy, A.: Technikgestaltung in der flexibel automatisierten Serienmontage. Forschungsvorhaben Montage-Evaluierung. Düsseldorf: VDI 1992. ISBN: 978-3181462027. (Fortschritt-Berichte VDI 2).

BATES & GREGORY 2000

Bates, R. J.; Gregory, D. W.: Voice and data communications handbook. 3. Aufl. New York: McGraw-Hill 2000. ISBN: 978-0072122763.

BAUERNSCHMITT ET AL. 2010

Bauernschmitt, R.; Buss, M.; Deml, B.; Diepold, K.; Färber, B.; Färber, G.; Hagn, U. A.; Hirche, S.; Hirzinger, G.; Knoll, A.; Müller, H.; Ortmaier, T.; Peer, A.; Popp, M.; Preusche, C.; Reinhart, G.; Shi, Z. H.; Steinbach, E.; Ulbrich, H.; Walter, U.; Zäh, M. F.: High-fidelity telepresence and teleaction. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010). Anchorage (Alaska) / USA, 03.-08. Mai 2010. Piscataway: IEEE Press 2010, S. 1092-1093. ISBN: 978-1424450381

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2010

Bayerisches Landesamt für Umwelt: Risiko / Restrisiko. Augsburg: 2010.

BECKER 2013

Becker, H. P.: Investition und Finanzierung. Wiesbaden: Springer Gabler 2013. ISBN: 978-3658003772.

BENTLEY 1975

Bentley, J. L.: Multidimensional Binary Search Trees Used for Associative Searching. Communications of the ACM 18 (1975) 9, S. 509-517.

BESL & MCKAY 1992

Besl, P. J.; McKay, H. D.: A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14 (1992) 2, S. 239-256.

BEUMELBURG 2005

Beumelburg, K.: Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation (Dissertation, Universität Stuttgart). Heimsheim: Jost-Jetter 2005. ISBN: 978-3936947526. (IPA-IAO Forschung und Praxis 413).

BICCHI & TONIETTI 2004

Bicchi, A.; Tonietti, G.: Fast and Soft Arm Tactics: Dealing with the Safety-Performance Trade-Off in Robot Arms Design and Control. IEEE Robotics and Automation Magazine 11 (2004) 2, S. 22-33.

BIGGS & MACDONALD 2003

Biggs, G.; MacDonald, B.: A Survey of Robot Programming Systems. In: Australian Robotics & Automation Association (ARAA) (Hrsg.): Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2003). Brisbane / Australia, 01.-03. Dezember 2003.

BLUNSON 2004

Blunson, P.: Hidden Markov Models. St. Hugh's College, University of Oxford 2004.

BÖGE 2009

Böge, A.: Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. 19. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009. ISBN: 978-3834804877.

BORGOLTE 1991

Borgolte, U.: Flexible, realzeitfähige Kollisionsvermeidung in Mehrroboter-Systemen (Dissertation, University of California). Berlin, New York: Springer 1991. ISBN: 978-3540543633. (Informatik-Fachberichte 277).

BORTOT 2014

Bortot, D.: Ergonomic Human-Robot Coexistence in the Branch of Production (Dissertation, TU München). München: Dr. Hut 2014. ISBN: 978-3843914840.

BORTOT ET AL. 2012

Bortot, D.; Ding, H.; Antonopolous, A.; Bengler, K.: Human Motion Behavior while Interacting with an Industrial Robot. Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation 41 (2012) 1, S. 1699-1707.

BOSSCHER & HEDMAN 2011

Bosscher, P.; Hedman, D.: Real-Time Collision Avoidance Algorithm for Robotic Manipulators. Industrial Robot: An International Journal 38 (2011) 2, S. 186-197.

BRÉMAUD 2008

Brémaud, P.: Markov Chains. 7. Aufl. New York: Springer 2008. ISBN: 978-0387985091. (Texts in applied mathematics 31).

BRUNNER 2013

Brunner, U.: Einführung in die Modellbildung und Simulation ereignisgetriebener Systeme. eBook: GRIN 2013. ISBN: 978-3640613595.

CAMACHO & BORDONS 2007

Camacho, E. F.; Bordons, C.: Model Predictive Control. 2. Aufl. London: Springer 2007. ISBN: 978-1852336943.

CHANG ET AL. 1999

Chang, S.; Kim, J.; Kim, I.; Borm, J. H.; Lee, C.; Park, J. O.: KIST teleoperation system for humanoid robot. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) / Robotics Society of Japan (RSJ) (Hrsg.): International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 1999). Kyongju / Südkorea, 17.-21. Oktober 1999. Piscataway: IEEE Press 1999, S. 1198-1203. ISBN: 978-0780351844.

CHOSSET ET AL. 2005

Choset, H. M.; Lynch, K. M.; Hutchinson, S.; Kantor, G. A.; Burgard, W.; Kavraki, L. E.; Thrun, S.: Principles of Robot Motion. Theory, Algorithms, and Implementation. Cambridge, Mass: MIT Press 2005. ISBN: 978-0262033275.

CIFUENTES ET AL. 2014

Cifuentes, C. A.; Frizera, A.; Carelli, R.; Bastos, T.: Human-robot interaction based on wearable IMU sensor and laser range finder. Robotics and Autonomous Systems 62 (2014) 10, S. 1425-1439.

CISEK 2005

Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen (Dissertation, TU München). München: Utz 2005. ISBN: 978-3831604753. (Forschungsberichte *iwb* 191).

COLGATE ET AL. 1996

Colgate, J. E.; Wannasupphrasit, W.; Peshkin, M.: Cobots - Robots for Collaboration with Human Operator. Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Conference (1996) 58, S. 433-440.

CORRALES ET AL. 2011

Corrales, J.; Candelas, F.; Torres, F.: Safe human-robot interaction based on dynamic sphere-swept line bounding volumes. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27 (2011) 1, S. 177-185.

CRAIG 2004

Craig, J. J.: Introduction to Robotics. Mechanics and Control. 3. Aufl. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall 2004. ISBN: 978-0201543612.

DELLER ET AL. 2008

Deller, J.; Diederichs, Y.; Hausmann, E.; Kern, S.: Personalmanagement im demografischen Wandel. Berlin, Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3540763475.

DENAVIT & HARTENBERG 1955

Denavit, J.; Hartenberg, R. S.: A Kinematic Notation for Lower-pair Mechanisms

Based on Matrices. Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics 22 (1955), S. 215-221.

DHILLON & LI 2009

Dhillon, B. S.; Li, Z. J.: Probabilistic Analysis of a Robot System with Redundant Safety Units and Common-Cause Failures. Intelligent Information Management 1 (2009) 3, S. 150-158.

DIN 10218-2

DIN 10218-2: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersystem und Integration. Berlin: Beuth 2008.

DIN 12100-1

DIN 12100-1: Sicherheit von Maschinen – Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze – Teil 1: Grundsätzliche Terminologie, Methodologie. Berlin: Beuth 2010.

DIN 14119

DIN 14119: Sicherheit von Maschinen – Verriegelungseinrichtungen in Verbindung mit trennenden Schutzeinrichtungen – Leitsätze für Gestaltung und Auswahl. Berlin: Beuth 2011.

DIN EN ISO 14121-1

DIN EN ISO 14121-1: Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung Sicherheit von Maschinen – Teil 1: Leitsätze. Berlin: Beuth 2007.

DIN EN ISO 13849-2

DIN EN ISO 13849-2: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung. Berlin: Beuth 2008.

DIN IEC 61158

DIN IEC 61158: Industrielle Kommunikationsnetze – Feldbusse – Teil 2: Spezifikation und Dienstfestlegungen des Physical Layer. Berlin: Beuth 2013-01.

DIRNDORFER 1993

Dirndorfer, A.: Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage (Dissertation, TU München). Berlin, Heidelberg: Springer 1993. ISBN: 978-3540570318. (Forschungsberichte *iwb* 63).

DITTMAR & PFEIFFER 2009

Dittmar, R.; Pfeiffer, B. M.: Modellbasierte prädiktive Regelung. Eine Einführung für Ingenieure. München, Wien: Oldenbourg 2009. ISBN: 978-3486275230.

DUBEY ET AL. 2001

Dubey, R. V.; Everett, S. E.; Pernalet, N.; Manocha, K. A.: Teleoperation Assistance Through Variable Velocity Mapping. IEEE Transactions on Robotics and Automation 17 (2001) 5, S. 761-766.

EBERSPÄCHER 1999

Eberspächer, M.: Prognose der Eigenschaften stochastischer Prozess mittels Neuronaler Netze mit spezifischen Anwendungen in der Kommunikationstechnik (Dissertation, Universität Stuttgart). Stuttgart: Universitätsverlag 1999.

EBERT 2012

Ebert, C.: Systemidentifikation zur Modellierung mechanischer Strukturen: Markovparameter zur experimentellen Schadenserfassung (Dissertation, Universität Siegen). Siegen: Universitätsverlag 2012. (Schriftenreihe der Arbeitsgruppe für Technische Mechanik im Institut für Mechanik und Regelungstechnik – Mechatronik 6).

EBERT 2003

Ebert, D.: Bildbasierte Erzeugung kollisionsfreier Transferbewegungen für Industrieroboter (Dissertation, TU Kaiserslautern). Kaiserslautern: Universität 2003. ISBN: 978-3936890235. (Schriftenreihe Informatik 12).

EDBERG & NYMAN 2010

Edberg, M.; Nyman, P.: Implementing Multi-Touch Screen for Real-time Control of a Robotic cell At Universidad Politécnica Valencia (Master Thesis). Department of Product and Production Development, Chalmers University of Technology. Göteborg / Schweden (2010).

EGBERS ET AL. 2012

Egbers, J.; Glonegger, M.; Magenheimer, K.; Meis, J.-F.; Pause, J.; Pröpster, M.; Reinhart, G.: Mensch und Produktionstechnik. wt Werkstatttechnik online 102 (2012) 9, S. 615-621.

EL-HAKIM ET AL. 1995

El-Hakim, S. F.; Beraldin, J. A.; Blais, F.; Fedosov, E. A. In: International Society for Optics and Photonics (SPIE) (Hrsg.): Digital Photogrammetry and Remote Sensing 1995. St. Petersburg / Russland, 25.-30. Juni 1995. Bellingham, Washington: SPIE Press, S. 14-25. ISBN: 978-0819420190.

ELMARAGHY 2009

ElMaraghy, H. A.: Changeable and reconfigurable manufacturing systems. London: Springer 2009. ISBN: 978-1848820661.

EUROPÄISCHE UNION 2006:

Europäische Union: Richtlinie 2006/32/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen und zur Aufhebung der Richtlinie 93/76/EWG des Rates, Europäische Union 2006.

EUROPEAN COMMISSION 2011

European Commission: Demography Report 2010. Older, more numerous and diverse Europeans : commission staff working document. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. ISBN: 978-9279176036.

EUROPEAN ROBOTICS NETWORK 2005

European Robotics Network: DR.14.1 White paper - Industrial Robot Automation. 2005.

F&P PERSONAL ROBOTICS 2014

F&P Personal Robotics: Personal Robot Arms. 2014. <<http://www.fp-robotics.com/de/personalrobotarms>> – 18.07.2014.

FINK 2003

Fink, G. A.: Mustererkennung mit Markov-Modellen. Theorie - Praxis - Anwendungsgebiete. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2003. ISBN: 978-3519004530.

FLOATER 2002

Floater, M. S.: Triangle Meshes: Simplification and Optimization
Universität Oslo. Oslo (2002).

FÖLLINGER & KONIGORSKI 2013

Föllinger, O.; Konigorski, U.: Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. 11. Aufl. Berlin, Heidelberg: VDE 2013. ISBN: 978-3800732319.

FRAUNHOFER GESELLSCHAFT 2012

Fraunhofer Gesellschaft: weiter.vorn. April 2012.

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FABRIKBETRIEB UND -AUTOMATISIERUNG 2010

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF): Bionische Rüsselkinematik für sichere Roboteranwendungen in der Mensch-Maschine-Interaktion „BROMMI“. <Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF> – 03.01.2012.

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FABRIKBETRIEB UND -AUTOMATISIERUNG 2011

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF): Projektions- und kamerabasiertes System zur optischen Arbeitsraumüberwachung.
<<http://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/robotersysteme/produktblaetter/2011-03-projektionssystem-de.pdf>> – 03.01.2012.

FRUTIG 2013

Frutig, M.: (Leichtbau-)Roboter sind im kommen. technica (2013) 6/7, S. 44-49.

FRYMAN & MATTHIAS 2012

Fryman, J.; Matthias, B.: Safety of Industrial Robots: From Conventional to Collaborative Applications. In: International Federation of Robotics (IFR) / Deutsche Gesellschaft für Robotik (DGR) (Hrsg.): Joint Conference of ISR 2012 (42nd International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2012 (7th German Conference on Robotics). München / Deutschland, 21.-22. Mai 2012. Berlin: VDE 2012, S. 1-5. ISBN: 978-3800734184.

GANS 2009

Gans, J. E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage (Dissertation, Universität Paderborn). Paderborn: Universitätsverlag 2009. ISBN: 978-3939350682.

GARLAND & HECKBERT 1997

Garland, M.; Heckbert, P. S.: Surface simplification using quadric error metrics. In: Owen, G. S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 1997). Los Angeles / USA, 03.-08. August 1997. New York, NY: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 1997, S. 209-216. ISBN: 978-0897918961.

GECKS 2011

Gecks, T.: Sensorbasierte, echtzeitfähige Online-Bahnplanung für die Mensch-Roboter-Koexistenz (Dissertation, Universität Bayreuth). Bayreuth: Universitätsverlag 2011.

GEISBERGER ET AL. 2007

Geisberger, E.; Schätz, B.: Modellbasierte Anforderungsanalyse mit AutoRAID. Informatik - Forschung und Entwicklung 21 (2007) 3-4, S. 231-242.

GLOWA & SCHLEGL 2013

Glowa, C.; Schlegl, T.: Ultrasound Based Object Detection for Human-Robot Collaboration. In: Lee, J. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA 2013). Busan / Südkorea, 25.-28. September 2013. Berlin, Heidelberg: Springer 2013, S. 84-95. ISBN: 978-3642408496.

GOODRICH & SCHULTZ 2007

Goodrich, M. A.; Schultz, A. C.: Human-Robot Interaction: A Survey. Foundation and Trends in Human-Computer Interaction 1 (2007) 3, S. 203-275.

GRAF 2010

Graf, J.: Sichere Mensch-Roboter-Kooperation durch Auswertung von Bildfolgen (Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie). Karlsruhe: Universitätsverlag 2010.

GRÄF 2004

Gräf, W.: Maschinensicherheit. Betrachtungen zu der europäischen Sicherheitsnormen. 3. Aufl. Heidelberg: Hüthig 2004. ISBN: 978-3778529416.

GREWAL & ANDREWS 1993

Grewal, M. S.; Andrews, A. P.: Kalman Filtering Theory and Practice. Upper Saddle River: Prentice-Hall 1993. ISBN 978-0132113359.

GRINSTEAD & SNELL 1998

Grinstead, C. M.; Snell, J. L.: Introduction to Probability. 2. Aufl. Providence, RI: American Mathematical Society 1998. ISBN: 978-0821807491.

GRONINGER ET AL. 2009

Groninger, R.; Kus, E.; Hüppi, R.: Market Study on Adaptive Robots for Flexible Manufacturing Systems. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Mechatronics (ICM 2009). Malaga / Spanien, 14.-17. April 2009. Piscataway: IEEE Press 2009, S. 1-9. ISBN: 978-1424441945

GROTE ET AL. 2011

Grote, K. H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3642173059.

GRÜNE & PANNEK 2011

Grüne, L.; Pannek, J.: Nonlinear Model Predictive Control. Theory and Algorithms. London: Springer 2011. ISBN: 978-0857295002.

HAAS 2012

Haas, U.: Herausforderungen und Potenziale der Service Robotik. Hannover: 12. Oktober 2012.

HADDADIN ET AL. 2008

Haddadin, S.; Albu-Schäfer, A.; De Luca, A.; Hirzinger, G.: Collision Detection and Reaction: A Contribution to Safe Physical Human-Robot Interaction. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) / Robotics Society of Japan (RSJ) (Hrsg.): International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008). Nizza / Frankreich, 22.-26. September 2008. Piscataway: IEEE Press 2008, S. 3356-3363. ISBN: 978-1424420575.

HADDADIN ET AL. 2011

Haddadin, S.; Albu-Schäffer, A.; Hirzinger, G.: Safe Physical Human-Robot Interaction: Measurements, Analysis & New Insights. In: Kaneko, M.; Nakamura, Y. (Hrsg.): Robotics Research – The 13th International Symposium on Robotics Research (ISRR 2007). Hiroshima / Japan, 26.-29. November 2007. Berlin Heidelberg: Springer 2007, S. 395-407. ISBN: 978-3642147425.

HÄGELE 2012

Hägele, M.: Innovations in robotics towards intelligent, low-cost and universal tools in agile manufacturing. Aarhus, Dänemark: 19.-21. Juni 2012.

HAREL & POLITI 1998

Harel, D.; Politi, M.: Modeling Reactive Systems with Statecharts. New York: McGraw-Hill 1998. ISBN: 978-0070262058.

HAUN 2007

Haun, M.: Handbuch Robotik. Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter. 1. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3540369189.

HEIDEMANN 2008

Heidemann, G.: Grundlagen der Künstlichen Intelligenz (Vorlesungsunterlagen) Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme
Universität Stuttgart. Stuttgart 2008. <http://www.iis.uni-stuttgart.de/lehre/ws07-08/grundlagen_der_kuenstlichen_intelligenz/> – 26.06.2014.

HEILIGENSETZER 2003

Heiligensetzer, P.: Sichere Mensch-Roboter-Kooperation durch Fusion haptischer und kapazitiver Sensorik (Dissertation, Universität Karlsruhe). Aachen: Shaker 2003. ISBN: 978-3832213718.

HELMS 2007

Helms, E.: Roboterbasierte Bahnführungsunterstützung von industriellen Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen (Dissertation, Universität Stuttgart) Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA). Heimsheim: Jost-Jetter 2007. ISBN: 978-3939890041. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 451).

HENRICH ET AL. 2008

Henrich, D.; Fischer, M.; Gecks, T.; Kuhn, S.: Sichere Mensch/Roboter-

- Koexistenz und Kooperation. In: Deutsche Gesellschaft für Robotik (DGR) (Hrsg.): Robotik 2008. München / Deutschland, 11.-12. Juni 2008. Düsseldorf: VDI 2008, S. 251-254. ISBN: 978-3180920122.
- HOLWEG & PIL 2004
Holweg, M.; Pil, F. K.: The Second century. Reconnecting customer and value chain through build-to-order: moving beyond mass and lean production in the auto industry. Cambridge: MIT Press 2004. ISBN: 978-0262083324.
- HORN 1987
Horn, B. K. P.: Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. Journal of the Optical Society of America A 4 (1987) 4, S. 629.
- HUBER ET AL. 2008
Huber, M.; Rickert, M.; Knoll, A.; Brandt, T.; Glasauer, S.: Human-Robot Interaction in Handing-Over Tasks. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2008). München / Deutschland, 01.-03. August 2008. Piscataway: IEEE Press 2008, S. 107-112. ISBN: 978-1424422128.
- HUELKE & OTTERSBACK 2013
Huelke, M.; Ottersbach, J.: Sicherheitsnachweis für Kollaborierende Roboter. Erfurt: 12.-13. März 2013.
- HUQ ET AL. 2006
Huq, R.; Mann, G.; Gosine, R. G.: Behavior-based Robot Control Using Fuzzy Discrete Event System. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2006). Vancouver, BC / Kanada, 16-21. Juli 2006. Piscataway: IEEE Press 2006, S. 1146-1153. ISBN: 978-0780394889.
- HUY ANH ET AL. 2011
Huy Anh, H. P.; Kwan, K.; Thanh, N.: Modeling Identification of the Nonlinear Robot Arm System Using MISO NARX Fuzzy Model and Genetic Algorithm. In: Goto, S. (Hrsg.): Robot Arms. Rijeka: InTech 2011, S. 1-19. ISBN: 978-9533071602.
- INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2013
International Federation of Robotics (IFR): World Robotics Report 2013. Frankfurt a. M.: VDMA 2013.
- IOSSIFIDIS & STEINHAGE 2005
Iossifidis, I.; Steinhage, A.: Behavior Generation for Anthropomorphic Robots by means of Dynamical Systems. In: Prassler, E. et al. (Hrsg.): Advances in Human-Robot Interaction. Berlin, New York: Springer 2005, S. 259-300. ISBN: 978-3540315094.
- ISERMANN & MÜNCHHOF 2010
Isermann, R.; Münchhof, M.: Identification of dynamical systems. An introduction with applications. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3540788782.

JANSCHKE 2010

Janschek, K.: Systementwurf mechatronischer Systeme - Methoden, Modelle, Konzepte. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3540788775.

JIANG ET AL. 2006

Jiang, Z. H.; Ishida, T.; Sunawada, M.: Neural Network Aided Dynamic Parameter Identification of Robot Manipulators. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2006). Taipei / Taiwan, 08.-11. Oktober 2006. Piscataway: IEEE Press 2006, S. 3298-3303. ISBN: 978-1424400997.

JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen (Dissertation, TU München). München: Utz 2000. ISBN: 978-3896758705. (Forschungsberichte *iwb* 145).

JULIER & UHLMANN 1997

Julier, S. J.; Uhlmann, J. K.: A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems. In: International Society for Optics and Photonics (SPIE) (Hrsg.): International Symposium on Aerospace, Defense, Sensing, Simulations and Control (AeroSense 1997). Orlando / USA, 20.-25. April 1997. Bellingham, Washington: SPIE Press, S. 182-193. ISBN: 978-0819425010.

JÜRGENS ET AL. 1998

Jürgens, H. W.; Matzdorf, I.; Windberg, J.: Internationale anthropometrische Daten als Voraussetzung für die Gestaltung von Arbeitsplätzen und Maschinen. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 1998.

KALMAN 1960

Kalman, R. E.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering 82 (1960) 1, S. 35-45.

KATAYAMA 2005

Katayama, T.: Subspace Methods for System Identification. London: Springer 2005. ISBN: 978-1846281587.

KERN 2003

Kern, F.: Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten (Dissertation, TU Braunschweig). Braunschweig: Universitätsverlag 2003. ISBN: 978-3926146144.

KEßLER 2008

Keßler, C.: Simplifizierung polygonaler Oberflächen
Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) 2008.

KHATIB 1986

Khatib, O.: Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. The International Journal of Robotics Research 5 (1986) 1, S. 90-98.

KIM & MUTLU 2014

Kim, Y. Y.; Mutlu, B.: How social distance shapes human-robot interaction. International Journal of Human-Computer Studies 72 (2014) 12, S. 783-795.

KJER & WILM 2010

Kjer, H. M.; Wilm, J.: Evaluation of surface registration algorithms for PET motion correction. Technical University of Denmark, Informatics and Mathematical Modelling 2010.

KLASEN ET AL. 2010

Klasen, F.; Oestreich, V.; Volz, M.: Industrielle Kommunikation mit Feldbus und Ethernet. Berlin: VDE 2010. ISBN: 978-3800732975.

KNAB 2000

Knab, B.: Erweiterung von Hidden-Markov-Modellen zur Analyse ökonomischer Zeitreihen (Dissertation, Universität Köln). Köln: Universitätsverlag 2000.

KOVÁCS ET AL. 2006

Kovács, G.; Kiss, B.; Eric, N.: Watchdog – A practical approach of fault detection. In: The International Federation of Automatic Control (IFAC) (Hrsg.): Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2006). St. Etienne / Frankreich, 17.-19. Mai 2006. Amsterdam: Elsevier 2006, S. 327-332. ISBN: 978-0080446547.

KRATZSCH 2000

Kratzsch, S.: Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen (Dissertation, TU Braunschweig). Essen: Vulkan 2000. ISBN: 978-3802786549.

KRIEGER 2010

Krieger, R. D.: Automatisiertes Einrichten von Sicherheitssystemen zur Mensch-Roboter-Kooperation mit Industrierobotern (Dissertation, Universität Bayreuth). München: Dr. Hut 2010. ISBN: 978-3-86853-605-8.

KRÜGER ET AL. 2009

Krüger, J.; Lien, T. K.; Verl, A.: Cooperation of human and machines in assembly lines. CIRP Annals – Manufacturing Technology 59 (2009) 2, S. 628-646.

KRÜGER ET AL. 2005

Krüger, J.; Nickolay, B.; Heyer, P.; Seliger, G.: Image based 3D Surveillance for flexible Man-Robot-Cooperation. CIRP Annals – Manufacturing Technology 54 (2005) 1, S. 19-22.

KRUSE 2011

Kruse, R.: Computational Intelligence. Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011.

KUKA ROBOTER GMBH 2004

KUKA Roboter GmbH: KR 180-2 Serie 2000 (2004).

KULIĆ 2005

Kulić, D.: Safety for Human-Robot Interaction (Dissertation, University of British Columbia). Vancouver, BC: Universitätsverlag 2005.

KULIĆ & CROFT 2006

Kulić, D.; Croft, E.: Real-time safety for human-robot interaction. *Robotics and Autonomous Systems* 54 (2006) 1, S. 1-12.

KULIĆ & CROFT 2007

Kulić, D.; Croft, E.: Pre-collision safety strategies for human-robot interaction. *Autonomous Robots* 22 (2007) 2, S. 149-164.

KUPPAN CHE ET AL. 2012

Kuppan Che, R. M.; Nagarajan, T.; Karsiti, N. B.; Singaperum, M.: State Based Modeling and Control of a Multi Robot Systems Using Simulink/Stateflow. *Journal of Applied Sciences* 12 (2012) 24, S. 2494-2502.

LANGE 2003

Lange, F.: Adaptiv vorausplanende Steuerung für schnelle sensorbasierte Roboterbewegungen (Dissertation, Universität Karlsruhe). Karlsruhe: Universitätsverlag 2003.

LANGE ET AL. 2008

Lange, F.; Willberg, B.; Meusel, P.; Langwald, J.; Jörg, S.; Frommberger, M.; Hirzinger, G.; Werner, J.: Montage am kontinuierlich bewegten Band. In: Deutsche Gesellschaft für Robotik (DGR) (Hrsg.): Robotik 2008. München / Deutschland, 11.-12. Juni 2008. Düsseldorf: VDI 2008, S. 155-158. ISBN: 978-3180920122.

LAY & SCHIRRMEISTER 2001

Lay, G.; Schirrmeister, E.: Sackgasse Hochautomatisierung? In: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (Hrsg.): Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung 2001.

LENS ET AL. 2010

Lens, T.; Kunz, J.; von Stryk, O.; Trommer, C.; Karguth, A.: BioRob-Arm: A Quickly Deployable and Intrinsically Safe, Light-Weight Robot Arm for Service Robotics Applications. In: International Federation of Robotics (IFR) / Deutsche Gesellschaft für Robotik (DGR) (Hrsg.): Joint Conference of ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics). München / Deutschland, 07.-09. Juni 2010. Berlin: VDE 2010, S. 905-910. ISBN: 978-3800732739.

LI 2012

Li, P.: Optimale Steuerung 1 (Vorlesungsskript) Fachgebiet Simulation und Optimale Prozesse, TU Ilmenau. Ilmenau (2012). <<https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/simulation/Lehre/Vorlesungsskripte/OPT1/OS1-kapitel-7.pdf>> – 24.02.2014.

LIN & GOTTSCHALK 1998

Lin, M. C.; Gottschalk, S.: Collision Detection Between Geometric Models: A Survey. In: Crips, R. (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Conference on Mathematics of Surfaces (IMA 1998). Birmingham / Großbritannien, 31. August – 02. September 1998. Winchester: Information Geometers 1998, S. 37-56.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3642014222.

LINNEMANN 2013

Linnemann, H.: Robotertechnik (Vorlesungsskript) Fachbereich VI - Informatik und Medien, Beuth Hochschule für Technik. Berlin (2013).

LINNER 2002

Linner, S.: Manufacturing Process Management. In: Zäh, M. F. (Hrsg.): Seminar Fabrikplanung 2002. München: Utz 2002. ISBN: 978-3896750631.

LJUNG 2009

Ljung, L.: System Identification. Theory for the User. 2. Aufl. Upper Saddle River: Prentice-Hall 2009. ISBN: 978-0136566953.

LOTTER & WIENDHAL. 2012

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Berlin, New York: Springer 2012. ISBN: 978-3642290619.

LUNZE 2006

Lunze, J.: Regelungstechnik 1. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 978-3540283263.

LUNZE 2010

Lunze, J.: Regelungstechnik 2. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3642101984.

LUTZ & WENDT 2007

Lutz, H.; Wendt, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik. 7. Aufl. Frankfurt a. M.: Harri Deutsch 2007. ISBN: 978-3817118076.

MACIEJOWSKI 2002

Maciejowski, J. M.: Predictive control with Constraints. Harlow: Prentice Hall 2002. ISBN: 978-0201398236.

MANNINI & SABATINI 2010

Mannini, A.; Sabatini, A. M.: Machine Learning Methods for Classifying Human Physical Activity from On-Body Accelerometers. Sensors 10 (2010) 2, S. 1154-1175.

MARUYAMA ET AL. 2008

Maruyama, K.; Kawai, Y.; Yoshimi, T.; Tomita, F.: 3D Object Localization Based on Occluding Contour Using STL CAD Model. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2008). Tampa / USA, 08.-11. Dezember 2008. Piscataway: IEEE Press 2008, S. 1-4. ISBN: 978-1424421749.

MAYNE ET AL. 2000

Mayne, D. Q.; Rawlings, J. B.; Rao, C. V.; Sokaert, P. O. M.: Constrained model predictive control: Stability and optimality. Automatica 36 (2000) 6, S. 789-814.

MEISNER ET AL. 2008

Meisner, E.; Isler, V.; Trinkle, J.: Controller design for human-robot interaction. *Autonomous Robots* 24 (2008) 2, S. 123-134.

MEYER & HÄGELE. 2007

Meyer, C.; Hägele, M.: Roboter als Schrittmacher der Produktion. *A&D Select Robotik & Automation* (2007) 26-29.

MICHALOS ET AL. 2010

Michalos, G.; Makris, S.; Papakostas, N.; Mourtzis, D.; Chrysosouris, G.: Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2 (2010) 2, S. 81-91.

MICHIGAN TECH 2010

Michigan Tech: Mesh Simplification. 2010.

MONOSTORI ET AL. 2006

Monostori, L.; Váncza, J.; Kumara, S.: Agent-based systems for manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 55 (2006) 2, S. 697-720.

MORIKAWA ET AL. 2007

Morikawa, S.; Senoo, T.; Namiki, A.; Ishikawa, M.: Realtime collision avoidance using a robot manipulator with light-weight small high-speed vision systems. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) / Robotics Society of Japan (RSJ) (Hrsg.): International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007)*. San Diego / USA, 29. Oktober – 02. November 2007. Piscataway: IEEE Press 2007, S. 794-799. ISBN: 978-1424406012.

MRK-SYSTEME GMBH 2013

MRK-Systeme GmbH: KR 5 SI (SafeInteraction). <http://www.mrk-systeme.de/produkte_interaction.html> - 10.09.2013.

NAJMAEI & KERMANI 2011

Najmaei, N.; Kermani, M.: Pre-Collision Planning and Control for Physical Human-Robot Interactions. In: Zhang, D.; Gao, Z. (Hrsg.): *New Development of Manufacturing Robotic Systems and Automation*. Sharjah: Bentham Science 2011. ISBN: 978-1608052813.

NEURONICS AG 2008

Neuronics AG: *Menschennahe Automation mit Katana*. Von der Idee zum Serienprodukt. Thurgau: 11. April 2008.

NOCEDAL & WRIGHT 2006

Nocedal, J.; Wright, S. J.: *Numerical optimization*. 2. Aufl. New York: Springer 2006. ISBN: 978-0387303031.

NOVAK & FEDDEMA 1992

Novak, J. L.; Feddema, J. T.: A Capacitance-based Proximity Sensor for Whole Arm Obstacle Avoidance. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation (ICRA*

- 1992). Nizza / Frankreich, 12.-14. Mai 1992. Piscataway: IEEE Press 1992, S. 1307-1314. ISBN: 978-0818627200.
- NYHUIS ET AL. 2004
Nyhuis, P.; Mühlenbruch, H.; Heins, M.: Altersgerechte Qualifizierung für die Montage. wt Werkstatttechnik online 94 (2004) 9, S. 426-432.
- NYHUIS ET AL. 2008
Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Garbsen: PZH 2008. ISBN: 978-3939026969.
- OBERER-TREITZ ET AL. 2011
Oberer-Treitz, S.; Puzik, A.; Verl, A.: Sicherheitsbewertung der Mensch-Roboter-Kooperation. wt Werkstatttechnik online 101 (2011) 9, S. 629-632.
- OBERHOFER & ZIMMERER 1996
Oberhofer, W.; Zimmerer, T.: Wie Künstliche Neuronale Netze lernen. Ein Blick in die Black Box der Backpropagation Netzwerke. Regensburg: Universitätsverlag 1996. (Regensburger Diskussionsbeiträge Nr. 287)
- OGORODNIKOVA 2010
Ogorodnikova, O.: Human Robot Interaction: The Safety Challenge. An integrated framework for human safety (Dissertation, Budapest University of Technology and Economics). Budapest: Universitätsverlag 2010.
- O'NEILL 2001
O'Neill, J.: Building Better Global Economic BRICs. Goldman Sachs Global Economics Paper No. 66 (2001).
- OSTERMANN ET AL. 2011
Ostermann, B.; Huelke, M.; Kahl, A.: Von Zäunen befreit. atp edition (2011) 9, S. 52-59.
- OVERSCHEE & MOOR 1996
Overschee, P.; Moor, B.: Subspace Identification for Linear Systems. Theory – Implementation – Applications. Boston: Springer 1996. ISBN: 978-1461380610.
- PATINO ET AL. 2002
Patino, H. D.; Carelli, R.; Kuchen, B. R.: Neural Networks for Advanced Control of Robot Manipulators. IEEE Transactions on Neural Networks 13 (2002) 2, S. 343-354.
- PATRON 2005
Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung (Dissertation. TU München). München: Utz 2005. ISBN: 978-3831604746. (Forschungsberichte iwb 190).
- PILZ GMBH & CO. KG 2008
Pilz GmbH & Co. KG: Sicheres Kamerasystem SafetyEYE®.
<http://www.pilz.de/imperia/md/content/documentation/offen/psen/werbedruckschriften/Leaflet_SafetyEYE_DE_2008-01.pdf?redirected=true> – 22.11.2012.

PRASCH 2010

Prasch, M.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage (Dissertation, TU München). München: Utz 2010. ISBN: 978-3831640331. (Forschungsberichte *iwb* 243).

RABINER 1989

Rabiner, L. R.: A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition. Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety Security and Rescue Robotics (SSRR 1989) 77, S. 257-286.

RADI 2012

Radi, M.: Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators (Dissertation, TU München). München: Utz 2012. ISBN: 978-3831641956. (Forschungsberichte *iwb* 261).

RADI ET AL. 2010

Radi, M.; Nitsch, V.; Reiter, A.; Zaidan, S.; Reinhart, G.; Färber, B.: Telepresence in Industrial Applications: Implementation Issues for Assembly Tasks. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 19 (2010) 5, S. 415-429.

RAMPERSAD 1995

Rampersad, H.: State of the Art in Robotic Assembly. Industrial Robot: An International Journal 22 (1995) 2, S. 10-13.

REINHART & RADI 2009

Reinhart, G.; Radi, M.: Industrial Haptic Robot Guidance System for Assembly Processes. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games (HAVE 2009). Lecco / Italien, 07.-08. November 2009. Piscataway: IEEE Press 2009, S. 69-74. ISBN: 978-1424442188.

REINHART & RÖSEL 2010

Reinhart, G.; Rösel, W.: Interaktiver Assistenzroboter in der Montage. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 1-2, S. 80-83.

REINHART & SPILLNER 2010

Reinhart, G.; Spillner, R.: Assistenzroboter in der Produktion. In: Cluster Mechatronik & Automation (Hrsg.): Internationales Forum Mechatronik (IFM 2010). Winterthur / Schweiz, 03.-04. November 2010.

REINHART & WERNER 2007

Reinhart, G.; Werner, J.: Flexible Automation for the Assembly in Motion. CIRP Annals – Manufacturing Technology 56 (2007) 1, S. 25-28.

REINHART & ZAIDAN 2009

Reinhart, G.; Zaidan, S.: A Generic Framework for Workpiece-based Programming of Cooperating Industrial Robots. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2009). Changchun / China, 08.-12. August 2009. Piscataway: IEEE Press 2009, S. 37-42. ISBN: 978-1424426928.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Spillner, R.; Shen, Y.; Schilp, J.: Anwendung und Ansätze für die ortsflexible Roboterassistenz in der Produktion. In: Cluster Mechatronik & Automation (Hrsg.): Internationales Forum Mechatronik (IFM 2011). Cham / Deutschland, 21.-22. September 2011.

REINHART ET AL. 2012A

Reinhart, G.; Spillner, R.; Shen, Y.: Approaches of Applying Human-Robot-Interaction-Technologies to Assist Workers with Musculoskeletal Disorders in Production. In: Hutchison, D. et al. (Hrsg.): Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 74-84. ISBN: 978-3642335143.

REINHART ET AL. 2012B

Reinhart, G.; Shen, Y.; Spillner, R.; Schilp, J.: Modellbasiertes MRK-Sicherheitssystem. wt Werkstatttechnik online 102 (2012) 6, S. 425-430.

REINHART ET AL. 2013

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Geiger, F.; Philipp, T. R.; Wahlster, W.; Zühlke, D.; Schlick, J.; Becker, T.; Löckelt, M.; Pirvu, B.; Stephan, P.; Hodek, S.; Scholz-Reiter, B.; Thoben, K.; Gorltd, C.; Hribernik, K. A.; Lappe, D.; Veigt, M.: Cyber-Physische Produktionssysteme. wt Werkstatttechnik online (2013) 2, S. 84-89.

REY & WENDER 2011

Rey, G. D.; Wender, K. F.: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung. 2. Aufl. Bern: Huber 2011. ISBN: 978-3456848815.

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. 3. Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag 2009. ISBN: 978-3866443747.

ROSCHER 2008

Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie (Dissertation, Universität Stuttgart). Stuttgart: Universitätsverlag 2008.

ROSS 2002

Ross, P.: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung (Dissertation, TU München). München: Utz 2002. ISBN: 978-3831601912. (Forschungsberichte iwB 170).

ROSSMANN 1993

Rossmann, H. J.: Echtzeitfähige, kollisionsvermeidende Bahnplanung für Mehrrobotersysteme (Dissertation, TU Dortmund). Dortmund: Universitätsverlag 1993.

RUSINKIEWICZ & LEVOY 2001

Rusinkiewicz, S.; Levoy, M.: Efficient Variants of the ICP Algorithm. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Confer-

ence on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2001). Quebec / Kanada, 28. Mai – 01. Juni 2001. Piscataway: IEEE Press 2001, S. 145-152. ISBN: 978-0769509846.

RUSS 1995

Russ, H. J.: Sensornahe Umgebungsmodellierung mit echtzeitfähigen Zugriffsfunktionen (Dissertation, TU München). Düsseldorf: VDI 1995. ISBN: 978-3183364107.

RUSSELL & NORVIG 2003

Russell, S. J.; Norvig, P.: Artificial Intelligence. A Modern Approach. 2. Aufl. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall/Pearson Education 2003. ISBN: 978-0130803023.

SALIMIFARD & WRIGHT 2001

Salimifard, K.; Wright, M.: Petri Net-Based Modeling of Workflow Systems: An Overview. European Journal of Operational Research 134 (2001) 3, S. 664-676.

SALLINEN & HEIKKILÄ 2000

Sallinen, M.; Heikkilä, T.: A Simple Hand-Eye Calibration Method for a 3D Laser Range Sensor. In: Camarinha-Matos, L. M. et al. (Hrsg.): Advances in Networked Enterprises. Boston, MA: Springer US 2000, S. 421-430. ISBN: 978-1475744453.

SALVI ET AL. 2007

Salvi, J.; Matabosch, C.; Fofi, D.; Forest, J.: A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. Image and Vision Computing 25 (2007) 5, S. 578-596.

SANTOCHI & DINI 1998

Santochi, M.; Dini, G.: Sensor Technology in Assembly Systems. CIRP Annals – Manufacturing Technology 47 (1998) 2, S. 503-524.

SAYLER 2011

Sayler, S.: Universelle Manipulationsstrategien für die industrielle Montage (Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2011. ISBN: 978-3866446625.

SCHARSTEIN & SZELISKI 2002

Scharstein, D.; Szeliski, R.: A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. International Journal of Computer Vision 47 (2002) 1/3, S. 7-42.

SCHLAICH 2013

Schlaich, P.: Ortsflexible Produktionsassistenten. In: VDI (Hrsg.): 4. VDI-Fachtagung Industrielle Robotik 2013.

SCHLICK ET AL. 2010

Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3540783329.

SCHMIDT & WANG 2013

Schmidt, B.; Wang, L.: Contact-less and Programming-less Human-Robot Collaboration. *Procedia CIRP* 7 (2013), S. 545-550.

SCHMIDTKE 1993

Schmidtke, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. 3. Aufl. München: Carl Hanser 1993. ISBN: 978-3446164406.

SCHUH ET AL. 2005

Schuh, G.; Meier, J.; Wellensiek, M.: Chance Robotik. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (2005) 7-8, S. 416-419.

SCHULENBURG ET AL. 2007

Schulenburg, E.; Elkmann, N.; Fritzsche, M.; Girstl, A.; Stiene, S.; Teutsch, C.: LiSA: A Robot Assistant for Life Sciences. In: Hertzberg, J. et al. (Hrsg.): *Advances in artificial intelligence: 30th Annual German Conference on AI (KI 2007)*. Osnabrück / Deutschland, 10.-13. September 2007, S. 502-505. Berlin, Heidelberg: Springer 2007, S. 502-505. ISBN: 978-3540745655.

SCHULENBURG ET AL. 2010

Schulenburg, E.; Elkmann, N.; Fritzsche, M.; Hertzberg, J.; Stiene, S.: LiSA: Auf dem Weg zur sicheren Assistenzrobotik. *KI – Künstliche Intelligenz* 24 (2010) 1, S. 69-73.

ŠEKORANJA ET AL. 2014

Šekoranja, B.; Bašić, D.; Švaco, M.; Šuligoj, F.; Jerbić, B.: Human-Robot Interaction Based on Use of Capacitive Sensors. *Procedia Engineering* 69 (2014), S. 464-468.

SHEA 2013

Shea, R. N.: *Robot Safety Standard Update*. Orlando, Florida, USA: 20.-22. Februar 2013.

SHEN & REINHART 2012

Shen, Y.; Reinhart, G.: Modellbasierter Sicherheitsansatz für automatisierte Fügeprozesse in der Mensch-Roboter-Kooperation. In: *Cluster Mechatronik & Automation* (Hrsg.): *Internationales Forum Mechatronik (IFM 2012)*. Mayrhofen / Österreich, 21.-22. November 2012.

SHEN & REINHART 2013A

Shen, Y.; Reinhart, G.: Safe Assembly Motion – A Novel Approach for Applying Human-Robot Co-operation in Hybrid Assembly Systems. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* (Hrsg.): *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2013)*. Takamatsu / Japan, 04.-07. August 2013. Piscataway: IEEE Press 2013, S. 7-12. ISBN: 978-1467355575.

SHEN & REINHART 2013B

Shen, Y.; Reinhart, G.: Considerations on Deploying a Model-based Safety System into Human-Robot Co-operation. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* (Hrsg.): *International Symposium on Robotic and Sensors*

Environments (ROSE 2013). Washington DC / USA, 21.-23. Oktober 2013.
Piscataway: IEEE Press 2013, S. 1-6. ISBN: 978-1467329385.

SHEN ET AL. 2015

Shen, Y.; Reinhart, G.; Tseng, M. M.: A Design Approach for Incorporating Task Coordination for Human-Robot-Coexistence within Assembly Systems. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Systems Conference (SysCon 2015). Vancouver, BC / Kanada, 13.-16. April 2015. In Druck.

SICILIANO & KHATIB 2008

Siciliano, B.; Khatib, O.: Springer Handbook of Robotics. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3540239574.

SINGH ET AL. 1996

Singh, L.; Stephanou, H.; Wen, J.: Real-time Robot Motion Control with Circulatory Fields. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1996). Minneapolis / USA, 22-28. April 1996. Piscataway: IEEE Press 1996, S. 2737-2742. ISBN: 978-0780329881.

SISBOT ET AL. 2010

Sisbot, E. A.; Marin-Urias, L. F.; Broquère, X.; Sidobre, D.; Alami, R.: Synthesizing Robot Motions Adapted to Human Presence. International Journal of Social Robotics 2 (2010) 3, S. 329-343.

SMITH 2001

Smith, D. J.: Reliability, Maintainability and Risk. 6. Aufl. Amsterdam: Elsevier 2001. ISBN: 978-0750651684.

SMITH ET AL. 2004

Smith, D. J.; Simpson, K. G. L.: Functional Safety. A Straightforward Guide to Applying IEC 61508 and Related Standards. 2. Aufl. Amsterdam: Elsevier 2004. ISBN: 978-0080477923.

SOM 2005

Som, F.: Sichere Steuerungstechnik für den OTS-Einsatz von Robotern. Stuttgart: 02. November 2005.

SONG 2011

Song, J. B.: Design of an Intrinsic Safe Arm. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): Workshop at the International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011): Towards Autonomous Physical Human-Robot Interaction. Shanghai / China, 09.-13. Mai 2011.

SPATH ET AL. 2013

Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO). München: Fraunhofer 2013.

SPILLNER 2014

Spillner, R.: Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von

Leistungswandlungen in der Produktion (Dissertation, TU München). München: Utz 2014. ISBN: 978-3831644506. (Forschungsberichte *iwb* 296).

SPITZWEG 2009

Spitzweg, M.: Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen (Dissertation, TU München). München: Utz 2009. ISBN: 978-3831609314. (Forschungsberichte *iwb* 233).

SRIHARI & SU 2011

Srihari, S. N.; Su, C.: Generative Models and Probability Evaluation for Forensic Evidence. In: Wang, P. S. P. (Hrsg.): Pattern Recognition, Machine Intelligence and Biometrics. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 533-559. ISBN: 978-3642224065.

STANLEY COBOTICS 2005

Stanley Cobotics: Intelligent Assist Devices. <www.stanleyassembly.com> – 21.08.2012.

STEVENS 1999

Stevens, W. R.: Interprocess Communications. 2. Aufl. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall 1999. ISBN: 978-0130810816.

SUPPA 2008

Suppa, M.: Autonomous Robot Work Cell Exploration using Multisensory Eye-in-Hand Systems (Dissertation, Universität Hannover)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Hannover: Universitätsverlag 2008.

SZCZERBICKA 2012

Szczerbicka, H.: Einführung in die Modellierung mit Petri-Netzen. Hannover: Universitätsverlag 2012.

TAKATA & HIRANO 2011

Takata, S.; Hirano, T.: Human and robot allocation method for hybrid assembly systems. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60 (2011) 1, S. 9-12.

TEKOUO 2012

Tekouo, W.: A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection Systems (Dissertation, TU München). München: Utz 2012. ISBN: 978-3831642472. (Forschungsberichte *iwb* 272).

THE BOSTON CONSULTING GROUP 2005

The Boston Consulting Group: Current and Future Trends in the Global Robotics Industry. 2005.

THIEMERMANN 2005

Thiemermann, S.: Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter (Dissertation, Universität Stuttgart). Heimsheim: Jost-Jetter 2005. ISBN: 978-3936947502. (IPA-IAO-Forschung und -Praxis 411).

TIDD 1997

Tidd, J.: Key Characteristics of Assembly Automation Systems. In: Shimokawa,

K. et al. (Hrsg.): Transforming automobile assembly. Berlin, New York: Springer 1997, S. 46-60. ISBN: 978-3642603747.

TSAI & MORGAN 1985

Tsai, L.; Morgan, A.: Solving the Kinematics of the Most General Six- and Five-Degree-of-Freedom Manipulators by Continuation Methods. ASME Transactions, Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design 107 (1985) 2, S. 189-200.

TSENG & SCHREYER 2002

Tseng, M.; Schreyer, M.: Model-based Design of PLC Programs. CIRP Journal of Manufacturing Systems (2002).

TURAGA ET AL. 2008

Turaga, P.; Chellappa, R.; Subrahmanian, V. S.; Udrea, O.: Machine Recognition of Human Activities: A Survey. IEEE Transaction on Circuits Systems for Video Technology 18 (2008) 11, S. 1473-1488.

UNIVERSAL ROBOTS APS 2010

Universal Robots ApS: Automate Your Production - Easily, Cheaply and Flexibly. <<http://pdfs.findtheneedle.co.uk/10186-UniversalRobots.pdf>> – 08.06.2011.

VANNOY & XIAO 2008

Vannoy, J.; Xiao, J.: Real-Time Adaptive Motion Planning (RAMP) of Mobile Manipulators in Dynamic Environments with Unforeseen Changes. IEEE Transactions on Robotics and Automation 24 (2008) 5, S. 1199-1212.

VASIC & BILLARD 2013

Vasic, M.; Billard, A.: Safety Issues in Human-Robot Interactions. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013). Karlsruhe / Deutschland, 06.-10. Mai 2013. Piscataway: IEEE Press 2013, S. 197-204. ISBN: 978-1467356411.

VDI/VDE INNOVATION + TECHNIK GMBH 2011

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH: Technologische und wirtschaftliche Perspektiven Deutschlands durch die Konvergenz der elektronischen Medien. Berlin: 2011.

VERMEULEN & WISSE 2010

Vermeulen, M.; Wisse, M.: Intrinsically Safe Robot Arm: Adjustable Static Balancing and Low Power Actuation. International Journal of Social Robotics 2 (2010) 3, S. 275-288.

VISSER & PEINEMANN 1996

Visser, A.; Peinemann, F. W.: Einsatzmöglichkeiten neuronaler Netze in der Industrierobotik. Forschung im Ingenieurwesen 62 (1996) 6, S. 149-160.

VOGL 2008

Vogl, W.: Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern (Dissertation, TU München). München: Utz 2008. ISBN: 978-3831608690. (Forschungsberichte *iwb* 228).

WANG ET AL. 2013

Wang, L. H.; Schmidt, B.; Nee, A. Y.: Vision-guided active collision avoidance for human-robot collaborations. *Manufacturing Letters* 1 (2013) 1, S. 5-8.

WANG & SONG 2009

Wang, L. Y.; Song, W. D.: A review of Range Image Registration methods with Accuracy Evaluation. In: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) (Hrsg.): Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE 2009)*. Shanghai / China, 20.-22. Mai 2009, S. 1-8.

WELCH & BISHOP 2006

Welch, B.; Bishop, G.: *An Introduction to the Kalman Filter*. University of North Carolina at Chapel Hill: 2006.

WERNER 2004

Werner, H.: *Künstliche Neuronale Netze*. Universität Kassel: 2004.

WERNER 2009

Werner, J.: *Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie (Dissertation, TU München)*. München: Utz 2009. ISBN: 978-3831608577. (Forschungsberichte iw 225).

WERNER 2012

Werner, R.: *Störungstolerantes Sensorsystem zur Zustandsüberwachung rotodynamischer Pumpen (Dissertation, TU Darmstadt)*. Darmstadt: Universitätsverlag 2012. (Mikro- und Sensortechnik 21).

WERTHSCHÜTZKY 2008

Werthschützky, R.: *Mess- und Sensortechnik (Skriptum zur Vorlesung)*. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt. Darmstadt (2008).

WESTKÄMPER ET AL. 2000

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. *wt Werkstatttechnik online* 90 (2000) 1/2, S. 22-26.

WIEDERHOLD 2011

Wiederhold, O.: *Regelung abgelöster Strömungen in hoch belasteten Turbomaschinen (Dissertation, TU Berlin)*. Berlin: Universitätsverlag 2011. ISBN: 978-3798322950.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: *Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation*. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 56 (2007) 2, S. 783-809.

WINKLER 2007

Winkler, B.: *Safe Space Sharing Human-Robot Cooperation Using a 3D Time-of-Flight Camera*. In: *International Federation of Robotics (IFR) (Hrsg.): International Symposium on Robotics (ISR 2007)*. Chicago / USA, Juni 2007.

WOLLNACK 2009

Wollnack, J.: *Verhalten von Maschinen und Modellen (Skriptum zur Vorlesung)*.

TU Hamburg-Harburg. Hamburg (2009).

<<http://www.tuhh.de/ft2/wo/Vorlesungen/WZMII/MaschinenVerhaltenModelle.pdf>> – 21.01.2014.

WÖRN & BRINKSCHULTE 2005

Wörn, H.; Brinkschulte, U.: Echtzeitsysteme. Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen. Berlin: Springer 2005. ISBN: 978-3540205883.

YANCO & DRURY 2004

Yanco, H. A.; Drury, J.: Classifying Human-Robot Interaction: An Updated Taxonomy. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC 2004). Den Haag / Niederlande, 10.-13. Oktober 2004. Piscataway: IEEE Press 2004, S. 2841-2846. ISBN: 978-0780385665.

YIGIT 2005

Yigit, S.: Methode zur taktil gekoppelten Kooperation zwischen Mensch und anthropomorphen Roboterarm (Dissertation, Universität Karlsruhe). Herdecke: GCA 2005.

YUAN & CHEN 2014

Yuan, Q. L.; Chen, I. M.: Localization and velocity tracking of human via 3 IMU sensors. *Sensors and Actuators A: Physical* 212 (2014), S. 25-33.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Wagner, W.; Prasch, M. G.: Montagestrukturen für alternde Belegschaften. Systematische Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in Wertschöpfungsprozesse. *wt Werkstatttechnik online* 95 (2005) 9, S. 637-642.

ZAIDAN 2012

Zaidan, S.: A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots (Dissertation, TU München). München: Utz 2012. ISBN: 978-3831641758. (Forschungsberichte *iwb* 259).

ZAMBOU 2005

Zambou, N.: Lagrange-basierte und modellgestützte Regelungsstrategie für die automatische Fahrzeugführung im Konvoi (Dissertation, RWTH Aachen). Düsseldorf: VDI 2005. ISBN: 978-3185074080. (Berichte aus dem Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen 1074).

ZELLER 2001

Zeller, W.: Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen (Dissertation, TU München). München: Utz 2001. ISBN: 978-3831601004. (Forschungsberichte *iwb* 161).

ZHANG & NAGHDY 2006

Zhang, X. C.; Naghdy, F.: Human Motion Recognition through Fuzzy Hidden Markov Model. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA 2006). Wien / Österreich,

28. November – 1. Dezember 2006. Piscataway: IEEE Press 2006, S. 450-456.
ISBN: 978-0769527314.

ZUEHLKE 2010

Zuehlke, D.: SmartFactory – Towards a factory-of-things. Annual Reviews in Control 34 (2010) 1, S. 129-138.

9 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) in den Jahren 2012 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die folgenden studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende(r)	Studienarbeit
Wenduan Diao	Konzeption und Entwurf eines simulationsfähigen Robotermodells für die Mensch-Roboter-Kooperation. FH Lübeck, 09/2012
Michael Pentenrieder	Konstruktion und Inbetriebnahme eines Greifers für die ortsflexible automatisierte Montage von PKW-Sitzen. HS Rosenheim, 06/2013
Melanie Frick	Entwicklung eines ortsflexiblen Bahnplanungskonzepts für Industrieroboter für die förderbandsynchrone Montage am Beispiel der Automobilindustrie. TU München, 09/2013
Hebateer Su	Analyse, Konzeption und Implementierung einer modellbasierten Robotersteuerung für die sicherheitsüberwachte Montage in der Mensch-Roboter-Kooperation. TU München, 01/2014
Fabian Hanke	Entwicklung einer Scanstrategie zur modellbasierten Objekterkennung mit einem Laser-Sensor geführten Industrieroboter. TU München, 04/2014
Javier Garcia	Entwicklung einer Online-Bahnglättung für Industrieroboter sowie Integration einer flexiblen Positionsregelung am Beispiel der Sitzmontage in der Automobilindustrie. TU München, 06/2014
Kathrin Kreißl	Dynamische Positionssynchronisation eines Kamerasystems an einen ortsflexiblen Industrieroboter am Beispiel einer förderbandsynchronen Montage. TU München, 06/2014

Martin Griss	Situationsadaptives Entscheidungsmodell für die Roboterreaktion in einer Mensch-Roboter-Kooperation am Beispiel einer förderbandsynchronen Montage in der Automobilindustrie. TU München, 06/2014
Felix Schultheiß	Echtzeitfähige Kollisionsvermeidung für den simultanen Betrieb zweier Roboterarme. TU München, 06/2014

Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten - ISBN 3-931327-07-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel
130 Seiten - ISBN 3-931327-08-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte
120 Seiten - ISBN 3-931327-09-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlang im Mittelstand
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte IWB Band 1-121

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1 -121 sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen.

- 1 Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 Fuchsberger, A.: Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 Maier, C.: Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrieroboter
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 Summer, H.: Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 Simon, W.: Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 Büchs, S.: Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 Hunzinger, J.: Schneiderdierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 Pilland, U.: Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozessgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 Reithofer, N.: Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 Reinhart, G.: Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 Bürstner, H.: Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 Riese, K.: Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 Lutz, P.: Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 Klippel, C.: Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 Rascher, R.: Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 Heusler, H.-J.: Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 Kirchknopf, P.: Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 Sauerer, Ch.: Beitrag für ein Zerspanprozessmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 Karstedt, K.: Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 Peiker, St.: Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 Schugmann, R.: Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 Wrba, P.: Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 Eibelshäuser, P.: Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 Prasch, J.: Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 Teich, K.: Prozeßkommunikation und Rechnernetz in der Produktion
1990: 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfang, W.: Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990: 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.: Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990: 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.: Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991: 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.: Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991: 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuczek, H.: Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992: 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.: Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991: 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.: 3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991: 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.: Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991: 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.: Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991: 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.: Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991: 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.: Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991: 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.: 3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991: 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992: 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.: Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992: 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hoßmann, J.: Methodik zur Planung der automatisierten Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992: 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 Petry, M.: Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992: 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.: Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992: 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.: Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992: 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.: Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992: 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schrüfer, N.: Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992: 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.: Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992: 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 Garnich, F.: Laserbearbeitung mit Robotern
1992: 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.: Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992: 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 Glaas, W.: Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992: 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.: Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992: 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.: Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992: 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.: Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992: 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bomm, H.: Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992: 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.: Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992: 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.: Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993: 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.: Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993: 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5
- 60 Strohmayr, R.: Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeeinrichtungen
1993: 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 Glas, J.: Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware
1993: 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 Stetter, R.: Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboterereinsatzes
1994: 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 Dimdörfer, A.: Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993: 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 Wiedemann, M.: Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen
1993: 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 Woenckhaus, Ch.: Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung
1994: 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 Kummelstein, G.: 3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme
1994: 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 Kugelman, F.: Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen
1993: 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 Schwarz, H.: Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994: 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 Viethen, U.: Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994: 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 Seehuber, M.: Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994: 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 Amann, W.: Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen
1994: 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 Schöpf, M.: Rechnergestütztes Projektkommunikations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997: 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 Welling, A.: Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994: 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 Zetmayer, H.: Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion
1994: 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0

- 75 Lindl, M.: Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 - 66 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58221-5
- 76 Zipper, B.: Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 - 64 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58222-3
- 77 Raith, P.: Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 - 51 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58223-1
- 78 Engel, A.: Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 - 69 Abb. - 160 Seiten - ISBN 3-540-58258-4
- 79 Zäh, M. F.: Dynamisches Prozessmodell Kreissägen
1995 - 95 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-58624-5
- 80 Zwanzer, N.: Technologisches Prozessmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 - 65 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-58634-2
- 81 Romanow, P.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 - 66 Abb. - 151 Seiten - ISBN 3-540-58771-3
- 82 Kahlenberg, R.: Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 - 71 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-58772-1
- 83 Huber, A.: Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 - 87 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-58773-X
- 84 Birkel, G.: Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 - 64 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-58869-8
- 85 Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 - 77 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-58942-2
- 86 Nedeljkovic-Groha, V.: Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 - 94 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-58953-8
- 87 Rockland, M.: Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 - 83 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-58999-6
- 88 Linner, St.: Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 - 67 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-59016-1
- 89 Eder, Th.: Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 - 62 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-59084-6
- 90 Deutschle, U.: Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 - 80 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-59337-3
- 91 Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 - 68 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-60120-1
- 92 Hechl, Chr.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 - 73 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-60325-5
- 93 Albertz, F.: Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 - 83 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-60608-8
- 94 Trunzer, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 - 101 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-60961-X
- 95 Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 - 83 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-60960-1
- 96 Trucks, V.: Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 - 64 Abb. - 141 Seiten - ISBN 3-540-60599-8
- 97 Schäffer, G.: Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 - 71 Abb. - 170 Seiten - ISBN 3-540-60958-X
- 98 Koch, M. R.: Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 - 67 Abb. - 138 Seiten - ISBN 3-540-61104-5
- 99 Moctezuma de la Barrera, J. L.: Ein durchgängiges System zur Computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 - 99 Abb. - 175 Seiten - ISBN 3-540-61145-2
- 100 Geuer, A.: Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 - 84 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-61495-8
- 101 Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 - 67 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-61678-0
- 102 Pischelsrieder, K.: Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 - 74 Abb. - 171 Seiten - ISBN 3-540-61714-0
- 103 Köhler, R.: Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 - 62 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-62024-9
- 104 Feldmann, Ch.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 - 71 Abb. - 163 Seiten - ISBN 3-540-62059-1
- 105 Lehmann, H.: Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 - 96 Abb. - 191 Seiten - ISBN 3-540-62202-0
- 106 Wagner, M.: Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 - 94 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-62656-5
- 107 Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 - 63 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-62794-2
- 108 Krönert, U.: Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung
1997 - 53 Abb. - 127 Seiten - ISBN 3-540-63338-3
- 109 Pfersdorf, I.: Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 - 74 Abb. - 172 Seiten - ISBN 3-540-63615-3
- 110 Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 - 77 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-63642-0
- 111 Kaiser, J.: Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 - 67 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-63999-3
- 112 Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 - 85 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-64195-5
- 113 Martin, C.: Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 - 73 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-64401-6
- 114 Löffler, Th.: Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 - 85 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-64511-X
- 115 Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 - 84 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-64686-8
- 116 Koehrer, J.: Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 - 75 Abb. - 185 Seiten - ISBN 3-540-65037-7
- 117 Schuller, R. W.: Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 - 76 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-65320-1
- 118 Debuschewitz, M.: Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 - 104 Abb. - 169 Seiten - ISBN 3-540-65350-3

- 119 **Bauer, L.:** Strategien zur rechnergestützten Offline- Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 - 98 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-65382-1
- 120 **Pfob, E.:** Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 - 69 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-65525-5
- 121 **Spitznagel, J.:** Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 - 63 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-65896-3

Forschungsberichte IWB ab Band 122

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 **Burghard Schneider:** Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 **Bernd Goldstein:** Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 **Helmut E. Mößner:** Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten - ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 **Ralf-Gunter Gräser:** Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten - ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 **Hans-Jürgen Trossin:** Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 **Doris Kugelmann:** Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten - ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 **Rolf Diesch:** Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 **Werner E. Lulay:** Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten - ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 **Otto Murr:** Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten - ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 **Michael Macht:** Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 **Bruno H. Mehler:** Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden
152 Seiten - ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 **Knut Heltmann:** Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten - ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 **Stefan Blessing:** Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 **Can Abay:** Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten - ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 **Stefan Brandner:** Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten - ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 **Arnd G. Hirschberg:** Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten - ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 **Alexandra Reek:** Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten - ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 **Khalid-Alexander Sabbah:** Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten - ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 **Klaus U. Schliffenbacher:** Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten - ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 **Andreas Sprenzel:** Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten - ISBN 978-3-89675-757-9
- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehner:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Hahn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0

- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0022-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudarfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Fährer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppler:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitinge:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Joachim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierlohr:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9
- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3

- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-6
- 211 **Klaus Schlickenrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wunsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlintensins
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4

- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 244 **Georg Völlner:** Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilleistungsanforderungen
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transientscher Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Rad:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleoperation systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreißschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmelötungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettspezifischen Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettspezifische 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5
- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Mar Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwinggrad-Reißschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekou Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Esche:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6

- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten · ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten · ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathey Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen
206 Seiten · ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung
196 Seiten · ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation
198 Seiten · ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahmert:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärts
128 Seiten · ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreißschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie
300 Seiten · ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 **Florian Karl:** Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln
222 Seiten · ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 **Philipp Ronald Engelhardt:** System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
246 Seiten · ISBN 978-3-8316-4472-8
- 300 **Markus Graßl:** Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion
202 Seiten · ISBN 978-3-8316-4476-6
- 301 **Thomas Kirchmeier:** Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess
196 Seiten · ISBN 978-3-8316-4478-0
- 302 **Oliver Rösch:** Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4486-5
- 303 **Christoph Sieben:** Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität von Kolbendichtungen
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4510-7
- 304 **Philipp Alexander Schmidt:** Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-4519-0

